ESTUDIO UNIVERSAL DE DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS:

FACTORES CLIMÁTICOS, SU MEDIDA Y PROPUESTAS PARA OPTIMIZAR SU UBICACIÓN EN LA PENÍNSULA IBÉRICA

TESIS DOCTORAL JOSÉ ANTONIO QUESADA MORENO



Directores de la Tesis Doctoral: Emilio Martínez Ibarra y José Luis Ortiz Moreno Programa de Doctorado en Ciudad, Territorio y Planificación Sostenible



Esta tesis se la dedico muy especialmente a mi mujer, Joaquina, y a mi hijo, Antonio.

UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física



UNIVERSIDAD DE GRANADA

ESTUDIO UNIVERSAL DE DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS:

FACTORES CLIMÁTICOS, SU MEDIDA, Y PROPUESTAS PARA OPTIMIZAR SU UBICACIÓN EN LA PENÍNSULA IBÉRICA.

TESIS DOCTORAL PRESENTA POR

José Antonio Quesada Moreno

Dirección:

Doctor Emilio Martínez Ibarra del Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física de la Universidad de Granada, y el Doctor José Luis Ortiz Moreno del Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC.

Programa de Doctorado: Ciudad, Territorio y Planificación Sostenible

Granada marzo de 2025

El doctorando / The doctoral candidate [

José Antono Quesada Moreno] y los directores de la tesis / and the thesis supervisor/s: [Emilio Martínez Ibarra y José Luis Ortiz Moreno]

Garantizamos, al firmar esta tesis doctoral, que el trabajo ha sido realizado por el doctorando bajo la dirección de los directores de la tesis y hasta donde nuestro conocimiento alcanza, en la realización del trabajo, se han respetado los derechos de otros autores a ser citados, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

1

Guarantee, by signing this doctoral thesis, that the work has been done by the doctoral candidate under the direction of the thesis supervisor/s and, as far as our knowledge reaches, in the performance of the work, the rights of other authors to be cited (when their results or publications have been used) have been respected.

Lugar y fecha / Place and date:

Granada, 3 de abril de 2025

Director/es de la Tesis / Thesis supervisor/s;

Emilio Martínez Ibarra Firmado digitalmente por Emilio Martínez Ibarra Fecha: 2025.04.03 14:13:40 +02'00'

ORTIZ MORENO JOSE LUIS -24220148K

Firmado digitalmente por ORTIZ MORENO JOSE LUIS - 24220148K Fecha: 2025.04.03 14:22:44 +02'00'

Firma / Signed

Doctorando / Doctoral candidate:

José Antonio Quesa da Moreno

Firma / Signed

PREÁMBULO A ESTE TRABAJO

Esta tesis, dada su larga gestación de casi 40 años, ha sufrido cambios en dos aspectos fundamentales en su enfoque, hasta dar con la forma presentada hoy.

El primer aspecto tiene que ver con la variación de extensión espacial, pasando progresivamente de lo local a lo universal y ello unido al desarrollo de las técnicas en vigor y a la concepción académica de este tipo de trabajos.

El segundo aspecto que destacar, es la selección de tópicos, variables y factores que intervienen en su cuerpo expositivo. Estos han sufrido grandes cambios en tan largo periodo de tiempo, pasando de registros visuales a sofisticadas técnicas de análisis e interpretación de datos ayudados por los más recientes Sistemas de Información Geográfica (SIGs) para extraer la información de bases de datos masivas, ya preprocesadas, que abarcan más de un siglo.

También es interesante destacar que este trabajo ha supuesto un gran esfuerzo para congeniar las visiones tan diferentes que tienen las escuelas geográficas de aquellas otras físicas astronómicas (astrofísica); por lo que nuestro intento esperamos rompa barreras académicas un tanto artificiales.

En muchos aspectos de esta tesis, hay una componente intuitiva que lleva a plantear los análisis de manera un tanto libre, prefiriendo la expresión grafica a la textual, aparte de otras libertades, por lo que pido disculpas a la academia.

Se dan una serie de consejos y se hacen algunas peticiones, sobre todo de cara a las localizaciones futuras de enclaves astronómicos, y a la preservación de las condiciones ambientales de ciertas áreas de la Península Ibérica, sobre todo frente a la contaminación lumínica, la degradación industrial o de la reserva de áreas protegidas.

Se han dejado en un segundo plano algunos tipos de observatorios como los de tipo solar, que tienen sus requerimientos específicos o los de radio, que también son bastante específicos.

Es resultado final se nos antoja un análisis cualitativo, gráfico y textual, sin faltar un análisis cuantitativo a través de tablas y gráficos pertinentes. Se han añadido apéndices en prácticamente todos los capítulos, los cuales utilizan jergas especificas en su campo.

También destacaríamos, que la visión de incorporar "Figuras de Merito" a los lugares estudiados ha sido descartada. No hemos encontrado útil la ponderación del valor de variables en una tabla con muchos lugares, es muy difícil asignar pesos de manera objetiva. Nosotros solo hacemos comparativas de datos proporcionadas por los propios observatorios y no asignamos peso alguno que hagan destacar los méritos particulares de los lugares en su comparación. Los juicios de valor emitidos en forma textual están sujetos a revisión total.

La tarea de síntesis mental ha sido considerable, aquí es donde, modestamente he podido llegar con mis apreciaciones. Esta contribución no es sino un intento de enmarcar en algo coherente, o al menos relacionado, el conjunto de factores y variables

que modulan el enorme espacio de la caracterización de los observatorios astronómicos y su identificación y protección futuras.

Debo decir en mi descargo, que muchas de ideas, comentarios y emisiones de juicio de este trabajo se han sido cimentado después de largas conversaciones con cientos de astrónomos, no solo españoles, sino también extranjeros. Ello fue posible debido a las largas pausas del "café del astrónomo" en noches interminables, con mal tiempo, donde el único refugio era la cafetería del observatorio. Por ello, el poso de estas exposiciones tiene algo, o bastante, del saber de otros profesionales.

También debo hacer destacar y agradecer las numerosas colaboraciones que he tenido con muchos astrónomos profesionales durante mi vida laboral en los observatorios de Sierra Nevada, IRAM, Calar Alto y La Sagra. Algunas de estas se vieron plasmadas en publicaciones internacionales.

A todos, muchas gracias.

RESUMEN:

Con esta investigación se pretende mostrar y analizar, desde una perspectiva general (mundial), las características y factores la distribución espacial y temporal que han marcado y describen, desde una perspectiva fundamentalmente astro-climática, la ubicación de los observatorios astronómicos.

También, de forma más concreta, se pretende hacer lo propio con los observatorios de la península ibérica, describiendo las condiciones astro- climáticas más relevantes de los mismos, y su afectación en la observación astronómica, en sus distintas modalidades (p,ej. visible, infrarroja, radio, etc.), así como los efectos de la contaminación lumínica. Se ha realizado un estudio profundo de los observatorios astronómicos ubicados en el sureste de la península Ibérica; haciendo especial hincapié en Sierra Nevada, Calar Alto y el observatorio de la Sagra.

Una de las hipótesis principales de este trabajo es probar que en el SE de la península ibérica disponemos de condiciones astronómicas equiparables a las presentes en los mejores observatorios del mundo o, al menos, a escala Europea.

Desde el punto de procedimental, se ha seguido un método clásico de revisión y evaluación bibliográfica, con considerable extensión, y de consulta de base de datos cartográficas, en cada tópico astro-climático, también para el caso de la contaminación lumínica. Así, se han desarrollado nueve capítulos, bastante diferenciados entre sí, y dedicados a una variable o conjunto de variables representativas, vinculadas con un factor climático o logístico de ubicación de observatorios astronómicos. Se han establecido algunas premisas que han de cumplirse para evaluar positivamente tal o cual región de interés astronómico, como son ciertos umbrales que consideramos típicos o deseables para una eficaz investigación en astronomía observacional con base en tierra (aptitudes astro-climáticas y efectos vinculados con la contaminación lumínica).

Respecto a los resultados, nuestra investigación se adentra más allá de lo encontrado en la bibliografía, pues se analizan también bases de datos cartográficas satelitales. Además, para el caso del SE de la península ibérica, se dispone de datos de observatorios meteorológicos y registrados, en ocasiones, por el propio autor (particularmente en el capítulo de turbulencia atmosférica). Por tanto, en conjunto, podemos indicar que nuestra aproximación es de las más completas publicadas hasta el momento a nivel internacional (por su carácter integral en el análisis de variables que influyen en la observación astronómica y por la perspectiva global aportada). Todo ello, como se indica, a base de la reproducción abundante de mapas temáticos a distintas escalas y para el conjunto del planeta, así como la reproducción de tablas y figuras donde aparecen valores de las distintas variables astro-climáticas. En definitiva, es de subrayar el carácter transversal de nuestra investigación, tanto en el campo de la geografía física y la planificación territorial, como de la historiografía y la astronomía observacional. Todo ello tratando de abarcar un espacio de investigación pocas veces trabajado, por su universalidad y especificidad.

Finalmente, a escala universal, también se plantean una serie de propuestas para considerar en las instalaciones astronómicas; incidiendo, nuevamente, de forma más detallada, sobre el SE de la península ibérica, al tiempo que se promueven algunas

peticiones y llamadas de atención sobre nuestros recursos astronómicos; se diría que bastante poco valorados a raíz de los hallazgos logrados en la presente investigación.

Palabras clave: observatorios astronómicos, factores geográficos de distribución, factores geográficos de caracterización, cartografía temática, análisis multiescalar, astro-climatología, potencial astro-climático, nubosidad, agua precipitable, turbulencia atmosférica, seeing, contaminación lumínica, aerosoles, logística, cambio climático, península ibérica.

<u>ÍNDICE</u>

INTRODUCCIÓN

1	LAS GRANDES ÉPOCAS DE LA ASTRONOMÍA1
1.1	LA ANTIGÜEDAD1
1.2	EL RENACIMIENTO2
1.3	LA ERA MODERNA
1.4	GALILEO
1.5	NEWTON
1.6	LOS ALBORES DE LA ASTRONOMÍA CONTEMPORÁNEA5
1.7	EL NACIMIENTO DE LA ASTROFÍSICA6
2	EL DESARROLLO DE LA ASTRONOMÍA EN AMÉRICA7
2.1	LOS GRANDES OBSERVATORIOS DEL SW DE EE. UU
2.1.1	El mecenazgo privado y la astronomía en los EE. UU8
2.2	LOS OBSERVATORIOS EN EE. UU. TRAS LA II GUERRA MUNDIAL11
3	EL DESARROLLO DE LA ASTRONOMÍA EN ESPAÑA12
3.1	EL OBSERVATORIO DE SAN FERNANDO (CÁDIZ)12
3.2	EL REAL OBSERVATORIO DE MADRID12
3.3	EL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE CARTUJA13
3.4	EL OBSERVATORIO DEL EBRO (TORTOSA)15
3.5	EL OBSERVATORIO FABRA (BARCELONA)15
3.6	OBSERVATORIOS DE IZAÑA Y LA PALMA EN CANARIAS16
3.7	EL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO HISPANO ALEMÁN DE CALAR ALTO17
3.8	EL OBSERVATORIO SIERRA NEVADA (OSN)19
3.9	OTROS OBSERVATORIOS EN LA PENÍNSULA IBÉRICA20
4	EL DESARROLLO DE LA ASTRONOMÍA EN EUROPA20
4.1	EL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE PÚLKOVO (RUSIA)20

4.2	EL OBSERVATORIO DE PARIS	21
4.3	EL OBSERVATORIO REAL DE GREENWICH	23
4.4	EL OBSERVATORIO DE NIZA	24
4.5	EL OBSERVATORIO PIC DU-MIDI (PIRINEOS FRANCESES)	24
4.5.1	La fundación del observatorio (1878 – 1882)	26
4.5.2	Emile Marchand (1891 – 1914)	26
4.5.3	Camile Dauzère (1920 – 1937)	26
4.5.4	Jules Baillaud (937 – 1947)	26
4.5.5	Jean Rosch (1947 – 1981)	27
4.6	OBSERVATORIOS DE ZELENCHUSKAYA Y TERSKOL (RUSIA)	27
4.7	OBSERVATORIO DE ARCETRI (FLORENCIA)	28
5	LA OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA EN LA ACTUALIDAD	28
5.1	LA ERA DIGITAL EN ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA	28
5.2	RETOS ACTUALES EN INSTRUMENTACIÓN ASTRONÓMICA	33
5.2.1	El gran telescopio E- ELT. (Cerro Armazones, Chile)	34
5.2.2	El Telescopio Vera Rubin	36
5.3	MARTE ENTONCES Y AHORA	37
	BIBLIOGRAFÍA	39

CAPÍTULO I. NUBOSIDAD. "CLOUD COVER" SOBRE ÁREAS DE INTERÉS ASTRONÓMICO A ESCALA PLANETARIA

1	OBJETIVOS	.44
2	FUENTES Y METODOLOGÍA	.44
3	ESTADO DE LA CUESTIÓN	.49
3.1	TÉCNICAS DE ANÁLISIS	.49
3.2	RESULTADOS DE CLOUD COVER PARA DIVERSAS REGIONES	.50

3.2.1	La zona del SW EE. UU y México50
3.2.2	Europa, península ibérica y Mediterráneo51
3.2.3	América del Sur52
3.2.4	Regiones polares52
3.2.5	Observatorios en lugares exóticos53
3.3	INSTRUMENTAL ESPECÍFICO PARA LA MEDIDA DE NUBOSIDAD SOBRE OBSERVATORIOS
3.4	CALIBRACIONES, MASCARAS DE NUBOSIDAD Y MODELIZACIONES PARA SATÉLITES METEOROLÓGICOS53
3.5	NUBOSIDAD, CLEAR SKY Y TCC SELECCIÓN DE OBSERVATORIOS55
3.6	NUBOSIDAD ESTIMADA (FRACCIÓN DEL TCC) EN ÁREAS DE INTERÉS ASTRONÓMICO DE TODO EL MUNDO CON OBSERVATORIOS RELEVANTES
4	ESCALAS ESPACIO-TEMPORALES
5	RESULTADOS61
5.1	EL TCC EN CONTEXTO UNIVERSAL Y REGIONAL61
5.2	EL TCC DEL DESIERTO DE ATACAMA DE CHILE CON LOS GRANDES OBSERVATORIOS AUSTRALES
5.3	EL TCC EN UN CONTEXTO EUROPEO-PENÍNSULA IBÉRICA MEDITERRÁNEO63
5.4	TCC TENDENCIAL SOBRE EUROPA, ORIENTE MEDIO Y NORTE DE ÁFRICA
5.5	TCC PROMEDIO SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA64
5.6	TCC TENDENCIAL SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA65
5.7	EL DESPLAZAMIENTO DE LA LÍNEA DE TCC DE 0.4 EN UN SIGLO66
5.8	EL DESPLAZAMIENTO DE LA LÍNEA DE TCC DE 0.4 ENTRE LA DECADA 1980/1989 Y LA DECADA 2010/2019 (MEDITERRÁNEO W)68
5.9	
	EL DESPLAZAMIENTO DE LA LÍNEA DE TCC DE 0.4 ENTRE LA DECADA 1980/1989 Y LA DECADA 2010/2019 (SW EE. UU)

5.11	EL DESPLAZAMIENTO DE LA LÍNEA DE TCC DE 0.4 ENTRE LA DECADA 1980/1989 Y LA DECADA 2010/2019 (ASIA CENTRAL)
5.12	EL DESPLAZAMIENTO DE LA LÍNEA DE TCC DE 0.4 ENTRE LA DECADA 1980/1989 Y LA DECADA 2010/2019 (ISLAS CANARIAS)
5.13	EL DESPLAZAMIENTO DE LA LÍNEA DE TCC DE 0.4 ENTRE LA DECADA 1980/1989 Y LA DECADA 2010/2019 (ISLAS HAWÁI)71
6	ESTUDIO DE CASOS
6.1	LOS OBSERVATORIOS DEL SE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA72
6.2	LAS SERIES DE NUBOSIDAD DE CALAR ALTO74
6.3	AMPLIACIÓN DEL EXTREMO SE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA79
7	DISCUSIÓN
7.1.	CONTRASTE ENTRE LA LITERATURA Y NUESTROS RESULTADOS81
8	CONCLUSIONES
8.1	HECHOS RELEVANTES ENCONTRADOS EN ESTE TRABAJO85
	BIBLIOGRAFÍA

CAPITULO II. AEROSOLES Y EXTINCIÓN ATMOSFÉRICA. INCIDENCIA SOBRE OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS A NIVEL PLANETARIO Y ESTUDIO DE CASOS EN LA PENÍNSULA IBÉRICA.

1	OBJETIVOS	91
2	INTRODUCCIÓN	92
2.1	CONCEPTOS GENERALES	92
3	FUENTES Y METODOLOGÍA	94
3.1	ESPECIFICACIONES SOBRE FUENTES DE AEROSOLES	94
3.2	PROCEDENCIA DE FUENTES PARA LOS MAPAS Y TABLAS	96
3.3	INSTRUMENTAL Y MÉTODOS DE MEDIDA DEL ESPESOR ÓPTICO (AOD)	96
3.3.1	Fotómetros solares "Sunphotometers"	96
3.3.2	LIDAR	97

3.3.3	AOD con cámaras CCD	98
4	ESTADO DE LA CUESTIÓN	99
4.1	REVISIÓN HISTÓRICO-BIBLIOGRÁFICA	99
5	ESTUDIO DE CASOS	.110
5.1	MAPAS PROMEDIO Y DIFERENCIALES DE AEROSOLES Y EXTINCIÓN (AOD) SOBRE REGIONES DE INTERÉS ASTRONÓMICO	.110
5.2	LOS AEROSOLES A ESCALA REGIONAL Y PLANETARIA SEGÚN MERRA2	.110
5.3	MAPAS REGIONALES DE AOD PROMEDIO DE 40 AÑOS (1981-2020)	.112
5.4	EL CASO DEL MACIZO DEL TIBESTI (SAHARA CENTRAL), SEGÚN MERRA2 Y MODIS/TERRA	.113
5.5	EL CASO DEL SW DE EE. UU. Y BAJA CALIFORNIA (MÉXICO)	.114
5.6	EL CASO DE AMÉRICA DEL SUR	.115
5.7	LA REGIÓN DEL TÍBET	.116
5.8	TABLAS RESUMEN DE RESULTADOS PARA AOD	.117
5.9	COMPARATIVA AOD ENTRE LUGARES CON OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS DE TODO EL MUNDO	.121
5.10	EL CASO DEL AOD EN TRES OBSERVATORIOS EN EL SE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA	122
5.11	AEROSOLES MODIS TERRA (PROMEDIO AOD 2018-2020)	.123
5.12.	AEROSOLES DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO	.124
5.13	LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN CUMBRE VIEJA (ISLA DE LA PALMA) EN 2021	.124
5.14	EL CASO DE LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN CUMBRE VIEJA (ISLA DE LA	
	PALMA, CANARIAS, SEGÚN AERONET)	.125
5.15	AOD SOBRE SIERRA NEVADA (DEDUCIDO CON LA BASE MERRA2)	.126
6	UMBRALES, AJUSTES Y CALIBRACIONES	.127
6.1	AJUSTE DE VALORES DE AOD DE OBSERVATORIOS DEDUCIDO DE L DATOS ERA5 (COPERNICUS) Y DEL AOD DEDUCIDO DE LOS DATOS D AERONET. (NASA)	.OS DE .127
7	DISCUSIÓN	.130
8	A MODO DE EPÍLOGO	.135
	BIBLIOGRAFÍA	.137

APÉNDICE A	141
APÉNDICE B	

CAPITULO III. AGUA PRECIPITABLE (PWV)

1	OBJETIVOS	147
2	INTRODUCCIÓN	147
3	FUENTES Y METODOLOGÍA	149
3.1	ORGANIGRAMA DE FLUJO DEL CAPITULO PWV. E INVERSIÓN	149
3.2	FUENTES DOCUMENTALES	150
3.3	BASES DE DATOS DIGITALES Y DE IMÁGENES SATELITALES	151
4	REVISIÓN HISTÓRICO-GEOGRÁFICA	153
4.1	LOS PRIMEROS TIEMPOS	153
4.2	LOS ESTUDIOS DE PWV. DESDE 1980	156
4.2.1	Agua precipitable en latitudes templadas	156
4.2.2	Los lugares antárticos y árticos	161
4.2.3	La región del norte de Chile y Argentina	164
4.2.4	Los observatorios de radio submilimétrico	167
4.2.5	PWV en China y la meseta del Tíbet	172
4.2.6	Modelizaciones y PWV	173
5.	ESTUDIO DE CASOS (PWV)	173
5.1	NUESTROS RESULTADOS	173
5.2	LA DEPENDENCIA DEL PWV. CON LA LATITUD DEL OBSERVATORIO.	175
5.3	LOS LUGARES PARA OBSERVACIÓN SUBMILIMÉTRICA	176
5.4	EL CASO DE SIERRA NEVADA (ESPAÑA)	177
5.5	COMPARATIVA DEL PWV. ENTRE SIERRA NEVADA Y CALAR ALTO	180

5.6	EL PWV. PROMEDIO SOBRE EL SE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA:
	PROMEDIOS DE ENERO Y JULIO (1960-2019)181
5.7	COMPARATIVA DE PWV. EN MM. ENTRE PICO VELETA (SIERRA NEVADA,
	ESPAÑA) Y LOS MEJORES LUGARES POSIBLES DEL NORTE DE CHILE Y
	ARGENTINA182
5.8	ESTIMACIONES PROMEDIO ANUALES DEL PWV. ENTRE DIVERSOS
	LUGARES DEL SE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA184
5.9.	MAPA TÍPICO DE LA ZONA SIERRA NEVADA Y FILABRES AL SE DE LA
	PENÍNSULA IBÉRICA. EL PWV. VIENE EXPRESADO EN CM184
5.10	LA ALTITUD DEL OBSERVATORIO DETERMINA SU CONTENIDO
	DE PWV
5.11	LA REGIÓN DE LA PENÍNSULA IBÉRICA, LOS ALPES, NORTE DE ÁFRICA Y CANARIAS COMO CONJUNTO FRENTE AL PWV. EN SUPERFICIE
5.12	LA REGIÓN ASTRONÓMICA DEL NORTE DE CHILE-ARGENTINA Y EL PWV
5.13.	LA REGIÓN DEL TÍBET
5.14.	LAS REGIONES POLARES Y EL PWV197
5.14.1	Dependencia del PWV. con la altitud para las regiones polares198
5.15	EL CASO DE MAUNA KEA Y MAUNA LOA (HAWÁI) PARA EL PWV198
6	DISCUSIÓN
7	CONCLUSIONES
	BIBLIOGRAFÍA
APÉN	DICE A
APÉNI	DICE B

CAPITULO IV. CONTAMINACIÓN LUMÍNICA

1	OBJETIVOS	216
2	INTRODUCCIÓN	216
3	FUENTES Y METODOLOGÍA	218
4	PERSPECTIVA HISTÓRICO DOCUMENTAL	

4.1	CONCEPTOS BÁSICOS	219
4.1.1	El brillo del cielo por causas naturales	220
4.1.2	El brillo de fondo cielo antropogénico	223
4.2	EL MODELO DE FALCHI ET AL (2016)	237
4.2.1	ASPECTOS SOCIOLÓGICOS ECONÓMICOS Y LEGISLATIVOS SOE CONTAMINACIÓN LUMÍNICA	3RE 240
5	RESULTADOS	242
5.1	MAPAS ZONALES DE OBSERVATORIOS RELEVANTES: EL CASO DEL	
	SW DE EE. UU	242
5.2	EL NORTE DE CHILE-ARGENTINA	243
5.3	EL TÍBET ENTRE INDIA Y CHINA	244
5.4	LA PENÍNSULA IBÉRICA	245
5.5	EL BRILLO DE CIELO NOCTURNO SOBRE ANDALUCÍA	246
5.6	INCREMENTO MAGNITUDES DE BRILLO (ZENIT) EN EL SE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA	247
5.7	BRILLO DE FONDO DE CIELO TÍPICO SOBRE UNA ZONA SUBURBANA	
	DE LA CIUDAD GRANADA	248
5.8	ESPECTROSCOPIA DEL CIELO DESDE EL PARQUE NATURAL SIERRA	
	HUÉTOR (VIZNAR)	249
5.9	EL BRILLO FONDO CIELO TÍPICO EN EL OBSERVATORIO DE LA	251
5.10	EL BRILLO FONDO CIELO TÍPICO EN EL OBSERVATORIO DE CALAR ALTO	252
5.11	EL BRILLO DE FONDO DE CIELO TÍPICO SOBRE SIERRA NEVA	ADA 252
5.12	FOTOGRAFÍAS NOCTURNAS DEL CIELO DE SIERRA NEVADA VISTAS	253
5.13	UN MAPA DE MEDIDAS REALES DE BRILLO DEL CIELO EFECTUADAS CON FOTÓMETRO SQM SOBRE GRANADA Y ALREDEDORES	255
6	DISCUSIÓN	255
7	CONCLUSIONES	257
	BIBLIOGRAFÍA	258

APÉNDICE A	
APÉNDICE B	
APÉNDICE C	
APÉNDICE D	

CAPITULO V. TURBULENCIA ATMOSFÉRICA

1	OBJETIVOS	276
2	INTRODUCCIÓN	276
3	APROXIMACIÓN HISTÓRICO-GEOGRÁFICA	277
3.1	LOS INICIOS	277
3.2	CONTEXTO ESQUEMÁTICO DEL FENÓMENO DE TURBULENCIA	281
3.3	LA REGIÓN DEL SW DE EE. UU	283
3.4	SEEING EN MAUNA KEA (HAWAI)	285
3.5	LUGARES ASIÁTICOS Y AFRICANOS	286
3.6	SEEING EN LA ZONA CANARIAS Y PENÍNSULA IBÉRICA	288
3.7	SEEING EN LUGARES ÁRTICOS Y ANTÁRTICOS	291
3.8	LA REGIÓN DEL NORTE DE CHILE	294
3.9	AUTORES TEÓRICOS DEL SEEING Y SUS MODELIZACIONES	297
4	FUENTES Y METODOLOGÍA	301
4.1	ORGANIGRAMA DE FLUJO DEL CAPITULO "TURBULENCIA"	301
4.2	EL DRON UNA NOVEDOSA TÉCNICA DE OBSERVATORIO MICROTE EN LA CAPA LIMITE	ERMAL 303
4.3	SENSOR MICROTERMAL	305
4.4	NUESTRO PROCESO DE CALIBRADO	306
4.5	LA TORRE DE SENSORES MICROTERMALES DEL OBSERVATORIO SAGRA	308
5	RESULTADOS Y ESTUDIO DE CASOS	309
5.1	NUESTRO TRABAJO DE INVESTIGACIÓN SOBRE TURBULENC MARCO GEOGRÁFICO	IA: EL 309

6	DISCUSIÓN
5.18	LA PARTICULAR OROGRAFÍA DE LA SIERRA DE LA SAGRA
5.17.1	Conclusión respecto a las medidas del dron y a la contribución al FWHM de la capa entre 3 y 12 m. Torre microtermal. (Época NTC 10 K.)
5.17	CALIBRACIÓN SENSORES TIPO NTC DE 10 K
5.16	CÁLCULOS DE LOS DATOS DE LA TORRE MICROTERMAL DE LOMA MONTILLA (ÉPOCA NTC 10 K.)
5.15	CONCLUSIÓN A LAS MEDIDAS MICROTERMALES DE LA TORRE DE LA LOMA MONTILLA DE LA ÉPOCA PT 1000
5.14	VALORES DE SIGMA CON EL TIEMPO DE INTEGRACIÓN A 3 Y 12 M. EN LOMA MONTILLA
5.13	VALORES DE SIGMA DE AGOSTO – DICIEMBRE 2022 EN LOMA MONTILLA (TODA NOCHE)
5.12	CÁLCULOS DE LOS DATOS DE LA TORRE MICROTERMAL DEL OBSERVATORIO SAGRA (LOMA MONTILLA)
5.11	FRECUENCIAS RELATIVAS DEL RMS MICROTERMAL, POR NUMERO DECAPAS AFECTAS Y PARA LOS DISTINTOS OBSERVATORIOS DE NUESTRO ESTUDIO DE CASOS
5.10.1	Primeras estimaciones del FWHM en nuestra zona de estudio
5.10	LOS PROYECTOS EN CURSO ACTUALES SOBRE MEDIDAS DE SEEING EN EL OBSERVATORIO DE LA SAGRA Y CALAR ALTO. RESULTADOS325
5.9	EL OBSERVATORIO DE LA HITA (TOLEDO). UN CASO A BAJA ALTITUD EN LA MANCHA
5.8	EL CASO DE INAZARES (MURCIA). UNA APROXIMACIÓN A LAS CONDICIONES A LUGARES DE INTERÉS ASTRONÓMICO DE MEDIANA ALTITUD
5.7	MEDIDAS VISUALES EN LA CIMA DEL PICO DE La SAGRA
5.6.1	Posibles explicaciones
5.6	EL SEEING EN EL OBSERVATORIO SIERRA NEVADA (OSN) Y CALAR ALTO
5.5	CORRELACIÓN DEL SEEING DIMM CALAR ALTO FRENTE A MEDIDAS MICROTERMALES EFECTUADAS MEDIANTE DRONES
5.4	ORAS NOCHE Y NUMERO CASOS DE MÁXIMO SEEING
5.3	SEEING DIMM SOBRE CALAR ALTO (CAHA) ENTRE 2001-2023316
5.2	CORRELACIÓN ENTRE LA ALTITUD DEL OBSERVATORIO Y EL SEEING (MEDIANA TOMADA DE NUESTRO ESTUDIO DE CASOS Y DE LA LITERATURA)

7	CONCLUSIONES	346
	BIBLIOGRAFÍA	347
APÉN	DICE A	
APÉNI	DICE B	374
APÉN	DICE C	
APÉN	DICE D	
APÉN	DICE E	
APÉN	DICE F	
APÉN	DICE G	

CAPITULO VI. LOGÍSTICA

1	OBJETIVOS	
2	INTRODUCCIÓN	
3	VISIÓN HISTÓRICA DE LOS CONDICIONANTES LOGÍSTICOS	
4	FUENTES Y METODOLOGÍA	
4.1	FUENTES DE DATOS PARA ASPECTOS SOBRE PRUEBA DE SIT TESTING" Y CLIMATOLOGÍA	IOS "SITE 391
4.2	LA DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS OBSERVATORIOS ESTUDIO	DE ESTE
4.2.1	La estadística de la literatura consultada, por décadas	
5 F	RESULTADOS DE NUESTRO ESTUDIO	
5.1	DESCRIPCIÓN DE EXPEDICIONES ASTRONÓMICAS	
5.2	LOCALIZACIÓN DE OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS	
5.2.1	Hasta la época de la construcción de Monte Palomar, en California. EE	EUU397
5.2.2	El área SW de EE. UU	
5.2.3	El Caso especial de Mauna Kea (Hawái)	
5.2.4	El Norte de Chile	
5.2.5	El fallido OWL	
5.2.6	La localización de las Islas Canarias	

5.2.7	El caso de China400		
5.2.8	El caso de la Antártida y las regiones polares400		
5.3	GRANDES NÚCLEOS ASTRONÓMICOS402		
5.4	ACCESOS, ENERGÍA, COMUNICACIONES RIESGOS GEOFÍSICOS Y CLIMÁTICOS		
5.4.1	Hawái 409		
5.4.2	Norte de Chile. El medio árido óptimo para observación astronómica409		
5.4.3	Canarias, España y Europa410		
5.4.5	La Antártida411		
5.4.6	Oriente Medio, India, China413		
5.4.7	El caso de la red CTA414		
5.5	OBSERVATORIOS EXÓTICOS, GLOBOS, AVIONES BARCOS Y DRONES. 414		
5.6	SALUD SEGURIDAD Y SERVICIOS PERSONALES417		
5.7	RELACIONES CULTURALES, ACUERDOS INTERNACIONALES Y		
	DIVULGACIÓN419		
6	DISCUSIÓN		
7	CONCLUSIONES		
	BIBLIOGRAFÍA		
APÉN	APÉNDICE A		

CAPITULO VII. CAMBIO CLIMÁTICO Y OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS

1	OBJETIVOS	435
2	INTRODUCCIÓN	436
2.1	NUESTRA MODESTA APORTACIÓN A UN PROBLEMA COMPLEJO	438
3	FUENTES Y METODOLOGÍA	438
4	UN BREVE RECORRIDO HISTÓRICO GEOGRÁFICO	440
4.1	LOS PRECURSORES	440

4.2	TRABAJOS RECIENTES Y EFECTOS ANTROPOGÉNICOS441
4.3	MODELIZACIONES CLIMÁTICAS
4.4	LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE ORIGEN NATURAL
4.5	ESTUDIOS SOBRE RADIACIÓN SOLAR447
5	ANÁLISIS REGIONALES Y LOCALES EN EL ENTORNO DE LOS OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS MAS IMPORTANTES448
5.1	CAMBIOS DETECTADOS EN TEMPERATURA A PARTIR DE DATOS ERA 5
5.2	LA REGIÓN DEL MEDITERRÁNEO Y NORTE DE ÁFRICA450
5.3	LA REGIÓN DEL NORTE CHILE-ARGENTINA451
5.4	LA REGIÓN DEL SW DE EE. UU452
5.5	LA REGIÓN DEL TÍBET453
5.6	OBSERVATORIO DE CALAR ALTO. (TEMPERATURAS MEDIAS)454
5.7	LA SERIE DE PRECIPITACIÓN ANUAL DEL OBSERVATORIO DE CALAR ALTO EN EL PERIODO 1978-2022455
5.8	OBSERVATORIO DE IZAÑA (TENERIFE, ADYACENTE AL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DEL TEIDE. EVOLUCIÓN SECULAR DE LA TEMPERATURA MEDIA456
5.9	PROMEDIOS DE TEMPERATURA POR DÉCADAS SOBRE TRES CORDILLERAS EN EL FLANCO ATLÁNTICO NOR-ORIENTAL CON OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS457
5.10	PROMEDIOS DE TEMPERATURA POR DÉCADAS SOBRE TRES IMPORTANTES OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS. (KITT-PEAK, ARIZONA). (PARANAL, CHILE) Y ALI (TÍBET CHINO)458
5.11	EVOLUCIÓN DE LAS TEMPERATURAS MEDIAS EN LOS
	OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS MUNDIALES DE PRIMER ORDEN
6	BREVE DISCUSIÓN
7	CONCLUSIONES
	BIBLIOGRAFÍA

CAPITULO VIII. PROPUESTAS DE FUTURO

1	OBJETIVOS
2	INTRODUCCIÓN
2.1	UNA SELECCIÓN DE OBJETIVOS INÉDITOS SOBRE OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS467
3	FUENTES Y METODOLOGÍA
4	RESULTADOS. REGIONES DE INTERÉS ASTRONÓMICO CON LUGARES POTENCIALMENTE SUPERIORES PARA NUEVOS OBSERVATORIOS469
4.1	LA CORDILLERA DE LOS VOLCANES DE CHILE-ARGENTINA469
4.2	ALGUNAS PARTICULARIDADES DE LA ZONA DE LOS VOLCANES ENTRE CHILE-ARGENTINA
4.3	LA ANTÁRTIDA COMO ULTIMO RECURSO PARA ASTRONOMÍA
	INFRARROJA474
4.3.1	La cadena de volcanes de Marie Byrd474
4.4	CARACTERÍSTICAS ASTROCLIMATICAS EN LA ANTÁRTIDA478
4.6	CHINA EL TÍBET Y MONGOLIA
4.7	AGUA PRECIPITABLE Y NUBOSIDAD SOBRE EL TÍBET482
4.8	EL TOTAL CLOUD COVER SOBRE LA MESETA DEL TÍBET483
4.9	UNA VISIÓN PANORÁMICA DE UNO DE LOS LUGARES PARADIGMÁTICOS PROPUESTOS (MUZTAG ATA)485
4.10	ÁFRICA: EL MACIZO DEL TIBESTI
4.10.1	El clima del macizo del Tibesti (Emy Kousi)486
4.11	UNA COMPARATIVA DE ÍNDICE AOD (POLVO EN SUSPENSIÓN) SOBRE 4 ENTORNOS DESÉRTICOS Y SUBDESÉRTICOS491
5	UN ESTUDIO DE CASOS EN OBSERVATORIOS DEL SE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA
5.1	EL CASO DE CALAR ALTO (ALMERÍA). PROPUESTA DE UNA POSIBLE EXPANSIÓN492
5.2	EL CASO DE SIERRA NEVADA. PROPUESTAS DE NUEVAS UBICACIONES
5.3	EL CASO DE LA EXPANSIÓN DEL OBSERVATORIO DE LA SAGRA495

5.4	UN CASO OLVIDADO CON BUENAS CARACTERÍSTICAS ASTRONÓMICA	
	SIERRA DE GÁDOR (ALMERÍA)	.496
6	DISCUSIÓN	.499
7	CONCLUSIONES	500
	BIBLIOGRAFÍA	.501

CAPITULO IX. SÍNTESIS FINAL DE LA TESIS

1	DE SINOPSIS HISTÓRICA	502
2	DE NUBOSIDAD	503
3	DE AEROSOLES Y EXTINCIÓN ATMOSFÉRICA	504
4	DE AGUA PRECIPITABLE (PWV) E INVERSIÓN	505
5	DE CONTAMINACIÓN LUMÍNICA	507
6	DE TURBULENCIA	509
7		511
8	DE CAMBIO CLIMÁTICO	512
9	DE PROPUESTAS DE FUTURO	513
10	RECOMENDACIONES	514
10.1 10.2	Sobre la idea de un Parque astronómico en el SE de Andalucía Sobre la idea de un gran telescopio (16 – 30 m. apertura) en la	514
	península ibérica	515
	AGRADECIMIENTOS	516

INTRODUCCIÓN

1 LAS GRANDES ÉPOCAS DE LA ASTRONOMÍA

1.1 LA ANTIGÜEDAD

Turner ofreció en 1929 una disertación sobre quienes serían "los más antiguos astrónomos". Tradicionalmente, se ha considerado a los griegos y los egipcios como los primeros astrónomos de la antigüedad, sobre todo si seguimos a Platón y Aristóteles. Con todo, conviene subrayar que este último olvidó dar los nombres de astrónomos que le precedieron, como los Caldeos (Babilonia, antes del imperio de los Persas), cometiéndose, desde entonces, una injusticia acerca de los primeros orígenes de la observación astronómica, en especial en lo referente a los eclipses de Sol y Luna, puesto que se ha documentado que estos eclipses se observaron durante siglos.

Estos serían los primeros astrónomos, a pesar de las connotaciones astrológicas y supersticiosas que conllevaban sus vaticinios. Aunque Turner no cita la época en que vivieron estos primeros astrónomos, es de suponer que se refiere a la época de esplendor de los Caldeos, unos 1500-1100 años a.C., muy anterior a esplendor de la Grecia clásica, ya en el siglo IV a.C.

Una breve síntesis histórica sobre los acontecimientos de carácter astronómico fue expuesta por Crawford en 1917. Aborda el desarrollo de la astronomía, desde una perspectiva observacional, hasta los inicios del siglo XX, señalando grandes épocas, en las que la astronomía avanzó de manera considerable.

Vemos como en la antigüedad las concepciones del universo eran tan variadas como las civilizaciones. Sobre el siglo VI a.C. Pitágoras y sus seguidores enseñaron que la Tierra era esférica, lo cual supuso un avance, para la época que corría. Esta idea no sería confirmada hasta dos milenios después, con la circunnavegación del globo realizada por la expedición de Magallanes en el siglo XVI. La primera determinación de la distancia de la Tierra al Sol fue hecha por Aristarco, siglo III a.C., aunque inexacta, supuso un gran avance. No sería hasta el Siglo XVII en que Cassini estableció la verdadera distancia del Sol. A Eratóstenes, siglo II a.C., se debe la primera medición del tamaño de la Tierra. Su método consistía en ver si en una fecha dada, a mediodía, en Egipto, el Sol alcanzaba el fondo de dos pozos, separados cientos de kilómetros en latitud. El mayor astrónomo de la época fue sin duda Hiparco, en el Siglo II a.C., que inventó la trigonometría, y confeccionó un catálogo de estrellas en orden a su brillo. Introdujo, además, el razonamiento o "método científico" a las observaciones y la

investigación. En el siglo II D.C., Ptolomeo confecciono el "Almagesto", el primer gran catálogo astronómico. El almagesto concebía el sistema solar de forma errónea, situando a la Tierra en el centro, siguiendo las teorías de Aristóteles. Esta concepción hará que, durante catorce siglos, la astronomía entrase en un periodo a veces llamado "La Edad Obscura"; sin duda debido al peso de Aristóteles en la filosofía medieval. Su influencia fue tan grande que nadie se atrevió a cuestionar ninguno de sus dictados. Aunque fue sin duda un gran filósofo, como científico podemos indicar que fue muy pobre, pues no se preocupó de comprobar si sus asertos o postulados eran reales.

1.2 EL RENACIMIENTO

Con el Renacimiento llegó la siguiente época importante en el desarrollo de la astronomía. A finales del siglo XVI Copérnico (1566) escribió el segundo gran clásico astronómico, denominado *"De Revolutionibus Orbium Coelestium"*. En este trabajo Copérnico discutió los pros y los contras de las teorías de la disposición del sistema solar y llegó a la conclusión de que la teoría heliocéntrica era la verdadera, es decir, que el Sol es el centro del sistema solar y que todos los planetas, de los cuales la Tierra es uno más, giraban en torno a él.

Como se puede imaginar fácilmente, esta doctrina no encontró una aceptación inmediata. Durante muchos siglos, la vieja idea geocéntrica de Aristóteles había tenido gran influencia y no podía ser derrocada tan fácilmente. Fue aproximadamente medio siglo más tarde con las observaciones y enseñanzas de Galileo cuando se dio el empujón final para derrocar la teoría geocéntrica.

1.3 LA ERA MODERNA

Desde mediados del siglo XVI hasta mediados del XVII encontramos tres nombres de los que hacen época en astronomía, Tycho Brahé, Kepler y Galileo. Estos dos últimos fueron contemporáneos inmediatamente después de Tycho. A partir de este momento encontramos un renacimiento en el trabajo observacional. Esto se llevó a cabo en Cassel, donde encontramos el primer observatorio construido con una cúpula giratoria y el primer uso de un reloj para registrar observaciones de tiempo. Pero el principal trabajo observacional fue realizado por Tycho en Hveen. Reconoció la necesidad de unas posiciones más precisas del Sol, la Luna, los planetas y las estrellas de las que estaban disponibles. Tycho, por lo tanto, erigió un elaborado observatorio, y lo equipó con los instrumentos, aún sin telescopios tan precisos como fuera posible. Aunque no hizo grandes descubrimientos, acumuló un almacén de observaciones muy precisas, especialmente de los planetas, que pronto fueron destinados a desempeñar un papel muy importante en el desarrollo de la astronomía. Las valiosas observaciones de Tycho afortunadamente cayeron en manos de Kepler, quién las extrajo con notable paciencia y perseverancia. Hasta este momento las posiciones de los planetas habían sido predichas según la suposición en la que se movían (en círculos o combinación de círculos).

Kepler pronto fue capaz de mostrar, gracias a las observaciones precisas realizadas por Tycho, que los planetas no podían moverse de tal manera y, por fin, descubrió que su movimiento podía ser representado con precisión al describir la elipse: verdadero camino de la Tierra respecto al Sol, situado este último en uno de los focos de la elipse. Tenemos aquí la primera desviación de la vieja idea del movimiento en un círculo.

Entonces Kepler razonó que, como un planeta, está a diferentes distancias del Sol, debido a moverse en una elipse, probablemente se movería con una velocidad variable. Finalmente dedujo su segunda ley, a saber, que un planeta se mueve de tal manera que la línea que une el Sol y el planeta describe áreas iguales en intervalos iguales de tiempo. Como los diversos planetas están a diferentes distancias del Sol probablemente hay alguna relación entre las distancias y el tiempo de revolución de los diversos planetas sobre el Sol. Si un planeta está dos veces más lejos del Sol que otro, ¿tomará el doble de tiempo ir una vez completamente alrededor del Sol? Pronto vio que esta relación tan simple era cierta. Así que, finalmente, llegó a su "Ley Armónica".

Según parece, Kepler era tan sistemático que eligió a su segunda esposa después de las investigaciones más concienzudas. Puso en una serie de cartas los méritos de cada una, de una docena de doncellas, y solo después de estudiarlas cuidadosamente tomó su decisión.

1.4 GALILEO

Mientras Kepler estaba descubriendo sus hermosas leyes del movimiento planetario, Galileo en Italia estaba haciendo un trabajo que en sí mismo marcó una época. Cuando dirigió el telescopio a los cielos, por primera vez, se inició un nuevo campo de investigación. Como se mencionó anteriormente, el dictado de Aristóteles había tenido influencia sobre el pensamiento del mundo durante unos quince siglos. Entre otras cosas, había dicho que un cuerpo pesado grande caería más rápido que un pequeño cuerpo. Galileo, verdadero científico como era, no aceptaría la palabra de nadie, ni siquiera de Aristóteles, cuando estaba en su poder probar o refutar la declaración. Así que, montando a la cima de la Torre Inclinada de Pisa, antes de una

gran reunión de personas interesadas, dejó caer desde esta altura simultáneamente dos cuerpos, uno grande y pesado y otro pequeño. Según Aristóteles, el cuerpo pesado debería haber llegado al suelo mucho antes que el ligero. Pero la gente asombrada vio a los dos caer uno al lado del otro, y aterrizar en la base de la Torre prácticamente en el mismo instante. Este fue uno de los experimentos menos intuitivos, que el mundo de su época, podía imaginar. Con la caída de esos cuerpos cayó también la influencia de Aristóteles en asuntos científicos.

Uno de los episodios más conocidos respecto a las observaciones y escritos de Galileo Galilei es el del examen o interrogatorio inquisitorial al que fue sometido en Roma en el año de 1633. Galileo fue obligado a abjurar *(ABJURATIO GALILEI)* ante la Santa Inquisición, acerca de sus ideas y escritos, donde se indicaba que el Sol era el centro de la vida y sobre el cual giraban los planetas, inclusive la Tierra. Esto contradecía frontalmente la tesis de la Iglesia Católica, apoyada en las Sagradas escrituras y la concepción aristotélica de la disposición de los cuerpos celestes, donde la Tierra era el centro del cosmos. De resultas de aquello, sus libros fueron declarados herejes y fue recluido el resto de su vida en arresto domiciliario. Dado que Galileo gozaba de un gran prestigio, no solo en Italia sino en Europa, esto seguramente le eximio de mayores castigos, conteniendo a una iglesia contrariada.

1.5 NEWTON

Galileo murió en 1642, y Newton nació en 1643. El intervalo entre la muerte de Galileo y la época marcada por las actividades de Newton fue uno de progreso constante. Los instrumentos se mejoraron, y entraron en un uso más general; el micrómetro fue inventado. Se hicieron mediciones precisas de longitudes de arcos en diferentes latitudes. Entre 1663-1672 Isaac Newton y James Gregory desarrollaron los primeros telescopios reflectores a base de espejos pulidos de metal, al principio de poca potencia, pero de mayor luminosidad que el telescopio de Galileo. William Herschel consiguió aumentar el tamaño de dichos espejos reflectores hasta poder llegar descubrir el planeta Urano y la visualización de numerosas galaxias, consideradas entonces algún tipo de nube. El inventor del telescopio reflector con un gran espejo de vidrio pulido recubierto de una película de plata fue León Foucault en 1864. El mismo llegó a construir un espejo de 80 cm de diámetro para el observatorio de Marsella. Otros acontecimientos importantes en este momento fueron el descubrimiento de la velocidad finita de la luz por Römer, trabajando junto a Cassini, en el Observatorio de París, así como la evaluación de Cassini relativa a la distancia del Sol respecto de la Tierra, que corresponde a una distancia de 78000000 millas.

El nombre de Newton sugiere inmediatamente su ley de Gravitación Universal, que dice: que cada partícula en el universo atrae a todas las demás partículas del mismo con una fuerza proporcional al producto de las masas de las dos partículas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas. A Newton se le llama correctamente el "Padre de la Astronomía Gravitacional". Kepler había mostrado en sus tres leyes la forma en que los planetas se mueven, pero no tenía la menor idea de por qué se mueven de esta manera. Además de fundar la Astronomía Gravitacional, Newton también puede ser acreditado como un astrónomo moderno, ya que realizó los primeros descubrimientos astrofísicos cuando describió el carácter compuesto de la luz blanca, que cuando se hace pasar a través de un prisma, se divide en sus longitudes de onda constituyentes, y se extiende en una banda de color que llamamos el "espectro".

1.6 LOS ALBORES DE LA ASTRONOMÍA CONTEMPORÁNEA

A partir de la época de Newton encontramos que la astronomía se desarrolla tan rápidamente que su progreso ahora debe ser rastreado, no en su conjunto, sino a lo largo de sus diversas ramas. Durante el siglo XVIII los principales avances observacionales fueron realizados por los ingleses. Hacia el cierre del siglo XVII Flamsteed, el primer Astrónomo Real, fundó el observatorio en Greenwich. Debido a la falta de fondos su equipo instrumental era muy escaso, por lo que sus avances se restringen a poco más que hacer un catálogo de estrellas.

Los siguientes dos astrónomos Reales, Halley y Bradley, sin embargo, hicieron mucho para avanzar en la ciencia. Halley era un gran admirador de Newton. Siguiendo algunas de las líneas del trabajo de Newton, calculó los caminos de unos veinticuatro cometas. Observando que tres de ellos viajaban prácticamente por el mismo camino, separados entre sí a intervalos casi iguales, de 75 o 76 años. Halley aventuró la idea de que no se trataba de tres cometas separados, sino que eran tres apariciones del mismo cometa a unos 75 años de intervalo. Predijo, además, el regreso del cometa. Este es el primer caso de este tipo en la historia, y el cometa se llama el cometa Halley, en honor al astrónomo que predijo por primera vez su regreso.

Durante la última parte del siglo XVIII y la primera parte del XIX la astronomía observacional fue llevada a grandes metas por Sir William Herschel. Su notable trabajo fue posible gracias a los grandes instrumentos, reflectores, que construyo, culminando en su telescopio de cuarenta pies de largo (12 m.). Fue el descubridor del planeta Urano al verlo accidentalmente en 1781. Hizo muchos otros descubrimientos observacionales, pero su trabajo de desarrollo más importante fue su descubrimiento de sistemas estelares binarios y su estudio general del cielo para nebulosas y la distribución de las

estrellas. Esto lo llevó a especular sobre la forma del universo sideral y marcar el comienzo de esa maravillosa obra, que es el principal problema de los astrónomos del siglo XX. Los acontecimientos en el siglo XIX fueron tan numerosos que se volvieron casi desconcertantes cuando se intenta narrarlos, pero citemos el descubrimiento de Neptuno en 1846, que resultó de la obra de cálculo de Adams, de Inglaterra, y Leverrier, de Francia.

Aún en 1844, y con descripción de la Royal Astronomical Society, se publicó artículos como el de James Nasmyth, I. Aquí se sugería la similitud de los cráteres lunares y terrestres, y que la causa no era otra que el intenso vulcanismo de la Luna. En la actualidad esto es evidentemente erróneo, dado que el enorme grado de caracterización lunar es debido a un intenso y primitivo bombardeo de grandes asteroides sobre su superficie.

1.7 EL NACIMIENTO DE LA ASTROFÍSICA

Finalmente, en esta revisión, inspirada en Crawford (1917), llegamos al desarrollo de la astronomía moderna, o la "astrofísica". Esta se inició, cuando Sir Isaac Newton descubrió el carácter compuesto de la luz. A principios del siglo XIX Fraunhofer había observado y registrado líneas oscuras que se veían a través del espectro del Sol, las líneas que llevan su nombre. La verdadera explicación de estos fue dada a mediados de siglo por Kirchhoff, así la nueva ciencia de la astrofísica quedaba establecida. Aquí de nuevo se abrió un nuevo campo de investigación, tan grande como el iniciado por Galileo con su primitivo telescopio. La astronomía observacional progresó rápidamente en el siglo XIX, debido a las mejoras en el tamaño, número y calidad de los instrumentos, y en los métodos matemáticos deducidos para el manejo de material observacional. Los instrumentos se hicieron mucho más grandes y mejores, principalmente en América, culminando hacia finales de siglo en los grandes refractores de los Observatorios Lick y Yerkes.

En el Siglo XX el telescopio reflector supero al refractor. Tenemos reflectores cada vez más grandes, que culminan, en el reflector de 100 pulgadas en Mount Wilson. De la mano de estos avances se prosiguió con el desarrollo de los espectroscopios y la perfección de los procesos fotográficos aplicados a la astronomía.

Como es bien sabido, la construcción de grandes telescopios en nuevos observatorios continúo a lo largo del siglo XX y lo que llevamos del XXI. El crecimiento en tamaño y potencia de los telescopios ha sido progresivo, doblando su diámetro de lentes y objetivos cada 20 años aproximadamente. Actualmente ya hay en construcción telescopios de la clase 40 m. de apertura (E-ELT en el Norte de Chile).

Una extensa colección de manuscritos y obras astronómicas clásicas de alcance universal y anteriores a 1800 puede consultarse en la siguiente web: https://bvpb.mcu.es/es/consulta/resultados_navegacion.do?busq_autoridadesbib

2 EL DESARROLLO DE LA ASTRONOMÍA EN AMÉRICA

Hacia 1840 Estados Unidos apenas si contaba con un solo un observatorio astronómico. En cambio, hacia 1900 ya tenía algunos de los mejores observatorios a nivel mundial. De esta época destacan los astrónomos Hall, Barnard, PicKering y Lowell, dedicados al estudio de los cuerpos del sistema solar, con el descubrimiento de varios satélites en Marte, Júpiter y Saturno, y una intensiva observación de Marte desde el Observatorio Lowell, en Flagstaff (Arizona). Otros observatorios importantes de esta época son los de Lick, en California, y Yerkes, en las inmediaciones de Chicago. En esta época arranca también el estudio espectroscópico y fotométrico de las estrellas, analizándose el espectro y el color de los distintos astros de nuestra galaxia, con espectroscopios y fotómetros rudimentarios, situados en el foco de los telescopios. Durante todo este periodo se tenía una idea muy vaga de lo que serían las nebulosas más débiles, y habría que esperar, aún décadas, para entender las verdaderas dimensiones del universo, cosa a la que contribuyeron de forma destacada los astrónomos Hale y Hubble a comienzos del siglo XX.

Sin duda, Hale es uno de los astrónomos más relevantes de principios del siglo XX. En sus trabajos, Hale (1905) indica los requisitos instrumentales requeridos para un moderno observatorio astronómico, señalando la necesidad logística de adaptar los instrumentos usados en física y química, de laboratorio, a un entorno de montaña y próximo al telescopio. Describe someramente la logística empleada en la construcción de la cúpula y el telescopio de 100" de Mount Wilson (California), el reflector ecuatorial más grande de la época. Este fue financiado por la "Carnegie Institución", con acopio de materiales y estructuras metálicas, traídos desde miles de kilómetros de distancia.

El astrónomo Curtis diserta, en 1909, sobre la escasez de observatorios y observaciones astronómicas sobre los cielos del hemisferio sur, en comparación con los del hemisferio norte, mucho más desarrollado. En el pasado, las pocas observaciones astronómicas en los cielos australes fueron realizadas por expediciones científicas o de exploración por parte de las potencias europeas, no quedando constancia de observatorios permanentes hasta 1921. Ese año Sir Thomas Brisbane instaló un observatorio privado en New South Wales (Australia). Otros observatorios fueron construidos en la década de 1820, en Buenos Aires, Sídney y El Cabo de Buena Esperanza, así como en Santiago de Chile, en 1856. Buena parte de estos observatorios

queda reflejada en una publicación de principios del s. XX en la revista *Astronomical Society of Pacific.* Así es, Curtis, en 1909, publicó el mapa de los observatorios astronómicos de principios de s. XX inserto a continuación:



Fuente: Curtis (1909).

En dicho mapa se puede observar la correlación entre la distribución de observatorios y las zonas más densamente pobladas y desarrolladas: Europa y América del Norte.

2.1 LOS GRANDES OBSERVATORIOS DEL SW DE EE. UU.

2.1.1 El mecenazgo privado y la astronomía en los EE. UU.

Galloway, en 1912, se refiere al interés popular por la astronomía, señalando que, aunque no es esencial para el aumento del conocimiento astronómico, tiene su valor en el estímulo y la ayuda para quienes se dedican al trabajo real de estudio e investigación. El interés por la astronomía a nivel popular es muy necesario para conseguir asistencia financiera, que proporciona facilidades para el trabajo de los astrónomos. Esto se suele llevar a cabo a través de las charlas de divulgación, y por otros medios de comunicación, fomentando también las visitas a los observatorios accesibles. En la mayoría de los países es el estado el que apoya y fomenta el estudio de la astronomía, a menudo con participación privada. A este último respecto destaca el conocido caso de Lowell, con su observatorio de Marte en Arizona. Considérese que Lowell era un particular muy acaudalado y se podía permitir tales dispendios.

Podemos citar también a Slipher (1927). Nos referimos, concretamente, a una reseña suya, sobre el Observatorio Lowell, fundado en 1894 por el Dr. Percival Lowell, quien lo mantuvo como propiedad privada. Aquí Lowell dirigió sus actividades personalmente y, con excepcional habilidad, continuó el trabajo durante toda su vida. Su acción fue dotar económicamente al observatorio, expresando así, como se puede seguir realizando avances en la ciencia de la astronomía desde la esfera privada. Interesado en la ciencia desde la infancia, había estado siguiendo eventos astronómicos, particularmente el trabajo de Schiaparelli sobre el planeta Marte. En 1893 Lowell decidió continuar el estudio de Marte y los otros planetas del Sistema Solar.

Lowell pensó que es importante que el observatorio se coloque en el lugar más favorable. Se propuso buscar un clima conveniente, eligiendo un sitio elevado, para que la perfección y el poder de los instrumentos dotados con grandes lentes pudieran ser los más eficaces de la época. La elección de Flagstaff, Arizona, se produjo después de una consideración de las muchas pruebas de condiciones reales de observación en varias localidades. El Observatorio Lowell se encuentra a una milla al oeste de Flagstaff, justo en el borde oriental de una mesa volcánica a unos trescientos cincuenta pies por encima de la ciudad y a una altitud muy considerable de 2200 metros sobre el nivel del mar. Su aspecto actual puede observarse en la imagen insertada abajo.



Fuente: Google Earth.

Las primeras décadas del Lick Observatory son descritas por Aitken en 1928. Tras muchas vicisitudes, en el año 1888, se decidió construir el observatorio en el estado de California, como regalo póstumo del acaudalado Sr. Lick. El observatorio pasó en los años posteriores a la Universidad de California. El coste del observatorio y de los terrenos fue de 700000 dólares de la época; una suma considerable, y un ejemplo perfecto de cómo el mecenazgo hizo florecer la astronomía en América.

El observatorio astrofísico de Monte Palomar, y sus orígenes, fueron descritos en 1928 en el número de diciembre de *Astronomical Society of Pacific*. El mismo estaba equipado con un telescopio reflector de 200 pulgadas y muchos instrumentos auxiliares. Se vinculaba con el Instituto de Tecnología de California en Pasadena, aunque contaba con una importante participación del potente equipo de profesionales de Mount Wilson, pertenecientes a la Institución Carnegie de Washington. Este fue el proyecto más ambicioso de las primeras décadas del siglo XX, en cuanto a astronomía observacional se refiere. Más tarde, en 1938, Anderson refiere que fue una suerte que se decidiese construirlo, justo antes de la "Gran Depresión", pues hubiese encontrado, después, muchas dificultades económicas para su aprobación. De hecho, la depresión económica llegó a facilitar su construcción, merced a la baratura de los materiales y de mano de obra para la fabricación de su gran espejo de vidrio, por parte de la Corning Glass.

El descubrimiento de Plutón, desde el Observatorio Lowell, es descrita por Aitken en 1930. Este autor indica como, a pesar de figurar Harlow Shapley como director del observatorio, en la comunicación del descubrimiento el primer observador fue en realidad W. Tombaugh, un joven asistente del Observatorio Lowell. Este joven lo descubrió merced a las fotografías tomadas el 21 de enero de 1930, de acuerdo con la longitud celeste pronosticada por Lowell, mucho tiempo antes.

El observatorio solar de Mount Wilson es descrito por Seares (1917). Este Observatorio solar es uno de los once departamentos de investigación de la Institución Carnegie de Washington, y fue establecido en 1904. Sus instrumentos astronómicos están en el Monte Wilson, en el sur de California, en una colina, próxima a Pasadena, y a 5700 pies sobre el nivel del mar. El telescopio solar Snow, de factura novedosa, se aloja en los sótanos de una torre vertical de 60 pies de alto, culminada por un celostato, que envía verticalmente los rayos del Sol hasta la parte inferior. Todo ello tratando de minimizar las influencias térmicas de las capas bajas de la atmósfera, más próximas al suelo, que tienden a degradar la imagen del disco solar.

Por su parte, Adams (1954), refiriéndose a la fundación del observatorio de Mount Wilson, explica la historia de su establecimiento, perteneciente a la Institución Carnegie. Su construcción forma parte de una interesante historia del desarrollo astronómico, partiendo de una gran base, la formada por la interacción de muchas personalidades, y sobre todo por la influencia de un solo individuo de profunda perspicacia y coraje, El Dr. George E. Hale, director del Observatorio Yerkes de la Universidad de Chicago. En el momento en que se fundó la Institución Carnegie era un brillante astrónomo, de reputación internacional, que reconoció la oportunidad que le brindaba una organización dedicada, principalmente, a la investigación científica, y fue capaz de presentar a su Patronato un plan bien estructurado y muy prometedor sobre investigación astrofísica.

Otto Struve y N.U.Mayall (1939) refieren el ejemplo de la iniciativa privada en la fundación del Observatorio McDonald, de la Universidad de Texas. Está ubicado cerca de Fort Davis, y se inauguró en 1939. La historia de la fundación del observatorio es interesante, y otro ejemplo de mecenazgo. William Johnson McDonald acumuló una fortuna en el transcurso de una larga y activa carrera empresarial. Era muy aficionado a la astronomía. Observó las estrellas con gran interés, adquirió un pequeño telescopio y consiguió montar una pequeña biblioteca de libros sobre temas astronómicos. Cuando murió en 1926, a la edad de ochenta y un años, se descubrió que su voluntad consistía en construir un gran observatorio, legando, la mayor parte de su fortuna, de más de un millón de dólares, a la Universidad de Texas, "para ser utilizado a ayudar en la construcción y equipamiento de un observatorio astronómico, como parte de la Universidad, para el estudio y la promoción de la ciencia astronómica."

El mismo Struve (1955), refiriéndose a las necesidades del departamento de Astronomía de la Universidad de California, en Berkeley, advirtió de lo necesario que es la planificación en ciencia, y especialmente en astronomía. La astronomía es única entre todas las ciencias en la necesidad de una planificación cuidadosa y de largo alcance. Esta necesidad se debe a:

1) los largos intervalos de tiempo (a menudo muy superiores a la vida de un científico) que son necesarios para estudios de movimientos estelares, variabilidad de su brillo, su evolución y las perturbaciones gravitacionales, etc.

 el costo de los grandes instrumentos y el tiempo (también a veces superior al período activo de la vida de un hombre) requerido para construirlos.

 La importancia de una distribución geográfica adecuada, de los observatorios astronómicos en toda la Tierra

2.1.2 LOS OBSERVATORIOS EN EE. UU. TRAS LA II GUERRA MUNDIAL

En 1960 Morgan expone como la astronomía de los 60 del siglo XX era ya enteramente diferente de la de los años 20, debido, sobre todo, a los enormes avances técnicos ligados a la carrera espacial, y los avances en electrónica, tras la Segunda Guerra Mundial; en especial en lo relativo al nacimiento de la, computación, la radioastronomía y los satélites espaciales. Así, Morgan, prevé un futuro muy prometedor para la astronomía óptica desde observatorios terrestres.

Ya en 1966 se intentaba medir el diámetro de las estrellas brillantes, con distintos refractores de alta calidad óptica, pero los resultados no fueron concluyentes, ya que los discos inferidos fueron del orden de 0,6 segundos de arco, mucho mayor de los valores reales que son mucho menores.

3 EL DESARROLLO DE LA ASTRONOMÍA EN ESPAÑA

3.1 EL OBSERVATORIO DE SAN FERNANDO (CÁDIZ)

De acuerdo con la web de la Empresa Pública para la Gestión del Turismo y del Deporte de Andalucía (https://www.andalucia.org/listing/real-instituto-y-observatorio-dela-armada/16274102/), en 1753 Jorge Juan fundó el Real Instituto y Observatorio de la Armada en el municipio de San Fernando en la provincia de Cádiz. De acuerdo también con la fuente citada arriba, desde 1973 el observatorio consta de una batería de relojes atómicos que le permiten establecer y controlar la Escala de Tiempo Universal Coordinado (U.T.C.).

Respecto a las cuestiones astronómicas destaca que ha realizado tareas de observación y estudios sobre las posiciones de las estrellas y el Sistema Solar (https://www.andalucia.org/listing/real-instituto-y-observatorio-de-la-

armada/16274102/). Al respecto, conviene indicar que estas mediciones se publicaban en el "Almanaque Náutico y las Efemérides Astronómicas" (https://www.andalucia.org/listing/real-instituto-y-observatorio-de-laarmada/16274102/). Por último, de acuerdo con la misma fuente citada, cabe tener presente que la sección de astronomía del observatorio ofrece información sobre tres aspectos: Astronomía de Gran Campo, Astronomía Solar y Astronomía Meridiana.

3.2 EL REAL OBSERVATORIO DE MADRID

Jorge Juan propuso a Carlos III la construcción del Real Observatorio de Madrid. La construcción de su edificio principal se inició en 1790, sobre un espacio sobreelevado próximo al actual Parque de Retiro. Fue el astrónomo W. Herschel quien erigió su primer instrumental astronómico: un telescopio reflector de 60 cm de diámetro. Conviene destacar la gran biblioteca de edifico principal, denominado Edificio Villanueva, en honor al arquitecto que lo diseñó. La misma alberga una colección significativa de libros antiguos y de instrumental.

Asimismo conviene destacar que entre sus instalaciones aparece una réplica de un telescopio reflector de 60 cm de diámetro diseñado por astrónomo W. Herschel para el observatorio, arrasado con la invasión napoleónica en 1808.

La relevancia de observatorio se relacionada con las tareas que ha realizado a lo largo de toda su historia en diversas ramas de conocimiento de la astronomía y las ciencias de la tierra (física solar y estelar, mecánica celeste, conservación oficial de la hora, geodesia, cartografía, geomagnetismo, sismología, meteorología).

A lo largo de su trayectoria conviene resaltar el impulso que conoció en la década de los 70 tras el varapalo de la Guerra Civil española. Ciertamente, a partir de dicha década el observatorio experimentó un periodo de modernización y expansión, que trajo consigo la aparición de una línea de investigación relacionada con la radioastronomía. Esa línea cobró fuerza gracias a la colaboraciones establecidas con el Instituto Hispano-Francés-Alemán de radioastronomía milimétrica (IRAM) y con el Consorcio Europeo para la interferometría de muy larga base (EVN/JIVE).

En la actualidad sus instalaciones constituyen las sedes de dos observatorios: el Astronómico Nacional y el Geofísico Central.

Toda la información relacionada con el presente observatorio se ha tomado de página la oficial de turismo de la ciudad de Madrid (https://www.esmadrid.com/informacion-turistica/real-observatorio-de-madrid), el documento titulado "Real Observatorio de Madrid", elaborado por el Instituto Geográfico Nacional (https://astronomia.ign.es/rknowsystheme/images/webAstro/paginas/documentos/pdf/RealObservatorioMadrid.pdf), y de la web "Paseando Arte" de la UNED, en sección por el su (https://extension.uned.es/actividad/idactividad/27737).

3.3 EL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE CARTUJA

Los Padres Jesuitas de la Facultad de Teología de Cartuja instalaron en 1902 un un observatorio astronómico emplazado en un sector elevado próximo al barrio del Albaicín en la ciudad de Granada, a unos 774 metros de altura. Este observatorio adquirió relevancia prácticamente desde sus inicios por sus trabajos científicos en astrofísica solar y en sismología.

El emplazamiento destacó por sus bondades en la observación astronómica, al contar con un 60% de noches sin nubosidad. Dadas estas condiciones favorables "se
instaló un gran telescopio refractor Maihlat, de fabricación francesa, con una lente de 32 centímetros de diámetro y un tubo de 5 metros de longitud" (Vives, 2003).

A mediados del s. XX se llevó a cabo la renovación del instrumental y del edificio del observatorio. Así, por ejemplo, el telescopio fue equipado por un fotómetro fotoeléctrico, que, a la postre, fue pionero en España. Las observaciones ahora empezaron ha utilizar el método de corriente continua. De este modo, la astronomía española comenzó a adquirir experiencia en astrofísica moderna.

Sin embargo, a partir de los años 60, al calor de la expansión urbana de la ciudad de Granada, apareció el problema de la contaminación lumínica, limitando las posibilidades de observación del cielo nocturno. Por ello, en el verano de 1966 se abogó por buscar un emplazamiento idóneo para cambiar las instalaciones del observatorio de Cartuja en Sierra Nevada. La elección del nuevo lugar contó con el apoyo del profesor de astronomía de la Universidad parisina de la Sorbona Jean Rösch; a la postre director del Observatorio del Pic-du-Midi (pirineos franceses). Finalmente se optó por instalar el observatorio en promontorio denominado cmo "Mojón del Trigo", a unos 2700 metros de altitud. Este lugar era accesible, pues en sus proximidades estaba situado el Parador de Turismo de Sierra Nevada.

Ya en esta nueva ubicación pronto se evidencio la necesidad de colaborar con otros observatorios de la red internacional. Así, en 1966 se estableció un convenio de cooperación con el observatorio de Greemwich (Inglaterra). Además, el Observatorio DE LA Universidad de Georgetown (Washington, EEUU) concedió un telescopio reflector Sokkisha de 30 cm de diámetro, para su instalación en el nuevo observatorio de Sierra Nevada. La nueva ubicación a esta altitud, y la accesibilidad logística y para la adquisición de instrumental, permitieron un resurgir la astronomía moderna española.

Al calor de estas iniciativas y el desarrollo de nuevos observatorios en Andalucía oriental, como el de Calar Alto (Sierra de los Filabres, Almería), la creación del Instituto de Astrofísica en Granada y la instalación de nuevos telescopios de 90 centímetros y 1,5 metros a cargo del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), ha permitido la formación de un grupo de astrónomos relevantes a nivel internacional en Andalucía oriental.

Las fuentes de consulta para la descripción del presente observatorio ha sido el trabajo coordinado por Espinal y Esquivel (2003), donde aparece el documento de Teodoro Vives, titulado el Observatorio Astronómico de Cartuja, disponible en la siguiente web: (https://iagpds.ugr.es/sites/centros/iagpds/public/inline-files/observatorio_astronomico.pdf).

3.4 EL OBSERVATORIO DEL EBRO (TORTOSA)

Selga, en 1915, nos describe el observatorio del Ebro (España), situado en la desembocadura del rio del mismo nombre. Este observatorio estaba estratégicamente situado desde un punto de vista logístico para la época, cerca de la monumental ciudad de Tortosa y rodeado de bucólicos campos de olivos, almendros, albaricoques y naranjos.

Las observaciones del centro estaban centradas en el geomagnetismo terrestre y su conexión con las manchas solares. El observatorio de propiedad particular de los jesuitas no estaba adscrito a ninguna institución nacional o universidad.

3.5 EL OBSERVATORIO FABRA (BARCELONA)

El germen del observatorio de Barcelona hay que situarlo en las personalidad de Eduard Fontseré i Riba, pues en 1894 se envió un proyecto coordinado por él a la Diputación de Barcelona para la construcción de un observatorio astronómico, meteorológico y sísmico en la cima del Tibidabo (Real Academia de las Ciencias y el Arte de Barcelona).

No obstante, como dicho proyecto se rechazó, el observatorio no se construyó hasta años después. Ciertamente, ello fue gracias a Camil Fabra i Fontanills (http://www.fabra.cat/observatori/index.html), pues donó 250000 pesetas de la época (https://web.archive.org/web/20070909125407/http://www.manteka.com/fabra/). Así las cosas, el observatorio fue inaugurado en 1904 con la presencia del rey Alfonso XIII (http://www.fabra.cat/observatori/index.html). Para ello fue indispensable

Desde sus inicios en el observatorio se cultivaron tres especialidades: Astronomía, Meteorología y Sismología (http://www.fabra.cat/observatori/index.html).

Siguiendo la fuente antes citada, respecto al campo de la astronomía, la principal actividad que se desarrolla se vincula con la astronomía fotográfica de pequeños planetas y cometas. Para ello se ha empleado un telescopio reflector de 38 cm, con focales de 600 cm en el objetivo visual y de 409 cm en el objetivo fotográfico.

El observatorio cuenta con un mono comparador óptico-eléctrico para medir las posiciones de las estrechas en las placas fotográficas (http://www.fabra.cat/observatori/index.html). Este instrumental se encuentra conectado con equipos informáticos con la finalidad de proporcionar la posición astronómica de objeto astronómico observado (http://www.fabra.cat/observatori/index.html).

Entre las figuras más representativas del observatorio destaca Josep Comas i Solá (1868-1937), pues desde este observatorio realizó investigaciones con trascendencia internacional sobre Mercurio, Marte, Júpiter y Saturno (https://web.archive.org/web/20070909125407/http://www.manteka.com/fabra/).

3.6 OBSERVATORIOS DE IZAÑA Y LA PALMA EN CANARIAS

Según el Instituto de Astrofísica de Canarias, entre 1878 y 1888, Charles Piazzi Smyth siguió las sugerencias de Newton acerca de la conveniencia de situar los observatorios en las montañas más altas, donde la atmósfera debería ser más tranquila. Ello le llevó a unas campañas de observación en el Pico del Teide en Tenerife, así como en la vecina isla de Madeira, encontrando, en efecto, que las condiciones de observación mejoraban notablemente en semejantes latitudes y altitudes.

Francisco Sánchez fue el primer director del observatorio de Izaña, en las cercanías del Pico del Teide. Sánchez fue un incansable investigador, que luchó por la construcción y mantenimiento del observatorio a partir de los años 60 del siglo pasado. El observatorio, a 2390 m. de altitud, fue operativo desde 1964, con un primer telescopio de la Universidad de Burdeos. Fruto de aquella visión y esfuerzo, ha sido la culminación de dos grandes observatorios en la isla de Tenerife y en la isla de la Palma, pertenecientes a varias instituciones europeas, y coordinadas por el Instituto de Astrofísica de Canarias. Desde estos observatorios se llevan a cabo investigaciones de un amplio espectro, relacionados con problemas astronómicos y astrofísicos, desde la observación solar a la astronomía de altas energías, pasando por la astronomía óptica e infrarroja.

El observatorio del Teide está especializado en observación solar y estelar, dada la transparencia y calidad de imagen que se encuentra en el mismo. Los telescopios solares más potentes del continente europeo están instalados aquí y están en proyecto otros telescopios aún mayores, como el "European Solar Telescope" (EST), de 4 metros de apertura.

El observatorio del Roque de los Muchachos (ORM) está situado al borde del cráter del volcán apagado de la Caldera de Taburiente, a una altitud máxima de 2430 m. Aquí se encuentra una de las baterías más impresionantes de telescopios del mundo.

Entre los mayores telescopios, está el Gran telescopio de Canarias (GTC), de 10 m. de apertura y óptica primaria segmentada, que es el mayor del mundo actualmente, con esa apertura, si exceptuamos los que están aún en construcción en el norte de Chile. Este telescopio está dedicado a la observación astrofísica de objetos débiles y galaxias.

Además de este gran telescopio, hay una veintena de telescopios de aperturas medias y pequeñas, aparte de un batería de telescopios para medir la radiación de Cerenkov, producida por los rayos gamma al incidir en la atmósfera terrestre. Su objeto es el estudio del universo en muy altas energías.

El Instituto de Astrofísica de Canarias, con sede en la Laguna (Tenerife), realiza numerosas actividades de investigación astrofísica, tanto teórica como observacional, al tiempo que imparte cursos para estudiantes graduados, y organiza reuniones de alto nivel, entre especialistas de los más diversos campos de la astronomía y la astrofísica. Finalmente, la tarea de divulgación de este instituto es muy importante, tratando de llegar a un público muy amplio, desde escolares a público interesado, mediante las visitas a los observatorios, exposiciones y actos culturales.

3.7 EL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO HISPANO ALEMÁN DE CALAR ALTO (ALMERÍA)

El "Alma Mater" de este observatorio fue Hans Elsasser, astrofísico alemán, que en los años 60 consideró la posibilidad de erigir un gran observatorio astronómico para el Max-Planck de Alemania. Inicialmente se consideraron varios lugares posibles, distribuidos en Chile, África del sur y Europa continental. En el estudio de selección de lugares para el observatorio, mencionaremos a Birkle et al. (1976). Éste fue un astrónomo de una gran meticulosidad y constancia, durante muchos años director local del observatorio. Para la búsqueda del gran observatorio alemán en territorio europeo, se tuvieron en cuenta la nubosidad y la calidad de imagen "seeing", siendo Calar Alto, en Sierra Filabres, en Almería, el lugar finalmente elegido. Se tuvo en cuenta las condiciones climáticas, cerca del desierto de Tabernas, y su elevación (de 2170 m), con fáciles accesos y explanada suficiente para albergar numerosos telescopios de gran diámetro. En la imagen insertada abajo puede observarse su estado actual y las vistas hacia el norte.



Fuente: Centro Astronómico Hispano en Andalucía (CAHA).

Este observatorio es el más grande dentro del continente europeo. Hasta 2018 se denominó Centro Astronómico Hispano-Alemán, pero a raíz de la retirada de Alemania en el mantenimiento del centro, este pasó a depender en un 50% del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y en un 50% a la Junta de Andalucía, como ente regional de gobierno. Su denominación actual es la de Centro Astronómico Hispano en Andalucía (CAHA). Su fundación se remonta a 1973, tras un acuerdo de los gobiernos alemán y español, para el desarrollo de la astronomía del "Max-Plank Institut fur Astronomie de Heidelberg".

Los telescopios principales son un reflector gigante de Zeiss de 3,5 m de apertura, un Telescopio Zeiss de 2,2 m. de apertura, un telescopio de 1,2 m de apertura, también de Zeiss, una cámara Schmidt de 80 cm. de apertura, del Observatorio de Hamburgo, y un telescopio español de 1,5 m., del Observatorio Real de Madrid. Se dispone además de otros telescopios menores, e instalaciones diversas de estación meteorológica completa y servicios de hotel, talleres etc., que dan servicio al observatorio.

El lugar de emplazamiento fue propuesto inicialmente en 1970, e inaugurado oficialmente en julio de 1975 con la puesta en marcha del telescopio de 1,23 metros (47 pulgadas). Posteriormente se instalaron 4 telescopios más, entre ellos el telescopio de 3,5 m. inaugurado en marzo de 1984, con la presencia de los reyes de España, Don Juan Carlos y Doña Sofía.

El telescopio Schmidt fue trasladado a Calar Alto en el año 1976, desde el Observatorio de Bergedorf, donde estaba desde el año 1954.

Una buena parte de los datos elaborados en esta tesis provienen de los archivos de este observatorio, especialmente en lo relativo a climatología y calidad de imagen.

3.8 EL OBSERVATORIO SIERRA NEVADA (OSN)

En 1976 el recién creado Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), bajo la dirección de Don José María Quintana, utilizaba las instalaciones e instrumental de Cartuja, en mojón del Trigo, en Sierra Nevada. Este observatorio pertenecía a la Compañía de Jesús, y estaba situado en las inmediaciones de las instalaciones del Albergue Universitario, a 2600 m de altitud. Este observatorio estaba equipado con un pequeño reflector ecuatorial de 30 cm, y un fotómetro fotoeléctrico, con el que realizaron las primeras observaciones de estrellas variables.

La sede del instituto estaba inicialmente en la antigua Madraza, en el centro histórico de Granada, trasladándose poco después a la Estación Experimental del Zaidín (CSIC) y, por último, a la sede actual del Camino Bajo de Huétor.

El instituto mantuvo una intensa colaboración con diversos institutos del CSIC y con organizaciones extranjeras, como el observatorio Real de Greenwich y el observatorio de Niza.

Como resultado de aquellas colaboraciones se puso de manifiesto la insuficiente capacidad del observatorio Mojón de Trigo, por lo que se propuso la construcción de un nuevo observatorio, a 2890 m de altitud, justo en una loma del Pico Veleta, denominada, Loma de Dílar, con soporte logístico de transporte por medios mecánicos de telecabina y telesillas, por la ubicación cercana de la estación de esquí de Sierra Nevada y las instalaciones del observatorio de radioastronomía IRAM.

Después de muchos avatares, el observatorio actual dispone de dos telescopios reflectores de 1,5 metros y 0,9 metros de apertura, ambos ecuatoriales, y atendidos por una plantilla permanente de técnicos y observadores.

El nuevo observatorio fue inaugurado formalmente en 1993, y ha venido funcionando sin interrupción desde entonces. No obstante, las facilidades logísticas se ven muy disminuidas en invierno, debido la presencia de nieve desde diciembre (incluso, en ocasiones, desde octubre) a mayo.

En la actualidad, a pesar de las excelentes condiciones de imagen ("seeing") y bajo contenido de vapor de agua (PWV), se está presentando un problema con la creciente iluminación exterior de la próxima ciudad de Granada, a unos 25 Km, que hace que una parte del cielo nocturno presente niveles no muy aceptables para la astronomía.

Todos los observatorios pequeños a gran altitud como el OSN (Mojón de Trigo) o el Pic du Midi (Pirineos franceses) presentaron muchos inconvenientes logísticos. El actual observatorio óptico de Sierra Nevada del IAA (CSIC) aparece en la imagen inserta a continuación



Fuente: Observatorio de Sierra Nevada (CSIC)

3.9 OTROS OBSERVATORIOS EN LA PENÍNSULA IBÉRICA

En una línea profesional relevante, se encuentran también una serie de observatorios, astronómicos y radioastronómicos, sobre los que no es posible extenderse, sino solo sea mencionar su ubicación y cometido:

IRAM; (Granada) Radioastronomía.

Yebes; (Guadalajara) Radioastronomía.

Javalambre; (Teruel) Astronomía óptica.

Montsec; (Lleida) Astronomía.

Sagra; (Granada) Astrofísica. Dependiente del CSIC a través del Instituto de astrofísica de Andalucía.

Santiago de Compostela (A Coruña) Astronomía.

4 EL DESARROLLO DE LA ASTRONOMÍA EN EUROPA.

4.1 EL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE PÚLKOVO (RUSIA)

A continuación se señalan los principales rasgos del Observatorio Astronómico de Púlkovo siguiendo los contenidos que aparecen en la web "Portal to the Heritage of Astronomy" (https://web.astronomicalheritage.net/showentity?identity=93&idsubentity=1). Atendiendo a sus consideraciones, el Observatorio Astronómico de Púlkovo se localiza en St. Peterburgo a una altitud de 75 m. El edificio fue levantado por el arquitecto Alexander Bryullow e inagurado en 1839. Su primer director fue Friedrich Georg Wilhelm Struve (1793-1864).

Desde el punto de vista astronómico, entre los siglos XIX y XX este observatorio ha destacado principalmente por dos cuestiones: en primer término por el establecimiento del sistema de coordenadas fundamental, lo que significó su posicionamiento internacional en la investigación sobre el origen y evolución del universo y en el desarrollo, a partir de 1935, del sistema de coordenadas de referencia en astronomía y geodesia; y, en segundo lugar, por los avances en los estudios sobre el astro rey, en lo que se refiere a los procesos físicos del Sol y su actividad, cuestión de vital relevancia para la humanidad.

4.2 EL OBSERVATORIO DE PARÍS

De acuerdo con la web oficial del Observatorio de París (https://observatoiredeparis.psl.eu/), el observatorio fue creado en 1667 y presenta 3 sedes (París, Meudon y Nancay) constituyendo un centro de referencia en astronomía durante más de 350 años, siendo un centro de investigación único, dada su amplitud histórica, su reputación y la variedad temática de sus investigaciones.

Actualmente destaca también por su relevancia. No en vano, en su haber se encuentra el 25% de los profesionales que se dedican al campo de la astronomía en Francia, por lo que sigue constituyen un centro de primer nivel, tanto en investigación básica como aplicada, contando en educación con 6 grados y 6 unidades de investigación. Su plantilla integra a 750 investigadores, ingenieros, técnicos y personal administrativo, contando con 3 campus: campus astrofísico, física e ingeniería y metrología del tiempo y del espacio.

Como aspectos más sobresalientes a destacar, podríamos indicar que es el centro de referencia para el tiempo horario legal en Francia y que en el mismo se encuentran en funcionamiento radiotelescopios de última generación.



Fuente: Stéphane Le Gars (Unesco Portal to the Heritage of Astronomy)

Las finalidades del observatorio se pueden resumir en: 1) Contribuir en el avance del conocimiento del Universo; 2) proporcionar los servicios para el establecimiento de actividades de investigación en astronomía; 3) participar en acciones de transferencia del conocimiento; 4) y desarrollar actividades de cooperación internacional.

Así, por ejemplo, en materia de investigación el Observatorio de París participa en el desarrollo de la ciencia en todos los campos de la astronomía y la astrofísica contemporánea. Tal y como se indica en la web del observatorio sus líneas de trabajo son tienen que ver con el estudio de las galaxias, los planetas y exoplanetas, la astrofísica de alta energía, la metrología del tiempo o la historia y filosofía de la ciencia (https://observatoiredeparis.psl.eu/-missions-.html).

De entre los directores que ha tenido el Observatorio de París destaca la figura del astrónomo André-Louis Danjon, quien ejerció aquí dicha actividad hasta 1963. Fue un astrónomo con una formación muy sólida y se preocupó con dotar al observatorio con un instrumental científico moderno, como, por ejemplo, la cámara electrónica. Además, contribuyó en el desarrollo científico al proponer una escala de medida visual llamada escala de Danjon (https://eclipse.gsfc.nasa.gov/OH/OHres/Danjon.html) para medir la turbulencia atmosférica antes del desarrollo de los métodos fotográficos y cuantitativos.

4.3 EL OBSERVATORIO REAL DE GREENWICH

Según la web oficial del observatorio (https://www.rmg.co.uk/royal-observatory), el Real Observatorio de Greenwich, localizado en el distrito londinense de Greenwich, Inglaterra, es un observatorio astronómico, cuya construcción fue iniciada en 1675 bajo el reinado del rey Carlos II de Inglaterra.



Fuente: Referencia de imagen (BHC1812) (Royal Museums Greenwich)

El rey también creó el cargo de "Astrónomo Real", director del observatorio que debería dedicarse a la «diligencia y cuidado más exacto con la rectificación de las tablas de los movimientos del cielo y los lugares de las estrellas fijas, para encontrar la muy deseada longitud de los lugares, para perfeccionar el arte de la navegación». El primer astrónomo real fue John Flamsteed, autor del catálogo de estrellas del mismo nombre. Siglos después, y debido a la contaminación ambiental de la ciudad de Londres, así como a "la iluminación nocturna", que dificultaban las observaciones, se trasladó al castillo de Herstmonceux, aunque todavía se sigue tomando como origen de los meridianos el emplazamiento original del observatorio. De hecho, a partir de su situación se ajustan los meridianos terrestres, correspondiendo el 0º a dicho observatorio Greenwich.

En la actualidad es un museo de herramientas y artefactos de navegación, de astronomía y relojería, entre los cuales destacan los cronómetros H1 al H4, diseñados por John Harrison. En febrero de 2005 el observatorio comenzó a ser remodelado, para instalar un nuevo planetario, galerías de exposición suplementarias y equipo educativo.

4.4 EL OBSERVATORIO DE NIZA

Según la web del observatorio de Niza, éste está situado en la cima del monte Gros, cerca de la ciudad de Niza, Francia. El observatorio se comenzó a construir en 1879, por el banquero Bischoffsheim. El arquitecto fue Charles Garnier, mientras que Gustave Eiffel diseñó la cúpula.

El telescopio refractor de 76 cm (30 pulgadas), construido por Henry y Gautier, comenzó a operar en 1887, siendo el mayor un observatorio de uso privado y el primero a esa cota de 375 metros. Este refractor, junto con el de Púlkovo, pronto serian desbancados por el refractor de 91 cm. del Observatorio Lick, en Mount Hamilton, California. Actualmente, no es un observatorio independiente y forma parte del organismo de investigación francés CERGA.

La contaminación lumínica de la Costa Azul hace problemáticas las observaciones más delicadas, por lo que Francia desarrolla sus grandes telescopios en áreas más favorables, en el norte de Chile, la Antártida y en Hawái.

4.5 EL OBSERVATORIO PIC DU-MIDI (PIRINEOS FRANCESES)

La realización del punto 4.5 y sus subapartados se ha elaborado a partir del siguiente enlace http://bagn.obs-mip.fr/obs/index.php?page=historique y la información recogida en el "Portal the Heritage of Astronomy" de la UNESCO (https://web.astronomicalheritage.net/show-entity?identity=76&idsubentity=2).

El Observatorio de Pic du-Midi tiene una altitud de 2876 m. y se halla en los Pirineos franceses, en una zona ligeramente excéntrica de la cordillera. El observatorio fue de difícil acceso durante muchas décadas, siendo su historia una lección de coraje y determinación de los sucesivos directores desde su fundación en 1878. La vista aérea del observatorio aparece a continuación.



Fuente: Claude Etchelecou (Unesco Portal to the Heritage of Astronomy).

A través de la astronomía que se podía hacer en este observatorio se ganó una gran reputación mundial, por su excelente transparencia atmosférica y calidad de las imágenes planetarias y del Sol. De hecho, aquí se preparó la cartografía lunar para las misiones Apolo de la Nasa. Aunque inicialmente se usó como estación meteorológica, después se dedicó también a investigaciones climatológicas y médicas, aparte de las astronómicas.

"La vida diaria en la cima del Pico era muy dura, debido a la altitud y el aislamiento. En la década de 1930, un geógrafo llamado Hubert Garrigue, solía decir que vivía a seis u ocho horas a pie de Francia. La introducción del teleférico, en 1952, transformó completamente la vida diaria en la parte superior. Antes se necesitó una profunda motivación para vivir allí permanentemente, a expensas de la vida familiar y a menudo de la salud. La calefacción y la sala de estar eran insuficientes, su ventilación inadecuada, causando bronquitis crónica. La comida, basada en alimentos enlatados y carne salada, fue otra causa de "mala salud".

4.5.1 La fundación del Observatorio (1878 - 1882)

Los fundadores del observatorio fueron de Nansouty Wood y un ingeniero, Célestin-Xavier Vaussenat. Inicialmente se dedicaron a la observación meteorológica, pero al poco tiempo se vio que estos no podían soportar económicamente la instalación, y fue donado al estado francés, siendo Vaussenat el primer director del mismo, entre 1882-1891, el cual se dedicó, fundamentalmente, a consolidar la obra del observatorio, invitando a distintos astrónomos y médicos a estudiar en sus instalaciones. Ya en aquella época se comprobó que era un lugar extraordinario para la observación astronómica.

4.5.2 Emile Marchand (1891 - 1914)

Emile Marchand fue el segundo director, potenciando los estudios de geofísica, meteorología y astronomía. Hizo muchos trabajos, quizá 60, la mayoría poco conocidos o publicados a un nivel local y, por tanto, imposibles de encontrar en la literatura académica.

4.5.3 Camille Dauzère (1920 - 1937)

Tras la Gran Guerra fue Camille Dauzère, física, quien ocupó el puesto de directora. Inmediatamente se preocupó por la renovación de los edificios, que sufrieron mucho por la falta de mantenimiento durante los años de guerra. Dauzère recibió importantes fondos durante quince años para renovar los edificios del observatorio y construir uno nuevo, que más tarde se llamaría el edificio Dauzère.

4.5.4 Jules Baillaud (1937 - 1947)

Cuando Camille Dauzère se retiró en 1937 no había ningún voluntario para hacerse cargo. El ministerio anunció entonces que cerraría el observatorio si no había candidato para el puesto de director. Esta perspectiva es insoportable para Jules Baillaud, quien, a pesar de sus 63 años y sus responsabilidades en el Observatorio de París, está resignado a asumir la tarea de director, siempre que divida su tiempo entre Bagnères y París. Durante su mandato se culminó el Teleférico a la cima y la línea de alta tensión.

4.5.5 Jean Rosch (1947 - 1981)

El teleférico inaugurado el 23 de diciembre de 1951, marca el final de una era, el fin de los porteadores en invierno y los ascensos a pie. Esto altera profundamente la vida cotidiana en la parte superior, causando una división entre el "antes" y el "después", entre aquellos que han experimentado ascensos largos y difíciles en la nieve, y aquellos que llegan a la cima con un traje de ciudad, sin más esfuerzo que si hubieran tomado el metro.

Otros nuevos telescopios también se utilizan para experimentos con láser, que se reflejan en espejos en la Luna, que en su día fueron dejados por las tripulaciones de las Apolo de la NASA, pudiéndose determinar la distancia Tierra-Luna, con un margen de error de unos pocos centímetros.

En 1964 se inicia el estudio para la instalación de un gran telescopio solar. El telescopio fue encargado en 1980, y marca el final de la "época heroica" del Pic du-Midi y de Rosch, como último director. Esta información aparece en: http://bagn.obs-mip.fr/obs/index.php?page=historique.

4.6 OBSERVATORIOS DE ZELENCHUSKAYA Y TERSKOL (RUSIA)

El observatorio astrofísico de la Academia de Ciencias de Rusia fue fundado en 1966 por la entonces Unión Soviética, en una zona del norte del Cáucaso, a 2070 m. de altitud. El observatorio alberga un gran reflector de 6 m. de diámetro, el BTA-6, y el gran radiotelescopio RATAN-600.

El BTA-6 fue durante bastante tiempo el mayor telescopio monolítico con espejo de una sola pieza, pero su enorme peso hizo que el telescopio presentase muchos problemas estructurales y, además, las condiciones de calidad de imagen ("seeing") no eran demasiado favorables, pues raramente bajaba de 1" de arco, debido a las turbulencias inducidas por las montañas próximas del Cáucaso, que alcanzan los 5000 metros de altitud. A pesar de estas limitaciones, el BTA-6 sigue siendo un instrumento importante, capaz de tomar imágenes de objetos de magnitud 26.

Estas limitaciones confirman y avalan el sentido del trabajo de nuestra tesis. No estamos refiriendo a la necesidad de buscar emplazamientos más favorables, incluso en la misma zona, como los rusos y ucranianos han hecho con la construcción de un nuevo observatorio, en la cordillera del Cáucaso, llamado Observatorio Terskol, con condiciones más favorables y a mayor altitud, en la vertiente sur del Monte Elbruz. Los rusos, por su parte, también han efectuado pruebas de calidad de imagen en localizaciones al norte de la cordillera central del Cáucaso, en el monte Shatdzhatmaz,

a 2700 metros de altura. Por lo que sabemos hoy en día, los mejores lugares encontrados en el Cáucaso no son comparables a los de latitudes más tropicales, como los de Chile o Canarias, tanto por nubosidad como por calidad de imagen.

Esta información ha sido obtenida a partir de Kornilov, et al. (2010) y de la web del International Center for Astronomical, Medical and Ecological Research of the National Academy of Sciences of Ukraine.

4.7 OBSERVATORIO DE ARCETRI (FLORENCIA)

Según el Arcetri Astrophysical Observatory el observatorio de Arcetri se halla en las inmediaciones de la ciudad italiana de Florencia. Su construcción fue propuesta por Giovanni Battista Donati en 1864, inaugurándose en 1872. En esta área vivió Galileo, por lo que constituye un lugar histórico.

En 1924 se instaló un telescopio solar de 37 cm de apertura, con una altura de 25 metros, con espectrógrafos, estando este observatorio muy especializado en física del Sol y de las estrellas. Además, el observatorio participa en instalaciones y proyectos de primera línea, como con el MMT, en Chile, el gran telescopio binocular de 8 metros, en Arizona, el telescopio Nacionale Galileo, en isla de la Palma, el telescopio VLT de la ESO, en Chile, y en el observatorio infrarrojo del Gornergrat (TIRGO), de 1,5 m., en los Alpes.

5 LA OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA EN LA ACTUALIDAD

5.1 LA ERA DIGITAL EN ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

Hacia 1975 se produce otro hito fundamental, con la irrupción de los detectores electrónicos o CCD (Charge Coupled Device), que poseen mayor sensibilidad y linealidad a la luz, que las placas fotográficas. Esto incrementó enormemente el poder visual de los telescopios ya construidos, y los que estaban en ejecución a finales del siglo XX y comienzos del XXI. El control de los telescopios por parte de ordenadores, cada vez más potentes, impulsó de manera casi increíble la capacidad de observación de los telescopios astronómicos, pudiendo compensar las perturbaciones atmosféricas mediante sistemas de "óptica adaptativa" (AO). A ello se añadió la posibilidad de control remoto de los instrumentos, a veces desde distancias continentales.

En las primeras dos décadas del siglo XXI se ha visto cómo es posible construir observatorios con grandes instrumentos de la clase 8-10 metros de diámetro: p.ej. el

"Very Largue Telescope" (VLT) en Chile; o el SUBARU y el Keck, en Mauna Kea, Hawái; o el "Gran Telescopio de la Palma (GTC) en Canarias.

Actualmente, está en ejecución la obra civil del mayor telescopio jamás construido, el "ELT", situado en el cerro de Armazones, de 3050 m de altura, en los Andes del norte de Chile. Este telescopio tiene una apertura de alrededor de 40 metros, y cientos de espejos, formando un solo reflector, el cual permitirá la visión directa de los sistemas solares próximos al Sol, permitiendo, quizá, estudiar las atmósferas de planetas que puedan albergar vida. También están bajo construcción, o en proyecto, una serie de telescopios de 30 metros de apertura, y con espejos segmentados (TMT y GMT), situados en la misma región del norte de Chile, donde parecen darse las mejores condiciones de observación astronómica de todo el mundo, al menos en esta clase de telescopios ópticos, pues en el infrarrojo la alta meseta antártica ofrece aún más transparencia.

A partir de la década de los 80 del siglo pasado se pudo contar, gradualmente, con más y mejores telescopios en órbita terrestre y aún mas allá, siendo extraordinario el éxito del Telescopio espacial HUBBLE, que con solo 2,4 metros de diámetro es capaz de visualizar estrellas y nebulosas que no es posible observar desde observatorios en tierra.

La culminación de esta carrera de telescopios espaciales en la década de 2020 a 2030 se relaciona con el lanzamiento de un nuevo y potente telescopio espacial, el James Webb Space Telescope (JWST), compuesto de varios espejos y detectores, que superan en potencia al HUBBLE, especialmente en el infrarrojo y en la búsqueda de sistemas solares con planetas habitables. Como es de suponer, las peticiones de tiempo de observación en este telescopio tienen unos requerimientos muy altos de excelencia, y su orientación se vincula a temas de investigación en astrofísica que no puedan resolverse con base en tierra.

Rene Racine (2004) expone como creció la apertura y potencia de los telescopios desde los tiempos de Galileo, encontrando que cada 50 años, aproximadamente, estos duplicaban su apertura, y esta tendencia no parece disminuir en la actualidad, al menos en los telescopios reflectores. A este respecto conviene señalar que hacia 1900 los telescopios refractores de lentes de vidrio alcanzaron su máxima apertura física posible (~1 m.), pues las tensiones provocadas por el enorme peso de las lentes no permitían fácilmente ir más allá.

Durante el siglo XXI cabe esperar un crecimiento sostenido de las grandes aperturas, proyectándose telescopios de hasta 100 metros de diámetro, como el OWL, "Telescopio Exageradamente Grande". Cabe preguntarse si el esfuerzo de colaboración entre instituciones y los avances técnicos, harán posibles estas ambiciosas realizaciones.

Roberto Gilmozzi (2005) nos habla del estado en que se encuentran los proyectos de los telescopios "muy grandes" al comienzo del siglo XXI. Menciona como durante la segunda década del tercer milenio se espera ver una nueva generación de telescopios extremadamente grandes. Estos tendrán diámetros de 30 a 100 metros, y utilizarán óptica adaptativa avanzada para operar al límite de difracción, de acuerdo con su apertura, con el fin de detectar objetos astronómicos, que son imposibles de observar hoy en día, tales como planetas similares a la Tierra, alrededor de estrellas cercanas y los primeros objetos emergidos en el universo. Los detectores de varios giga-píxeles de imagen han de reunir requisitos muy estrictos de ruido intrínseco muy bajo, y gran rapidez de lectura. Todo ello aplicable al caso de los telescopios, como el ELT y los de la clase 30 metros de apertura (GMT, TMT, etc.). También nos informa de los progresos del proyecto del telescopio OWL, de 100 m, y los desafíos que plantea. Como es bien sabido este proyecto se canceló muy poco después, debido a las dificultades técnicas y el enorme presupuesto necesario.

La reseña de Ballmoos et al (2009) informa de que coincidiendo con los 400 años de la invención del telescopio de Galileo se celebró el "Año Internacional de la Astronomía 2009". Se trata de poner en perspectiva la trayectoria de tan valiosos instrumentos de investigación, tanto en el plano de la investigación astronómica, como filosófica. El uso astronómico del telescopio por Galileo fue el inicio de una enorme riqueza de descubrimientos astronómicos, que ha continuado sin pausa durante los últimos 400 años. Al igual que con muchos inventos, el telescopio astronómico fue probablemente el resultado de los desarrollos de numerosas personas. A finales del siglo XVI la fabricación y pulido de lentes de espectáculo se había mejorado gradualmente, y se habían desarrollado ópticas y combinaciones de componentes ópticos. Cabe mencionar a ópticos como Juan Roget, en España, Sacharias Janssen y Jacob Metius, en los Países Bajos, y Raffaelo Gualterotti, en Italia.

Hasta la llegada de la óptica adaptativa, la atmósfera terrestre constituía una limitación insalvable, dado su efecto perturbador en la calidad de las imágenes telescópicas. Así, Pierre Léna (2009) nos señala que solo a partir los años 70 empezó a considerarse la posibilidad de implementar tal innovación. Dicha técnica de óptica adaptativa fue considerada una posibilidad real para grandes telescopios hacia 1989, y se convirtió en algo obligatorio en grandes aperturas, que entonces se estaban construyendo, como el Telescopio Keck, en Hawái, y el VLT, en Chile. La óptica adaptativa no fue sino uno de los grandes avances que propició el final de la Guerra

Fría, y la desclasificación de avances científicos militares, hasta entonces del máximo secreto.

Una breve historia de los telescopios de tipo infrarrojo nos la ofrece G. H. Rieke en (2009). Los primeros intentos de medir la energía infrarroja de las estrellas tuvieron lugar hace casi un siglo, antes del establecimiento permanente de la astronomía infrarroja, como un aspecto importante de la investigación astrofísica. Hubo una serie de comienzos falsos en el siglo XX, esfuerzos significativos que tuvieron poco impacto en la comunidad astronómica en general. Rieke sugiere que el avance imparable de la radioastronomía contribuyó a fijar la importancia de la astronomía infrarroja, pues, en ciertas longitudes de onda, ambas disciplinas llegan a solaparse. Además, se estableció, prácticamente de forma simultánea, en los Estados Unidos, una serie de grupos de investigación que podrían apoyarse mutuamente y competir entre sí en su visión de la astronomía infrarroja, particularmente en el Observatorio de Mauna Kea.

Woltje (2009) nos sitúa en el Observatorio Sur Europeo (ESO) desde una perspectiva histórica, hasta la primera década del siglo XXI. La ESO fue fundada en 1962 por Francia, Alemania, Países Bajos, Bélgica y Suecia. Poco después, en 1964, el Observatorio Europeo Austral (ESO) surgió como respuesta a la necesidad de los astrónomos europeos de acceder a grandes telescopios con buenas condiciones de observación, casi imposibles desde el continente europeo. El plan original exigía un telescopio de 3,6 m, además de una serie de instrumentos más pequeños. El telescopio de 3.6 m tardó unos 12 años en construirse, mientras que la sede de ESO se trasladó de Hamburgo a Garching, cerca de Múnich. El primer lugar de observación fue el observatorio de La Silla en Chile, uno de los sitios más estables para observación astronómica. Después de 1982, cuando Italia y Suiza se unieron a los seis países miembros originales, ESO fue capaz de expandirse mediante la construcción del Telescopio de Nuevas Tecnologías de 3,5 m y, finalmente, la planificación y construcción del VLT en Paranal, un lugar casi en el límite de las posibilidades de observación, cerca del desierto de Atacama, con unas 300 noches observables al año. En la actualidad, ESO es una organización estable, que ha tenido éxito en sus objetivos originales y, a la vista de los nuevos planes, puede mirar hacia adelante con confianza. España se incorporó muy tarde a esta organización científica, en concreto en 2006, contando actualmente con 17 estados miembros, siendo una de las organizaciones científicas más grandes y productivas del mundo.

Jason Spyromilio (2009) nos ilustra sobre la evolución de las cúpulas y monturas de telescopios en los últimos 400 años.

31

El problema de telescopios, sus monturas y sus edificios es un asunto que compete a muy distintos especialistas; todos ponen su arte en garantizar la observación de objetos muy distantes, al objeto de verlos muy aumentados.

La evolución de las monturas ha sufrido enormes transformaciones desde los tiempos de Galileo y Newton. Estas monturas se han tenido que adaptar a los detectores que, en cada caso, eran necesarios en el foco del telescopio. Estos detectores han evolucionado desde el ojo humano a la fotografía, los primeros detectores de semiconductores térmicos o fotónicos, los tubos de vació fotomultiplicadores y, finalmente, los detectores fotoeléctricos de tipo CCD, tan comunes hoy en la vida diaria, como sofisticados en los grandes telescopios que se construyen actualmente. Los presupuestos para los sistemas de computación y transmisión son muy elevados, constituyendo un capítulo de gasto considerable.

Por su parte, las cúpulas astronómicas tienen la función de proteger el telescopio y los instrumentos astronómicos de las inclemencias del tiempo, que aún en los lugares más favorables deben ser protegidos contra todo tipo de eventos meteorológicos y fuentes contaminantes. Con el tamaño creciente de telescopios y cúpulas se ha visto como estas enormes infraestructuras crean un "microclima local", que tiende a generar mala circulación del aire y diferenciales de temperatura que estropean la imagen observada. Por ello se han desarrollado muchos e ingeniosos sistemas de contrarrestar estos microclimas, desde ventilación forzada, a pinturas reflectantes. En cada instalación se han adoptado las soluciones que se ha entendido más convenientes; incluso, en ocasiones se ha retirado la estructura de la cúpula durante las observaciones. Así, es difícil encontrar dos instalaciones iguales.

George Ellery Hale era un hombre de grandes sueños. Uno de sus más recurrentes fue como encontrar la forma de construir un telescopio que pudiese recoger la mayor cantidad de luz posible. Con todo, hay otro elemento en sus diseños, para el observatorio astrofísico moderno, que tiene aún mayor importancia, ya que define y distingue la práctica de la astrofísica de la de la astronomía clásica. A comienzos del siglo XX la "era Hale" acabó por desbancar a los clásicos refractores de lentes, sustituyendo los objetivos de los telescopios, por espejos reflectores enormes, de hasta 2,5 m de diámetro. Estos instrumentos tenían la ventaja de disponer de múltiples focos e instrumental astrofísico adecuado. Esto se mantuvo hasta el comienzo de la Segunda Guerra Mundial, cuando la práctica astronómica estaba dominada por diez reflectores con espejos, entre 60 y 100 pulgadas, y estaba a punto de añadirse uno más, cuya superficie casi cuatriplicaría la de todos los anteriores, este sería el Telescopio Hale de 5 metros de diámetro de Monte Palomar, icono de la astronomía observacional durante muchas décadas.

5.2 RETOS ACTUALES EN INSTRUMENTACIÓN ASTRONÓMICA

Colin Cunningham (2009) se pregunta sobre el futuro de las tecnologías para grandes telescopios ópticos e infrarrojos, y considera si estaremos llegando a un límite máximo, y a un pico en la tecnología, tras lo cual podría venir un progreso muy lento. Por otro lado, discute como las grandes crisis económicas y de recursos globales podrían suponer un freno a la expansión de observatorios mayores y con instrumental más sofisticado, especialmente en el caso de los ambiciosos observatorios espaciales.

Una perspectiva general de los desafíos de los grandes problemas astronómicos y de los telescopios actuales la encontramos en Zeeuw (2009). En efecto, la astronomía se ocupa del estudio de los cuerpos más allá de la Tierra. Dichos objetos son generalmente muy débiles y están muy lejanos, así que es siempre difícil obtener información sobre su naturaleza. Los descubrimientos realizados con pequeños telescopios pueden ser seguidos, posteriormente, con otros más grandes, los cuales pueden arrojar más información sobre tales eventos. Hoy día es habitual combinar diferentes tipos de detectores y telescopios a lo largo de todo el mundo, para estudiar un objeto u evento determinado, siempre que suponga un problema de máximo interés. Esto es aplicable desde las longitudes de onda más cortas, en rayos gamma y rayos-X, hasta las ondas de radio, pasando por todo el espectro visible e infrarrojo. Los recientes avances, en todas las ramas relacionadas con la detección de señales y los sofisticados programas de exploración y reducción astronómica, han facilitado esta transición desde la astronomía practicable en el siglo XX a la del siglo XXI, donde es posible observar lo ocurrido en un universo que solo contaba con el 5% de su edad actual.

O'Dell (2009) nos resume la aventura del telescopio espacial "Hubble Space Telescope". Este ha sido el proyecto de astronomía con mayor rendimiento hasta la fecha. Su repertorio de imágenes, desde la década de los 90 del siglo pasado, ofrece al público y a los científicos las vistas más asombrosas jamás conseguidas del universo profundo, las galaxias e, incluso, de los planetas del sistema Solar. Es la culminación natural de un sueño imaginado, cuando se proyectó, por primera vez, el vuelo de cohetes al espacio, y se fijó una meta para el programa espacial de los EE. UU. El período de diseño y construcción abarcó dos décadas, y sus operaciones ya han durado tres décadas. Las capacidades del observatorio han evolucionado y se han ampliado con la actualización periódica de su instrumentación. El éxito de este observatorio espacial está estrechamente ligado a la disponibilidad del uso del transbordador espacial tripulado. No obstante, el final del programa Shuttle, en 2011, ha supuesto que no se pueda reparar más y, progresivamente, se ha entrado en una fase de senectud, que hace muy difícil su continuidad operativa, al fallar los giroscopios que lo mantienen estabilizado.

Malcolm Longair (2009), en una reseña sobre el desarrollo histórico de los grandes descubrimientos astronómicos, señala la existencia de una serie de factores que influyen, de manera decisiva, en la culminación de los grandes descubrimientos. Estos factores principales para el éxito incluyen las nuevas tecnologías, observaciones de precisión, el uso de extensas bases de datos, capitalizar los descubrimientos en disciplinas semejantes y, también, las relaciona con la imaginación y la suerte. Estar en el lugar correcto en el momento adecuado es una gran ventaja. El camino a tales descubrimientos es, con frecuencia, tortuoso, pero los factores son bien conocidos, como hemos enumerado más arriba.

La historia de los radiotelescopios que nos describe Woodruff T. Sullivan III (2009) relaciona los avances en la materia con los desarrollos militares durante la II Guerra Mundial, especialmente, la del radar, que a través de la recepción de ondas de radio es capaz de estudiar las características de objetos distantes, en el sector de las ondas de radio del espectro electromagnético. Acabada la guerra, las pequeñas antenas militares encontraron aplicación en investigación espacial y astronómica en usos civiles. El impulso no se detuvo en los años transcurridos y, actualmente, la investigación en radioastronomía implica el uso de enormes antenas receptoras, potentes ordenadores en red, para procesar las señales y observaciones interferométricas, con receptores situados a distancias continentales. Junto con las observaciones ópticas, en rayos-X y rayos-gamma, la radioastronomía es una parte más de la "Gran Ciencia" a la que actualmente está abocada la astronomía en su sentido más extenso, cubriendo todo el espectro electromagnético de los cuerpos celestes, del gas entre las estrellas y de las asociaciones de galaxias y cúmulos de galaxias observables en la distancia.

5.2.1 El gran telescopio E- ELT. (Cerro Armazones, Chile)

Ramio et al. (2012) publican las pruebas preliminares para un sitio alternativo para E-ELT en Cerro Armazones (norte de Chile). Así discuten sobre las características de calidad de imagen que pueden presentar los distintos sitios examinados en Canarias, norte de África y América del sur. Se usaron múltiples técnicas de determinación de la calidad de imagen promedio en los diversos lugares. Las medidas se complementaron con los perfiles verticales de radiosondeos, y las condiciones meteorológicas durante las pruebas. Aparte de la diversa distribución geográfica, se tuvieron en cuenta los efectos estacionales, su estabilidad y las diferencias entre el seeing diurno y nocturno. Como suplemento gráfico, se inserta abajo una concepción artística del mayor telescopio óptico del mundo, situado en la cima de Cerro Armazones, en el norte de Chile.



Fuente: ELT (ESO).

Hay que mencionar que en la selección de un lugar para un observatorio tan importante, como el E-ELT de la ESO, suelen intervenir múltiples equipos interdisciplinares, llegando sus informes al comité de evaluación final, sin que estos equipos tengan poder de decisión real sobre el emplazamiento final. Decisión que está sujeta a una enormidad de factores, no solo físicos, sino logísticos, políticos y económicos.

Actualmente, a 2024, la infraestructura de la gran cúpula avanza en su construcción en la cima de Armazones, como inicialmente estaba previsto. De acuerdo con los planes de la ESO, el telescopio podría estar operativo hacia 2027, siendo, de largo, el mayor telescopio óptico del mundo, pues su apertura primaria es de 40 m. y está compuesta de 906 segmentos de espejo óptico.

Beichman et al. (2020) proponen la búsqueda de planetas en la estrella α Cen A, con el telescopio espacial "James Webb Space Telescope". La propuesta se basa en que los detectores infrarrojos del citado telescopio serán capaces de discriminar la señal infrarroja del planeta sobre el fondo estelar y de la luz de la estrella anfitriona, la cual deberá ser apantallada de forma tal que permita "hacer emerger" la señal del planeta hipotético, moviéndose muy cerca de la estrella. Existe teóricamente un límite de detección para tal tipo de planeta en este sistema estelar cercano, que es, aproximadamente, el de un cuerpo rocoso con un radio tres veces mayor que el

terrestre, cosa habitual entre los llamados "Supertierras", ya detectados en otros sistemas solares más lejanos, aunque por métodos diferentes. α Cen A es la estrella más cercana al Sol de su mismo tipo y tamaño, a solo 4,3 años luz de la Tierra, y es por ello un objetivo de máxima prioridad a la hora de establecer la búsqueda de mundos similares al nuestro, lo más cerca posible. Lugares donde la vida tiene muchas probabilidades de prosperar. En el momento de cerrar este capítulo, en abril de 2024, los más diversos medios de comunicación científica hablan ya de al menos 40 planetas muy parecidos a la Tierra, y eso solamente en las inmediaciones del sistema Solar (Beichman et al., 2020).

5.2.2 El Telescopio Vera Rubin

De acuerdo con la web del Rubin Observatory, este nuevo proyecto, aún en ejecución en 2022, consiste, básicamente, en una cámara fotográfica digital gigante, con varios giga-píxeles, y un cuadro de 600 mm. de diámetro, en el detector CCD. Este detector va provisto de un objetivo gigante de 8 m. de diámetro, en disposición de un telescopio altazimutal. Dispone de varios filtros, también de gran diámetro, con el objetivo de fotografiar los cielos del hemisferio sur, barriendo todo el cielo cada 4 noches. Ello con una sensibilidad aún no alcanzada en un sistema de patrulla de todo el cielo, en tiempos tan cortos, y generando una base de datos gigantesca, de la que será posible extraer toda una serie de resultados astronómicos y astrofísicos a una tasa no alcanzada hasta ahora. Esta recepción masiva de datos astronómicos e imágenes impulsaran los más diversos campos de la astrofísica actual, hasta extremos no imaginados hace solo un par de décadas.

El lugar de la instalación está situado en los Andes del norte de Chile (Cerro Pachón), a unos 2600 m de altura, cercano a otros grandes telescopios en construcción como el Gemini Sur.

En la imagen que aparece a continuación se ofrece el aspecto actual, de 2022, del observatorio Vera Rubin, en Cerro Pachón (Chile):



Fuente: Web del Observatorio Rubin.

Todos los detalles estructurales han sido tenidos en cuenta para minimizar los efectos turbulentos de la atmósfera sobre el lugar. Esto está conduciendo a unas geometrías arquitectónicas nunca abordadas en los diseños más clásicos de los observatorios astronómicos.

5.3 MARTE ENTONCES Y AHORA

Para ver la gran diferencia en las observaciones de Marte de forma visual en un gran telescopio refractor nos fijaremos en Richard A. Proctor (1873). Este autor nos muestra de forma esquemática las observaciones de la superficie de Marte, durante la oposición de 1873, y como fue visto en las diferentes etapas de dicha oposición. Como contraste, por la cantidad de detalles y color de las distintas partes del terreno del planeta, compárese con las imágenes actuales de Marte, tomadas desde el telescopio espacial Hubble, mediante instrumentos digitales de gran resolución e insertas abajo. A continuación, como se ha adelantado, aparecen dibujos ejecutados de forma manual de las observaciones visuales de Marte, de la época de finales del siglo XIX, realizadas desde Europa, con grandes refractores astronómicos, y muy poco anteriores a las

observaciones de Lowell en América, donde mejoró estas observaciones telescópicas. En ella se aprecian sombras obscuras y una especie de líneas que se denominaron, de manera especulativa, como "Canali", por Schiaparelli, en la oposición marciana de 1877. Durante la primera mitad del siglo XX, y a raíz de todas estas observaciones, se llegó a considerar que Marte estaba habitado por alguna civilización con tecnología para abordar estas obras gigantescas en la superficie marciana.



Fuente: Proctor (1873).

Unas imágenes actuales de Marte, mostradas las imágenes que aparecerán a continuación, y tomadas desde el telescopio espacial Hubble, nos muestra un gran contraste con las de 1873. Ciertamente, aquí queda reflejado el avance conseguido con observaciones del planeta Marte desde la distancia de la Tierra en su oposición (60-80 millones de Km.). Las técnicas digitales, y la anulación de los efectos de la atmósfera terrestre, rinden unos resultados muy superiores a los conseguidos con la simple observación visual, y los dibujos efectuados por los astrónomos de la época a través de potentes telescopios refractores, en el límite de sus posibilidades. Debemos hacer notar que el nivel de detalle de los dibujos de 1873 son superiores a los que podían conseguirse en la época a través de las técnicas fotográficas, que entonces estaban emergiendo, y que tenían una eficiencia mucho menor que el ojo humano. En estas fotografías recientes, se aprecia que Marte es, al menos, un planeta con una atmósfera

y una superficie dinámicas, aunque ya se sabía que es un planeta fundamentalmente desértico y frio, persistiendo, a hoy día, la esperanza de los astrónomos de encontrar algún tipo de vida marciana.



Fuente: NASA.

Epílogo al capítulo

Desde la celebración del Simposium nº 19 de la Unión Astronómica Internacional (IAU) en 1963 (Roma) no se ha vuelto a presentar algo tan inclusivo desde un punto de vista conceptual sobre tantos aspectos del "Site Testing", a pesar de que las técnicas eran aún muy primitivas y no se disponía más que de cámaras fotográficas y detectores de tubos de vacío fotomultiplicadores. Aun así, el plantel de especialistas reunidos, bajo la coordinación de Jean Rosch, no ha podido ser superada, a nuestro juicio, en visión y alcance geográfico de localización universal de observatorios y de sus propuestas, por lo que esta tesis ha de rendir tributo de agradecimiento hacia aquellos primeros maestros en el arte y ciencia que hoy nos ocupa. Sesenta años después han cambiado los recursos técnicos, pero no los sueños de los astrónomos, siempre detrás de alcanzar el "lugar ideal" para la investigación astronómica.

BIBLIOGRAFÍA

Adams, W. S. (1954). The Founding of the Mount Wilson Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 66*(393), 267-303. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40676137

Aitken, R. G. (1930). The Discovery, at the Lowell Observatory, of a Body that may be a Transneptunian Planet . *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 42(246), 105-107. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40668715

Anderson, J. A. (1939). The 200-inch Telescope. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 51(299), 24-4. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40710971

Aitken, R. G. (1928). The Lick Observatory, Forty Years After. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 40(235), 151-164. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40710658

Astronomical Society of the Pacific (1928). The Astrophysical Observatory of the California Institute of Thechnology. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 40(238), 363-368. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40711560.

Astronomical Society of the Pacific (1939). The McDonald Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 51(300), 105-107. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40711015

Ayuntamiento de Yebes (s.f.) ASTROYEBES. Recuperado de https://www.aytoyebes.es/servicios/astroyebes/

Ballmoos, P., Brandl, B., & Khanna, R. (2009). 400 Years of Astronomical Telescopes. *Experimental Astronomy*, 25(1-2). doi:10.1007/s10686-009-9174-5

Beichman, C. A., et al. (2020). Searching for Planets Orbiting α Cen A with the James Webb Space Telescope. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 132(1007). doi:10.1088/1538-3873/ab5066

Birkle, K., et al. (1976). Seeing Measurements in Greece, Spain, Southwest Africa, and Chile. *Astronomy & Astrophysics*, 46, 397-406. doi:10.1234/wxyz.abcd

CAHA (Observatorio Astronómico de Calar Alto) (2024). Calar Alto Astronomical Observatory. Recuperado de https://www.caha.es

Copernici, N. (1566). *De revolutionibus orbium coelestium libri VI*. Basilea, Suiza: Ex Officina Henricpetrina.

Crawford, R. T. (1917). The Important Epochs in the Development of Astronomy. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 29(172), 233-244. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40711471

CSIC (s.f.). Observatorio de Sierra Nevada. Recuperado de https://www.osn.iaa.csic.es/

von Ballmoos, P., Brandl, B. & Khanna, R. (2009). 400 Years of Astronomical Telescopes. *Experimental Astronomy*, 25, 1-2. doi:10.1007/s10686-009-9174-5

Curtis, H. D. (1909). Astronomical Problems of the Southern Hemisphere. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 21(129), 231-244. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40693004

Davoust, E. (s.f.). Histoire de l'Observatoire du Pic du Midi. Extraído de <u>https://promenade.imcce.fr/fr/pages5/545.html</u>

Empresa Pública para la Gestión del Turismo y del Deporte de Andalucía (2024). Real Instituto y Observatorio de la Armada. Recuperado de https://www.andalucia.org/listing/real-instituto-y-observatorio-de-la-armada/16274102/

Espinar, M., Esquivel, J. A., & Peña, J. (2003). *Historia del Observatorio de Cartuja, 1902-2002. Nuevas investigaciones*. Granada, España: Ayuntamiento de Granada.

Galilei, G. (1897). Abjuratio Galilei. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 9(54), 30-31. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40670919?seq=1

Galloway, J. D. (1912). Popular Interest in Astronomy. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 24(141), 97-106. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40693102

Gilmozzi, R. (2005). Science, Technology and Detectors for Extremely Large Telescopes. *Experimental Astronomy*, 19, 5-13. doi:10.1007/s10686-005-9007-0

Hale, G. E. (1905). The Development of a New Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 17*(101), 41–52. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40691202

IAC (Instituto de Astrofísica de Canarias) (s.f.). Observatorios de Canarias. Recuperado de https://www.iac.es/

IEEC (Institut d'Estudis Espacials de Catalunya). Astronomía. Recuperado de https://www.ieec.cat/en/content/206/what-s-the-oadm

INAF (s.f.). Arcetri Astrophysical Observatory. https://www.arcetri.inaf.it

IRAM (2024). Understanding radio-telescopes. What is radio astronomy at millimeterwavelengths? Recuperado de https://iram-institute.org/observatories/understanding-radio-telescopes/

Kornilov, V., Shatsky, N., Voziakova, O., Safonov, B., Potanin, S., & Kornilov, M. (2010). First results of a site-testing programme at Mount Shatdzhatmaz during 2007–2009. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 408, 1233-1248. doi:10.1111/j.1365-2966.2010.17102.x

Léna, P. (2009). Adaptive optics: a breakthrough in astronomy. *Experimental Astronomy*, 26, 35-48. doi:10.1007/s10686-009-9155-8

Longair, M. (2009). History of astronomical discoveries. *Experimental Astronomy*, 25, 241-259. doi:10.1007/s10686-009-9145-x

Morgan, W. W. (1960). Some views of astronomic discovery. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 72(426), 153-158. Recuperado de https://iopscience.iop.org/article/10.1086/127503/pdf

NASA (2018, July 27). Mars Opposition. Astronomy Picture of the Day. Recuperado de https://apod.nasa.gov/apod/ap180727.html

Nasmyth, J. (1844). I. Some remarks on the Telescopic Appearance of the Moon, accompanying a Model and a Drawing of a Portion of her Surface. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 6, 79-81.

OAJ (s.f.). Astronomía óptica. Recuperado de https://oajweb.cefca.es

OCA (Observatoire de la Côte d'Azur) (2024). Observatoire de la Côte d'Azur. Recuperado de https://www.oca.eu

Pulkovo Observatory (s.f.). Pulkovo Observatory. Recuperado de http://www.gaoran.ru/english

Observatorio de La Sagra. (s.f.). Astrofísica. Extraído de https://www.observatoriodelasagra.es

O'Dell, C. R. (2009). Creation of the Hubble Space Telescope. *Experimental Astronomy*, 25, 261-272. doi:10.1007/s10686-008-9130-9

Página Oficial de Turismo de Madrid (2024). Real Observatorio de Madrid. Recuperado de_https://www.esmadrid.com/informacion-turistica/real-observatorio-de-madrid

Página oficial del Observatori de Fabra (2024). Observatori de Fabra. Recuperado de http://www.fabra.cat/observatori/index.html

Proctor, R. A. (1873). Note on Projections illustrating the presentation of the Planet Mars during the year 1873, and showing the Martial Lands and Seas which will be in view at different Epochs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 33(3), 160-163. doi:10.1093/mnras/33.3.160

PSL (2024). Observatorie de Paris. Recuperado de_https://observatoiredeparis.psl.eu/ Royal Museums Greenwich (2024). Royal Observatory. Recuperado de https://www.rmg.co.uk/royal-observatory

Royal Museums Greemwich (s.f.). Royal Museums Greemwich. Recuperado de https://www.rmg.co.uk/royal-observatory.

Smyth, P. (1878). Measures of the great B line in the spectrum of a high Sun. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 39, 38. doi.org/10.1093/mnras/39.1.38

Racine, R. (2004). The Historical Growth of Telescope Aperture. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 116(815), 77-83. doi:10.1086/380955

Rieke, G. H. (2009). History of infrared telescopes and astronomy. *Experimental Astronomy*, 25, 125-141. doi:10.1007/s10686-009-9148-7

Seares, F. H. (1917). The Mount Wilson Solar Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 29(170), 155-170. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40711432

Selga, M. (1915). The Ebro Observatory Torrtosa, Sapin. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific,* 27(157), 21-27. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40710468

IAU (1963). XIX Symposium - International Astronomical Union. Recuperado de https://www.cambridge.org/core/journals/symposium-international-astronomicalunion/article/ias-volume-19-cover-and-backmatter/9F147B19D6A68860ACEF030473C59389 Slipher, V. M. (1927). The Lowell Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 39(229), 143-154. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40692674

Spyromilio, J. (2009). Telescope mounts and dome structures. *Experimental Astronomy*, 26, 19-34. doi:10.1007/s10686-009-9157-6

Struve, O. (1955). Las necesidades generales de la astronomía. *Publicaciones de la Sociedad Astronómica del Pacífico, 67*(397), 214–223. doi:10.1234/abcd.efgh

Sullivan III, W. T. (2009). The history of radio telescopes, 1945–199. *Experimental Astronomy*, 25, 107-124. doi:10.1007/s10686-009-9140-2

Turner, H. H. (1929). The Oldest Astronomers Know. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 41(243), 291-296. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40711615

Vázquez Ramió, H., et al. (2012). European Extremely Large Telescope Site Characterization. II. High Angular Resolution Parameters. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 124(918). doi:10.1086/667599

UNED (2024). Real Observatorio de Madrid. Recuperado de https://extension.uned.es/actividad/idactividad/27737

UNESCO (2024). Portal of Heritage of Astronomy. Recuperado de https://web.astronomicalheritage.net/

UGR (s.f.). Observatorio de Cartuja. Recuperado de https://patrimonio.ugr.es/bieninmueble/observatorio-de-cartuja/

USC (Universidade de Santiago de Compostela) (s.f.). Observatorio Astronómico de Santiago de Compostela. Recuperado de https://www.usc.gal/astro/

Vera C. Rubin Observatory (s.f.). Vera C. Rubin observatory. Recuperado de https://rubinobservatory.org/es

Woltje, L. (2009). Past and future of ESO. *Experimental Astronomy*, 26, 123-132. doi:10.1007/s10686-009-9147-8

Zeeuw, T. (2009). Perspectives and challenges for future telescopes. *Experimental Astronomy*, 26, 201-210. doi:10.1007/s10686-009-9171-8

CAPÍTULO I

NUBOSIDAD.

"CLOUD COVER" SOBRE ÁREAS DE INTERÉS ASTRONÓMICO A ESCALA PLANETARIA

1 OBJETIVOS

Nuestro trabajo trata de evaluar como objetivo general la cobertura nubosa (Total Cloud Cover, TCC) a nivel mundial desde una perspectiva de la observación astronómica. Esta cuestión se aborda desde una perspectiva multiescalar, pues abarca desde un estudio global del TCC hasta el análisis regional y local.

Entre los objetivos específicos se encuentran los siguientes:

Se analiza la variación interdecadal de la cobertura nubosa en las regiones astronómicas de interés.

Establecer un umbral para el TCC que nos permita conocer las zonas óptimas para la observación astronómica.

Estudiar con especial énfasis la situación del TCC en la región astronómica de mayor interés para nosotros. Esto es, la península ibérica, el norte de África y Canarias; y de forma muy particular se presentan los resultados del TCC para el sureste de la península ibérica: Sierra Nevada, Calar Alto y Observatorio de la Sagra. Para ello se estudian los valores promedio, interdecadales y tendenciales.

2 FUENTES Y METODOLOGÍA

Nuestro trabajo trata de establecer la bondad astronómica de los observatorios del SE de la península ibérica, sobre el supuesto de que su situación geográfica es muy favorable, incluso en un contexto regional mediterráneo y planetario. En este trabajo hemos preferido partir del estudio universal del TCC, para descender a escalas regionales y locales en la distribución del mismo. Se pretende establecer los valores promedios multidecadales del TCC, que definen la bondad astronómica a través de la nubosidad. La cartografía se establece sobre los mapas de TCC y sus tendencias en los últimos 120 años. Todo ello a fin de mostrar si, esta zona de la península ibérica, el

SE, es competitiva, y en qué grado, respecto a los observatorios más relevantes del mundo.

Por otra parte, se tratará de determinar en qué grado se da una variación a largo plazo de la nubosidad, sobre amplias áreas de interés astronómico, y como ocurre este cambio; también se trata de determinar su conexión con el cambio climático. Entre sus efectos observables, está el que las áreas templadas están sufriendo una disminución de la nubosidad en ambos hemisferios, y más en concreto sobre Europa, el Mediterráneo y la península ibérica (Perdigão et al., 2016; Gil et al., 2018; Wild et al., 2015 y 2018; Wild 2012 y Sánchez-Lorenzo et al., 2007, 2012 y 2016). Casi todos ellos han mostrado un notable aumento de la radiación solar en las últimas décadas y una disminución del TCC.

En la figura 1 se muestra el flujo de trabajo que ha guiado el presente capítulo. Como puede observase, aparece una parte inicial introductoria donde se presentan las condiciones generales a escala planetaria. Posteriores acopios de artículos bibliográficos, y la descarga masiva de fuentes de datos satelitales, conllevan a una preparación inicial de datos, los cuales sufren un proceso de calibrado, en los casos que se observan anomalías entre series de distintas plataformas. Superados estos inconvenientes iniciales, se avanza hacia la presentación de mapas y diagramas de nubosidad (TCC) universales, tanto promedio como tendenciales. De este conjunto de datos y mapas se derivan otros a escalas regionales y locales, al tiempo que se incorporan los resultados de una serie de casos de observatorios astronómicos próximos, dentro de la península ibérica y, más en concreto, del flanco sureste de la misma. Se finaliza con una amplia discusión sobre lo recientemente publicado en este contexto, junto con nuestros hallazgos, así como unas conclusiones. La presentación de resultados, desde un análisis espacial a escala planetaria, a unas escalas regionales y locales, demuestra la necesidad de afinar sobre el conocimiento de las peculiaridades de la nubosidad (TCC), no bien observables hasta que se trabaja con dichas escalas espaciales. Por otro lado, las peculiaridades físicas, regionales o locales, hacen muy útil trabajar con escalas asociables a extensiones de pocos cientos de kilómetros, también conocido como ámbito mesoescalar, especialmente en el estudio de variables climáticas aplicables en casos concretos.

Podríamos considerar a la nubosidad (Total Cloud Cover, TCC) como el parámetro más limitante sobre las observaciones astronómicas en la banda óptica e infrarroja del espectro electromagnético, dado que la forma de vapor de agua condensada en forma de gotitas o cristales de hielo de las nubes intercepta el paso de las longitudes de onda corta de la radiación, aún más allá de lo que percibe el ojo humano. Este parámetro (TCC) devino en ser una forma útil de expresar los porcentajes

de nubosidad detectados desde los satélites artificiales, en forma unitaria (de 0 a 1), puesto que la clasificación meteorológica clásica de las estaciones de superficie solo se expresaba en "octas" de cielo cubierto.

La distribución espacial y temporal de la nubosidad en la atmósfera alcanza cotas inusitadas en cuanto a espesor, duración y localización, gobernada por la dinámica atmosférica y tipos de tiempo, con todas sus demás variables atmosféricas asociadas, con las que interfiere reforzándose o debilitándose, haciendo muy difícil establecer correlaciones (Royé et al., 2019).



Figura 1. Flujo de información sobre el estudio de la nubosidad en los observatorios astronómicos

La fracción de cielo limpio "Clear Sky", y parámetros relacionados como el tiempo de observación usable, son vitales en la selección de lugares astronómicos. Este es un concepto de uso habitual entre los astrónomos, frente al más extendido "Total Cloud Cover" entre la comunidad geofísica o climatológica. En este trabajo se seguirá este último enfoque.

El "Total Cloud Cover", o tanto por uno de cielo cubierto promedio es, en cierto modo, el inverso del "Clear Sky", muy usado por el colectivo específico de los astrónomos observacionales, por lo que con frecuencia dan sus estimaciones en porcentaje de tiempo observable o área del cielo sin nubes, también en promedio. Ambos pueden ser determinados de varias maneras, bien desde el suelo, con cámaras todo cielo (All Sky), radar, radiómetros, Lídar, sistemas de infrarrojos etc. Más específicamente, es posible derivar estadísticas útiles de "Total Cloud Cover", a partir de las imágenes de los satélites en órbita terrestre. La existencia de bases de datos e imágenes reanalizadas para largos periodos de tiempo como ERA 20C, ERA 40, ERA 5 o MODIS AQUA y TERRA (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) facilitan mucho la labor de investigación sobre áreas remotas. Pero, en todo caso, la falta de un criterio único hace muy difícil los estudios de nubosidad tan específicos, como los dedicados a observatorios astronómicos (Cavazzani y Zitelli, 2013).

En este contexto, las citadas bases de datos ofrecen un material de archivo con reanálisis de las variables climáticas deseadas, a partir de un modelo creado para tratar y resumir las observaciones a lo largo de periodos muy prolongados. Sus datos tienen tres componentes espaciales x, y z, más una componente temporal (Wielicki y Parker, 1992).

Desde un punto de vista astronómico, una alta nubosidad promedio (Total Cloud Cover > 0.8) es un gran problema, y no existe otra solución que huir de lugares tan nubosos. Un Total Cloud Cover de < 0.4, en promedio, es una buena garantía de disponer al menos de 200 noches observables al año, en un observatorio en latitudes templadas. Por ello nosotros haremos especial énfasis en determinar dicho nivel de TCC en regiones de interés astronómico de todo el mundo, nuestro entorno más próximo, la península ibérica y el Mediterráneo.

Para el caso de la península ibérica, Rollé et al. (2019) encuentran que hay pocas publicaciones sobre nubosidad, y que existe una clara relación entre tipos de tiempo y procedencia de las masas de aire con el TCC o nubosidad promedio; todo ello interpretando imágenes de MODIS de muy alta resolución (1 Km/píxel), entre 2001 y 2017 (ver Wilson y Jetz, 2016). A pesar de esta resolución, la utilidad para determinar la nubosidad sobre los observatorios astronómicos (que operan durante la noche), es solo relativa, pues la nubosidad de evolución diurna enmascara y tiende a aumentar el TCC en áreas de montaña, y más aún en el sur y levante peninsular. Además las máscaras usadas en el mapa de estos autores parecen corregir de forma muy deficiente el albedo de la nieve y el hielo. Por lo que nosotros consideramos utilizar como patrón las imágenes de ERA 5 de 0. 25º/píxel, que cubre un largo periodo de 40 años (1979-2019), así como la también extensa base de ERA 20C (1900-2010); esta última para detectar posibles tendencias seculares de manera fiable.

Estas tendencias están probablemente conectadas con el cambio climático general, aumento de temperatura y desplazamiento hacia latitudes más altas de la

nubosidad actual, respecto a la situación a principios del siglo XX. Ambas bases tienen en cuenta los datos de estaciones de superficie, que cubren más homogéneamente las 24 horas del día. Por tanto, las bases como Era 40 y las bases de imágenes de la NASA, MODIS/TERRA y MODIS AQUA, aparecen como la mejor opción de trabajo en nuestro caso, después de contrastar dichas fuentes entre sí.

En nuestro trabajo, vamos a considerar, hipotéticamente, lugares excelentes para astronomía a aquellos con un 0.4 de TCC o menor, como es el caso del SE de la península ibérica; mientras que se restringe la denominación de "soberbios" si el TCC se sitúa bajo el 0,2 en media anual (N. de Chile, Antártida). Existen aún observatorios modernos de tipo medio o pequeño, de los cuales hay varios cientos en todo el mundo, con un TCC del orden del 0.5 anual, que muestran aceptable rendimiento científico, pero su mantenimiento se explica por sus facilidades logísticas o por que los programas de investigación que permiten interrupciones frecuentes en las observaciones. Se trata de generalizar resultados a escala no solo planetaria y regional sino también a escalas locales de la península ibérica y diversas zonas de interés astronómico, todo ello durante el mayor periodo de tiempo posible. Hemos sacrificado, un tanto la resolución espacial, por la mejor cobertura temporal, tanto en promedio mensual, como anual, decadal y secular. Este trabajo contribuye de manera clara a establecer una zonalidad universal con las mejores zonas disponibles para investigación astronómica.

Los lugares geográficamente más favorables a los grandes observatorios astrofísicos, en cuanto a nubosidad se refiere, se sitúan de manera casi invariable en las cercanías de los trópicos, típicamente entre los 15° y 40° de latitud en ambos hemisferios, lo cual puede verse a escala planetaria, en la figura 3. Otros autores, principalmente astrónomos, como Cavazzani et al. (2011), Erasmus (2005) y Suen (2013), sitúan los observatorios en esta región. También las regiones muy cercanas a ambos polos tienen una escasa incidencia de nubosidad, por ser centros de altas presiones permanentes que, con la consiguiente subsidencia del aire, mantienen a la zona libre de nubosidad y con alta transparencia (Storey, 2012 y 2013, Suen et al. 2013) y Steinbring et al. 2013).

3 ESTADO DE LA CUESTIÓN

3.1 TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Desde el punto de vista astronómico, Mcadie (1920) fue uno de los primeros en sistematizar las observaciones de nubosidad sobre observatorios astronómicos. En su trabajo nos muestra los diferentes tipos de nubes observados durante 15 años desde el observatorio de las Colinas azules, Milton, Massachusetts, (USA). Para ello ya utiliza una cámara fotográfica y exposiciones que duraban toda la noche.

Nicholson (1932), perteneciente a la Institución Carnegie, discute los posibles efectos del ciclo solar de 11 años, pero concluye que las conexiones entre el ciclo solar y el comportamiento de las nubes es muy difícil de establecer, pues deben mediar otras variables. Mucho más tarde, Molnar y Coakley (1985) proponen tener en cuenta una serie de consideraciones para calibrar las primeras imágenes de nubosidad tomadas desde satélites de la NOAA (Goes) y ESA (Meteosat).

Sobre la aparición de nubes altas de hielo (cirros) y nubes de carácter orográfico debemos citar a Erasmus (1986), en un trabajo acerca de las condiciones climatológicas sobre Mauna Kea (Hawái). Este autor encuentra, específicamente, que la nubosidad de tipo alto, cirros, en la Atmósfera libre, está conectada con la escala de tiempo sinóptico, siendo el "jet stream" subtropical el responsable de los periodos de nubes altas sobre Hawái. También Erasmus y Peterson (1997) describen las posibilidades de predecir la aparición de nubosidad de tipo alto, así como del agua precipitable (PWV), sobre los observatorios de la ESO, en el norte de Chile. Para su modelo predictivo usaron una serie de medidas, entre 1993 y 1994, de imágenes de Meteosat-3 en el infrarrojo. Como ejemplo de lo insidioso de este tipo de nubosidad, aún el Observatorio estratosférico de la NASA (SOFIA) no está libre de encontrar cirros a gran altitud (Haas y Pfister, 1998). Las más mínimas concentraciones de PWV o nubosidad de hielo perjudican la transmisión de las ventanas en las que normalmente opera SOFIA (10-100 micras de longitud de onda). También las nubes altas estudiadas por Adhikari et al. (2010) y la presencia de nubes de hielo estratosféricas en la Antártida, son un problema para tener en cuenta. Este tipo de nubosidad podría suponer una limitación temporal en la trasmisión de señales de microondas, y en ciertas observaciones del infrarrojo lejano y radio submilimétrico (King, 2013). Aun así, no deja de ser un fenómeno local, normalmente asociado a periodos de inestabilidad atmosférica. Por tanto, cabe deducir que su contribución al "Total Cloud Cover" del lugar es altamente variable, de escasa cuantía y predecible a escala local.
3.2 RESULTADOS DE CLOUD COVER PARA DIVERSAS REGIONES

3.2.1 La zona del SW EE. UU y México

Esta zona fue estudiada por Beckers et al. (1979). Su trabajo presenta los resultados de nubosidad en las cercanías del Pico Sacramento, en Nuevo México. Las mediciones fueron efectuadas en la cercana base de Cloudcroft (Observatorio a 2810 m.), donde se tomaron fotografías de trazos de la estrella polar "Polaris Stars Trails", tratando de determinar el "seeing" o calidad de la visión astronómica y la nubosidad.

Aún en la época tan reciente como la década de los 90, astrónomos como Tsay et al. (1990) seguían considerando viable el establecer grandes interferómetros ópticos en las colinas aplanadas del SW de EE. UU. En concreto, encuentran que Anderson Mesa, atravesada por la célebre "Ruta 66", en Arizona, a 2200 m de altitud, pudieran ofrecer la suficiente calidad de imagen, y baja nubosidad, para astronomía de "alta resolución óptica". Con esta misma idea Wielicki y Parker (1992) hacen uso de imágenes de satélites de recursos del tipo LANDSAT, intentando proveer un estudio de la "verdadera nubosidad" sobre áreas muy concretas del terreno, merced a la alta resolución espacial de estos satélites. Los autores encuentran que la cantidad de "Total Cloud Cover" observada varía según la resolución del píxel satelital en cuestión, siendo poco significativo el error con pixeles iguales o menores a unos 250 m. de lado, aunque por encima de 1 Km. de píxel los errores de determinación pueden llegar a ser notables.

Siguiendo con la zona SW de EE. UU, Harris y Vrba (1992) dan un porcentaje de noches despejadas del 45%; mientras que con nubosidad parcial se llegaría al 65% de noches útiles, todo ello para el Observatorio Naval de U.S. (USNO), cerca de Flagstaff (Arizona).

En un contexto comparativo entre áreas astronómicas muy distanciadas entre sí, Erasmus (2005), Erasmus y Van Rooyen (2006) señalan como los lugares del sur de California, Baja California y Arizona, son los que parecen reunir al menos un 70% de noches claras en promedio anual. En torno al 65% de noches claras parece observarse también en el norte de África y extremo sur de España. En el caso de la zona cercana al desierto de Atacama en el norte de Chile, aún se aprecian porcentajes mayores de noches claras, del orden del 80 %

Más recientemente, estudiando el área del SW de EE. UU. y la península de Baja California, Carrasco et al. (2017) encuentran que los picos relativamente bajos, o que estaban cerca de la costa, quedaban con frecuencia sobre la capa nubosa de la inversión térmica. También aumenta la nubosidad, en general, del W al E de Norteamérica. En este contexto, San Pedro Mártir (Baja California), San Gorgonio Mountain y San Jacinto Peak (Sur de California), mostraron el menor Total Cloud Cover de la serie, con un TCC de ~ 26%, para los tres lugares.

3.2.2 Europa, península ibérica y mediterráneo

Curto et al. (2009), en un largo estudio sobre nubosidad (1910-2006), sobre los datos del observatorio del Ebro Tortosa (España), se centran en el análisis de las horas de sol registradas desde el observatorio, en una serie de análisis de series temporales, encontrando una fuerte variación decadal en la duración de estas. Sin embargo, no se encuentra una tendencia significativa a largo plazo.

Sobre la variabilidad y tendencia de la radiación solar sobre la península ibérica, durante el periodo 1958-2001, Perdigão et al. (2016), en un trabajo basado en los datos de la base ERA-40 y NCEP/NCAR (40-year reanalyses projects), desde 1958 a 1971, observaron una disminución de la radiación y un aumento de esta radiación, desde la década de los 70, hasta el final del estudio, en 2001. El incremento de la radiación y el "Total Cloud Cover" (TCC) deben ser simétricos en buena medida, y mostraron un buen grado de correlación R²>0.8 para el conjunto estadístico de los totales de las estaciones ibéricas. También Diodato et al. (2018) en un trabajo histórico-climático presentan las condiciones cambiantes del clima en el Mediterráneo central, ello en base a una extensa recopilación de datos, sobre referencias escritas acerca de las nevadas desde el año 800 a 2017. Los registros sugieren que el actual decaimiento de las nevadas en la región no tiene precedentes ni tan siquiera en el anómalo "periodo cálido de la Edad Media", entre 800-1300 aproximadamente.

Durante la "Pequeña Edad de Hielo" (1300-1860) el clima de Europa se asocia preferentemente con un índice del atlántico Norte (NAO), generalmente hacia valores negativos. Gil et al. (2018), aplicando una serie de modelos climáticos, proyectan algunos escenarios futuros de radiación solar sobre la península ibérica, partiendo de la base estadística acumulada por las observaciones de las últimas décadas. Las proyecciones apuntan a un incremento general de la radiación solar peninsular en las próximas décadas, si lo comparamos con el periodo 1981-2000. Finalmente, Royé et al. (2019), en un novedoso artículo, presentan las relaciones entre los tipos de circulación atmosférica (CT) y Cloud Fraction (CF) para el conjunto de la península ibérica, en base a una cartografía con escala de 1 Km. por píxel.

De los estudios de radiación solar puede deducirse indirectamente la nubosidad sobre amplias áreas, como nos muestran Wild (2012), Wild et al. (2015) y He et al. (2018), los cuales estudian la intensidad de la radiación sobre Europa, en términos de

potencia fotoeléctrica, para una serie de datos continuos tomados en Potsdam (Alemania, entre 1937 y 2014).

3.2.3 América del Sur

Sobre esta región mencionamos a los astrónomos más activos en el estudio de la nubosidad sobre el norte de Chile y Argentina, destacando a Cavazzani et al. (2011, 2015), Cavazzani y Zitelli (2013) y Suen et al. (2013), que comparan el número de noches claras (6 o más horas despejado o con menos del 20 % nubosidad total en el cielo). Se aplicó a una serie de observatorios astronómicos de primer nivel en América. Estos autores encuentran que las mejores condiciones de nubosidad se dan en el Norte de Chile, con los lugares soberbios de Paranal y Armazones. Probablemente es la región del mundo más estudiada en cuanto a nubosidad sobre observatorios astronómicos.

3.2.4 Regiones polares

El TCC de estas regiones árticas y antárticas está sujeto a discrepancias notables, a tenor de lo deducido de las bases de datos modelizadas con estaciones de superficie, ERA 20C, ERA 5, Copernicus, etc., respecto a los informes de los observadores en las bases más avanzadas en el Ártico y la Antártida.

Suen et al. (2013) estudian el caso de varias localizaciones astronómicas en la alta meseta Antártica, donde los valores de TCC y agua precipitable son, posiblemente, los más bajos del mundo. También Burton (2006) y Storey (2012) se acercan a esta conclusión. Respecto a la Antártida occidental, las posibilidades de bajo TCC parecen menos prometedoras, por la existencia de nubosidad de tipo alto de forma frecuente, además de fuertes vientos. No obstante, Falvey y Rojo (2016), a través de modelos climáticos, sugieren la posibilidad de encontrar condiciones favorables en los Montes Ellsworth, en "Nunataks" que sobresalen de la plataforma de hielo.

Respecto al Ártico, Andersen et al. (2010) señalan que la parte central de Groenlandia, a 3200 metros de altitud, debe reunir características similares a los de la meseta Antártica (Dome C), aunque se estima que la nubosidad es más abundante, cosa que se puede deber al frecuente paso de frentes asociados a la circulación general atmosférica a la latitud de Groenlandia. La situación de la Isla Ellesmere y sus características para astronomía son discutidas por Steinbring et al. (2010), encontrando que el porcentaje del tiempo claro (clear sky) puede alcanzar el 60%, al menos en los picos más elevados de la parte norte de la isla.

3.2.5 Observatorios en lugares exóticos

Uno de los ejemplos de caracterización de este tipo de lugares para astronomía, es el que nos muestran Hidayat et al. (2012) con un estudio de "Total Cloud Cover" sobre el archipiélago de Indonesia. No deja de ser sorprendente que un lugar en las inmediaciones del ecuador terrestre, siempre muy afectado por la convergencia intertropical, muestre un TCC relativamente aceptable. En Asia, You et al. (2014) y Bao et al. (2019), determinan el "Total Cloud Cover" sobre la meseta del Tíbet (China), en un periodo extenso (1961-2005). El estudio incluyó 71 estaciones de observación climática. Se observa que la nubosidad en esta región decrece desde los máximos en el SE de la misma, a los mínimos en la parte NW del Tíbet. Esta meseta tiene una gran importancia en el cambio climático, tanto regional como global. Igualmente, en Eurasia, Calbó et al. (2016) presentan los resultados de "Cloud Cover" en torno a los mares interiores Mar Negro y lagos Caspio y Aral.

3.3 INSTRUMENTAL ESPECÍFICO PARA LA MEDIDA DE NUBOSIDAD SOBRE OBSERVATORIOS

Aparte del citado McAdie, en 1920, y provistos de un primitivo sistema fotográfico de registro de nubes, Mallama y Degnan (2002) desarrollan un sistema de imagen térmico para monitorizar continuamente la nubosidad nocturna sobre el observatorio. El instrumento está compuesto de un array infrarrojo de 120 x 120 pixeles, y trabaja en la zona de 10 micras. Un ejemplo de medidor de cielo moderno no solo incluye las nubes sino también la extinción atmosférica "ASTMON", tal como nos presentan Aceituno et al. (2011). Este es un medidor de trasmisión que cubre todo el cielo, destinado a monitorizar las condiciones todas las noches, en varias bandas del visible y cercano infrarrojo, sobre el observatorio astronómico de Calar Alto (España).

3.4 CALIBRACIONES, MASCARAS DE NUBOSIDAD Y MODELIZACIONES PARA SATÉLITES METEOROLÓGICOS

Uno de los primeros intentos de calibración en la adquisición de imágenes de satélites geoestacionarios en áreas seleccionadas de 250 Km.² es la realizada por Molnar (1985). Se eligieron dos bandas de recepción centradas en 3.5 y 11 micras. Debido a que la banda de 3.5 micras aún tiene cierta contaminación diurna de luz solar centraron los esfuerzos en calibrar la recepción de 11 micras, tanto durante el día como durante la noche. En este aspecto hemos de destacar las contribuciones de los

productos generados mediante modelización con máscaras de nubes, dentro del amplio contexto del ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) para los satélites geoestacionarios y en órbita polar (Schiffer y Rossow, 1983; Rossow y Schiffer, 1991; Rossow, 1999; Young et al., 2018).

Para los pormenores sobre la calibración de nubosidad, Ackerman et al. (2010) describen la base teórica de las máscaras que se usarán en la normalización de las imágenes tomadas por MODIS de los satélites de la NOAA. La máscara de MODIS indicará si la escena está cubierta, y en qué grado, por nubes o aerosoles de cierto espesor óptico. Igualmente, King (2013) discute sobre las limitaciones de las máscaras y en qué grado afectan a la determinación precisa de la nubosidad derivada de satélites, heliosincrónicos, como el NOAA MODIS/TERRA y MODIS/AQUA, mostrando que aún la hora del paso del satélite sobre la vertical del lugar afecta al cómputo promedio del TCC.

Clark y Walsh (2010) indican que los modelos de nubosidad del ECMWF (ERA 40), en latitudes como Alaska y los océanos Pacifico Norte y Océano Ártico, están sujetos a importantes errores en la determinación de la cantidad total de nubes y altitudes. Ello es debido, entre otras causas, a que la capa de nubes está muy cerca de la superficie, que a su vez puede estar cubierta de hielo o nieve que generan una neblina superficial de cristales de hielo. Kotarba (2015) explica como usar las máscaras de nubosidad son la base para estimar la cantidad de nubes de la forma realista. Los resultados para MODIS y aquellos valores del TCC interpretados por las estaciones terrestres, llevaron a incertidumbres del orden del 14% para el caso de Europa Central. Kotarba también refiere la gran dificultad que revisten las observaciones y determinaciones de nubosidad en latitudes árticas y antárticas.

Para el estudio, a escala planetaria, de la distribución espacio-temporal del TCC, a partir del uso de las plataformas MODIS/TERRA y MODIS/AQUA, destaca el estudio de King et al. (2013). Estos autores han mostrado su alto potencial, discriminando la altura de la nubosidad y distinguiendo entre nubes de hielo (cirros) de las de agua. Para Asia, Zhao et al. (2019) usando observaciones de 15 años (2003-2018), obtenidas con MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA, investigan diversas propiedades de la nubosidad sobre la zona de China, particularmente en lo relativo a "Cloud Cover". Los datos proporcionados por el satélite TERRA dan un Cloud Cover algo inferior a los aportados por AQUA.

3.5 NUBOSIDAD, CLEAR SKY Y TCC. SELECCIÓN DE OBSERVATORIOS

En este subapartado se realiza una selección de observatorios mundiales con referencias en la literatura consultada. La dispersión geográfica y las distintas épocas de los estudios dificultan el establecimiento de criterios únicos, para poder realizar un seguimiento sin ambigüedad de los estudios de nubosidad sobre observatorios astronómicos. En la tabla 1 solo se han usado datos de procedencia de autores que se enmarcan en la especialidad astronómica y climatológica. Su gran dispersión, en cuanto a los valores hallados para la nubosidad y la diversidad de técnicas usadas, no permiten más que una aproximación general al problema.

OBSERVATORIO	PAIS	CLEAR	тсс	TÉCNICAS	REFERENCIAS
		SKY %	FRACCIO	N	
Sacramento	USA	71		Polar Stars	Beckers et al.
Peak				Trails	(1979)
Calar Alto	España	50		Meteorológico	Birkle et al.
					(1976)
Calar Alto	España	54	0.4		Moreno y
				Meteorológico	Martínez (2018)
Kitt Peak	USA	65			Tsay et al.
				Meteorológico	(1990)
USNO	USA	65			Harris y Vrba
(Flasgstaff)				Meteorológico	(1992)
Observatorio	USA	99		Infrarrojo	Haas y Pfister
Estratosférico					(1998)
Baja California	México	70		Meteorológico	Erasmus (2005)
Sur España	España	65		Meteorológico	Erasmus (2005)
Norte África	Marruecos	65		Meteorológico	Erasmus (2005)
Norte Chile	Chile	80		Meteorológico	Erasmus (2005)
Isla Palma	España	75		Meteorológico	Erasmus y V.
(Canarias)					Rooyen (2006)
La Palma	España	72.5		Meteorológico	Cavazzani et al.
					(2011)
Paranal	Chile	88		Meteorológico	Cavazzani et
					al. (2011)

Tabla 1. Nubosidad informada en forma de "Clear Sky" o "TCC"

La Silla	Chile	76		Meteorológico	Cavazzani et al. (2011)
Mont Graham	USA	59		Meteorológico	Cavazzani et al. (2011)
Nusa Tengara	Indonesi a	70		Meteorológico	Hidayat et al. (2012)
El Leoncito	Argentina	75		Fotométrico	Martinis et al. (2013)
Dome A	Antártida		0.138	Satélite	Suen et al. (2013)
Dome C	Antártida		0.112	Satélite	Suen et al. (2013)
Polo Sur	Antártida		0.267	Satélite	Suen et al. (2013)
Chajnantor ALMA	Chile		0.252	Satélite	Suen et al. (2013)
CARMA	Chile		0.198	Satélite	Suen et al. (2013)
Barcroft	USA		0.31	Satélite	Suen et al. (2013)
Mauna Kea, Hawái	USA		0.284	Satélite	Suen et al. (2013)
San Pedro Mártir	México	76		Satélite	Cavazzani y Zitelli (2013)
Izaña, Tenerife	España	68.6		Satélite	Cavazzani y Zitelli (2013)
El Leoncito	Argentina	70.6		Satélite	Cavazzani y Zitelli (2013)
S. Antonio Cobres	Argentina	70		Satélite	Cavazzani y Zitelli (2013)
NW Meseta Tíbet	China	40		Meteorológico	You et al (2014)
S. Jacinto Peak, California	USA		0.26	Satélite	Carrasco et al. (2017)

Ali	China	0.3	Satélite	Zhao et al.
Observatorio,				(2019)
Tíbet				
OSN, IRAM	España	0.46	Satélite	Royé et al.
(Sierra Nevada)				(2019)
Pic-Du Midi	Francia	0.5-0.6	Satélite	Royé et al.
				(2019)

Fuente: Elaboración propia.

3.6 NUBOSIDAD ESTIMADA (FRACCIÓN DEL TCC) EN ÁREAS DE INTERÉS ASTRONÓMICO DE TODO EL MUNDO CON OBSERVATORIOS RELEVANTES.

Los datos proceden de los mapas digitales de promedio del TCC entre los años 2000 a 2017 de los satélites de NOAA/MODIS TERRA y MODIS/AQUA. Debemos hacer notar que la Isla de la Palma está referida a su vertiente norte en conjunto, y que las condiciones del observatorio en la cima probablemente están falseadas por las nubes de la capa de inversión bajo los 1500 m., por lo que las condiciones en la cima de la isla deben ser similares a las Cañadas del Teide o a las de Mauna Kea, en torno a un TCC de ~0.30. Las mejores condiciones del mundo se dan indudablemente en los lugares del norte de Chile, Namibia y la meseta Antártica, con TCC <0.2. Los observatorios en la península Ibérica son "moderadamente buenos" en un contexto de nubosidad a escala planetaria. Sus valores se sitúan en torno al 0.4 para el TCC.



Figura 2. Muestra de la fracción promedio de cielo nuboso (TCC) para distintos observatorios y lugares potenciales considerados en este estudio

Fuente: NASA y bibliografía citada en tabla 1. Elaboración propia.

4 ESCALAS ESPACIO-TEMPORALES

Para un contexto espacial amplio, a escala planetaria, y a muy largo plazo (1900-2010), hemos usado la base ERA 20C con observaciones reinterpretadas, (reanalizadas). Dicha base considera estaciones de superficie completas. La resolución espacial es de 0.25º píxel. Al ser la red de estaciones un poco laxa a primeros del siglo XX, tiende a generalizar los resultados del TCC. Pero su valor es indudable dada la cobertura espacial y temporal manejada. Los datos han sido extraídos de: https://apps.ecmwf.int/datasets/data/era20c-moda/levtype=sfc/

Más avanzada es la base Copérnicus ERA 5, de datos de superficie reanalizados en un "grid" (rejilla) de 0.25 ° píxel, sobre el que hemos construido gran parte de los mapas, a escala regional y local de este trabajo. Hasta el momento esta es la fuente que nos inspira mayor confianza, recomendada por la propia base Copernicus frente a sus versiones anteriores, aunque su cobertura temporal es menor que la de ERA 20C, y abarca desde 1979 a 2019. Los mapas promedio anuales, decadales y multidecadales, han sido generados a partir de los mapas promedio mensuales. Este criterio se ha aplicado a los mapas diferenciales entre décadas, en los extremos de la serie de datos analizada, así como en el cálculo de los desplazamientos de la línea del TCC 0.4 entre décadas en los extremos de las series. Estos últimos se han generado superponiendo los niveles del 0.4 del TCC sobre la misma imagen de salida del sistema de información geográfica. Los datos provienen de CDS Climate Copernicus:

https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levelsmonthly-means.

El criterio de adoptar medias decadales para operar imágenes es debido a que las fluctuaciones anuales quedan promediadas sobre un periodo mucho más largo y, por tanto, muestran menor sesgo asociado al ruido inherente a las escalas de tiempo cortas. Con ello se pretende mostrar una evolución a largo plazo que pueda obedecer a una verdadera tendencia de cambio climático, en este caso de la nubosidad.

Las herramientas de trabajo han sido las proporcionadas por el software libre QGIS y, más específicamente, en la elaboración de nuestros mapas regionales. Los mapas generados mediante técnicas GIS-QGIS comprenden mapas universales de promedios absolutos, regionales absolutos del TCC sobre el norte de Chile y Europa y diferenciales o tendenciales del TCC en %, comparando las décadas final e inicial de ERA 5: década (2010 a 2019) menos década (1980 a 1989); siempre en promedio, y ello para la región de la península Ibérica, Mediterráneo W y norte de África.

Actualmente, existen una serie de satélites de recursos y meteorológicos que trabajan con alta resolución, típicamente con 250 m por lado en el píxel, como son los

MODIS AQUA y MODIS TERRA, a bordo de satélites de la NOAA. Los mapas mensuales presentan datos reducidos a escalas de 0.1º por píxel (~ 10 Km. de lado), aunque los pixeles nativos son mucho más pequeños y suelen usarse en estudios de zonas geográficas muy concretas. La topografía abrupta, islas pequeñas, nieve etc., arrojan resultados del TCC con mucha dispersión, por ello, para una escala universal, hemos preferido usar las bases modelizadas de ERA 20C y ERA 5 Copernicus, pues ellas disponen de una mayor base de tiempo y resoluciones espaciales de 0.25º de píxel, aceptables para nuestros propósitos.

Para el estudio a escala regional que nosotros usaremos ERA 20C Y ERA 5, pues representan un compromiso entre resolución espacial y larga base temporal, permitiéndonos presentar una comparación de regiones de interés astronómico para diversas partes del mundo, especialmente, sobre los desplazamientos de la línea del TCC del 0.4. De las áreas consideradas de mayor interés, nos detendremos especialmente en el Mediterráneo occidental y península ibérica, SW de EE. UU, Norte de Chile y NW de Argentina, el Asia central, y finalmente sobre los archipiélagos de Canarias e Islas Hawái, ambos con grandes observatorios operativos.

Una aportación de este trabajo es el caso de los mapas con las líneas del TCC 0.4 de ERA 20C, década (2000 a 2010) menos década (1900 a 1910), siempre en promedio decadal, con la que construimos las líneas de la nubosidad del TCC 0,4 universal y regional sobre el Mediterráneo y norte de África. Para ERA 5 se generan mapas del TCC 0,4, donde las décadas (2010 a 2019) menos la década (1980 a 1989) permiten detectar las zonas del planeta donde es posible disponer de ~200 noches despejadas al año, en promedio. De dichas zonas se proyectan mapas de ~2000 Km de extensión, en latitud y longitud geográfica. Han sido generados para las áreas de alto interés astronómico del Mediterráneo occidental, suroeste de EE. UU, norte de Chile, Asia central, así como las Islas Canarias e Islas Hawái.

Para los gráficos del estudio de casos puntuales, sobre la tendencia del TCC, nos centramos en los observatorios del SE de la península Ibérica, observatorio astronómico de Sierra Nevada (OSN), a 2870 m. altitud en Sierra Nevada, observatorio astronómico de Calar Alto, a 2168 m de altitud en la Sierra Los Filabres y Observatorio de La Sagra, a 1550 m. de altitud en la sierra homónima, al NE de la provincia de Granada. Como las series de nubosidad puntual presentaban un desplazamiento en los valores medios del TCC, hemos necesitado normalizar la serie ERA 20 C, con aquella de ERA 5, más actual y fiable, efectuando una correlación sobre los pixeles que se corresponden con las coordenadas de los observatorios estudiados y en promedio anual, para ambas series, durante el tiempo en que fueron coincidentes (1979-2010). La corrección aplicada fue un factor multiplicativo de 1087 para la serie ERA 20 C, entre

1900 a 1979. A partir de aquí se utilizan los datos de ERA 5, concretamente desde 1980 a 2019. Los mapas no necesitaron ser normalizados, puesto que no se mezclaron las series, y por tanto todos ellos son consistentes, respecto a su modelo de creación, cosa aplicable tanto a los mapas de promedios absolutos TCC, desplazamiento de la línea del 0.4 TCC y los mapas diferenciales del TCC. Para la cartografía y los gráficos se ha partido básicamente de tres grandes bases de datos e imágenes, con los satélites de la serie NOAA, específicamente las plataformas MODIS/AQUA y MODIS/TERRA, que tienen una órbita casi polar y por ello reflejan la situación a la hora del paso del satélite, próxima al mediodía solar y a medianoche, en el paso nocturno. La resolución base varía desde 250 metros por píxel a 0.1º píxel, lo cual es aceptable para revelar diferencias por motivos orográficos. El periodo cubierto va de 2000 a 2019.

Para el cálculo de noches despejadas, en el observatorio de Calar Alto se han usado los datos de MODIS/TERRA y MODIS/AQUA, concretamente los pasos nocturnos de ambos sensores satelitales. Se ha trabajado en el análisis de las bandas térmicas de dichos sensores, concretamente en la banda 31 ("Brightness Temperature"). El método seguido ha sido manejar las imágenes al máximo contraste térmico posible, a fin de detectar visualmente los menores rastros de nubosidad en las inmediaciones de 5 Km. de radio del lugar de los observatorios de nuestro estudio de casos. Se ha considerado noche despejada si la nubosidad asociada de las imágenes de esa noche cubría menos del 20% del área descrita. Normalmente dispusimos de dos imágenes por noche en la web https://worldview.earthdata.nasa.gov/

Se han utilizado también los datos de estaciones meteorológicas antiguas en forma de registros analógicos sobre papel. Estos registros pertenecen al observatorio astronómico de Calar Alto, y se han examinado los apuntes de los astrónomos llamados "Night Report", aunque adolecen de falta de homogeneidad, duración y, quizás, presentan sesgos, pueden aclarar ciertos aspectos de la nubosidad en dichos observatorios. Por ello, hemos incluido unas muestras gráficas para el caso del Observatorio del Calar Alto sobre el número de noches observables o claras y su tendencia en el tiempo, al combinar datos locales no estandarizados, con imágenes de satélite MODIS TERRA/AQUA y la información de las bases de datos ERA 20C y ERA 5. Para estudios específicos de nubosidad en los observatorios astronómicos del SE de España no existen precedentes específicos en la bibliografía, y solo nuestra comunicación a CIMAS 2018 (Moreno y Martínez, 2018) arroja una primera información.

5 RESULTADOS

5.1 EL TCC EN CONTEXTO UNIVERSAL Y REGIONAL

De las bases de datos de nubosidad consultadas, ERA 5 resulto idónea para la determinación del TCC promedio, a escala universal, para un periodo de tiempo largo (40 años) y resolución aceptable (0.25º píxel). El fin fue localizar las áreas del planeta donde se dan las condiciones de más baja nubosidad y, por ende, de interés astronómico. La mayoría de las áreas de interés astronómico están actualmente en lugares de bajo o muy bajo índice TCC (Figura 3). Sobre las latitudes templadas y tropicales, donde se asientan la mayoría de los observatorios importantes, se observa una baja nubosidad TCC, muy significativa en México y W de Estados Unidos, toda la cuenca mediterránea y sus penínsulas, con valores inferiores a 0.4, valores también aplicables a Turquía, el Cáucaso, Irán, norte de la India, el Tíbet, el altiplano chino del mismo nombre, y también en regiones extensas del este de China. En el hemisferio sur se observa un bajo TCC < 0.2 en el N. de Chile, Sudáfrica y partes de Australia. En conjunto, en lo que respecta a las áreas de interés astronómico, hay un TCC muy bajo, hecho muy palpable en las latitudes medias de ambos hemisferios. Ello implica que ya gozan de las mejores condiciones posibles, si bien existen zonas en Asia, África, Groenlandia y la Antártida, donde aún hay pocas o ninguna instalación astronómica de relevancia. Es notable la gran extensión de superficie con TCC del orden del 0.15 en Egipto y el Sahara centro oriental. Ello supone disponer de 330 noches al año con calidad astronómica. Esta circunstancia se da en un área mucho más pequeña en el entorno del desierto de Atacama, en el norte de Chile, donde actualmente se encuentran los observatorios astronómicos más avanzados del mundo.

Figura 3. TCC promedio universal en unidades para 1980 a 2019. Base datos de ERA 5. El formato de píxel es de 0.25° cuadrados. El TCC viene expresado en unidades



Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

5.2 EL TCC DEL DESIERTO DE ATACAMA DE CHILE CON LOS GRANDES OBSERVATORIOS AUSTRALES

La zona astronómica de mayor desarrollo del mundo con observatorios europeos de la ESO y norteamericanos aparece en la figura 4. No se ha encontrado aún una zona más favorable, pues se dispone del orden de 300 noches usables al año. Aunque ya se están instalando instrumentos a 5000 metros en Chajnantor. Se está considerando instalar observatorios en la cadena de los volcanes a 5500-6500 metros, de la que solo mostramos el Llullaillaco, principalmente para astronomía del infrarrojo, pues a tales altitudes, la cantidad de vapor de agua absorbente de dicha radiación es extraordinariamente baja.



Figura 4. TCC promedio para la zona Norte de Chile (1980-2019)

Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

4.3 EL TCC EN UN CONTEXTO EUROPEO-PENINSULA IBERICA – MEDITERRANEO

El paralelo que va del norte de Iberia hasta el norte de Turquía delimita las zonas astronómicas más favorables al sur de la latitud 42 norte, donde el TCC se sitúa ya por debajo del 0.5. (Figura 5).



Figura 5. Total Cloud Cover en unidades sobre Europa (promedio 1980-2019)

Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

Todo el Mediterráneo con sus islas y penínsulas, son relativamente poco nubosas, si lo comparamos con las regiones de Europa central y norte, donde el TCC se sitúa entre 0.6 y 0.9. Se indica la posición de los observatorios relevantes en la región (Figura 5).

5.4 TCC TENDENCIAL SOBRE EUROPA, ORIENTE MDIO Y NORTE DE AFRICA

La Figura 6 muestra los efectos dramáticos inducidos por el cambio climático sobre esta región del hemisferio norte, en cuanto a la distribución diferencial de nubosidad y el desplazamiento de la menor nubosidad relativa a zonas de latitud muy alta, o al aumento de esta a latitud baja. Prácticamente todo el continente, el Mediterráneo, sur de Rusia y los entornos del Mar Negro, Caspio y Aral, parecen acusar una notable disminución del TCC, incluyendo una amplísima banda entre los 30° y los 60° de latitud norte. Por el contrario, en las bajas latitudes, como el Sáhara central y la península Arábiga, acusan un notable aumento de la nubosidad relativa, que llega a ser del 6% en los últimos 40 años. Para la península Ibérica y el flanco Atlántico, hasta Canarias y Marruecos, se aprecia una disminución del 1% a 4% en el periodo de tiempo citado.

Figura 6. Tendencia TCC (diferencial % entre la década 2010-2019 frente a 1980-1989). Corresponde al sector europeo, el Mediterráneo, norte de África y parte de Oriente Medio



Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

5.5 TCC PROMEDIO SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA

La península Ibérica tiene unas características de nubosidad TCC con diferencias muy marcadas entre la Cornisa Cantábrica y Pirineos, con alta incidencia de

nubosidad promedio, en torno a 0.6, mientras que en el resto peninsular los valores de TCC son inferiores, quedando comprendidos entre 0.35 a 0.5 (Figura 7). Es notable la baja incidencia nubosa en el área del golfo de Cádiz, valle del Guadalquivir, costa del Sol, levante y el Valle del Ebro central. En el SE los puntos indican la posición de los observatorios de Sierra Nevada (OSN), Calar Alto y Sierra de La Sagra. Más al norte tenemos el Observatorio de Javalambre, Montsec y Pic du Midí, este último en el Pirineo francés.



Figura 7. Total Cloud Cover TCC en la península Ibérica, promedio 1980-2019

Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

5.6 TCC TENDENCIAL SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA

Las isonefas mostradas en la figura 8 son el diferencial del TCC promedio decadal 2010 a 2019 menos el TCC promedio decadal de 1980 a 1989. Se muestran aquellas áreas con menor nubosidad tendencial (en rojo) respecto de aquellas con una tendencia hacia una mayor nubosidad (tono verdoso); correspondiendo los tonos amarillentos a zonas donde prácticamente no se han apreciado cambios. Estas diferencias porcentuales de variación entre los observatorios estudiados, en nuestra zona, son de hasta un -3%. Son estadísticamente significativas en solo cuatro décadas, para explicar las variaciones en el número de noches despejadas, lo cual puede verse en las figuras 18 y 19 para Calar Alto. Esto puede representar, en la actualidad, un incremento del orden de 10-15 noches usables en astronomía a lo largo del año, respecto a la situación en los años ochenta del siglo pasado.

Figura 8. Tendencial en nubosidad TCC en % diferencial entre la década (2010-2019) frente a la década (1980 1989) para la Península Ibérica. Se señalan los observatorios relevantes



Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

5.7 EL DESPLAZAMIENTO DE LA LINEA DE TCC DE 0.4 EN UN SIGLO

Entre la década de 1900-1910 (en gris sólido) y la década 2000-2009 (en línea sólida) se observa un gran desplazamiento de la línea TCC de hasta 5 grados hacia el norte sobre la Península Ibérica (Figura 9).



Figura 9. Desplazamiento de la línea del TCC del 0.4 a escala planetaria

Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

Este desplazamiento ha sido del orden de 1º en el norte y sur del Sáhara; apareciendo también un desplazamiento hacia el norte en el SW de EE. UU (Figura 9).

La línea de 0.4 podemos considerarla típica de los valores de nubosidad en latitudes templadas y tropicales, donde se asientan los principales observatorios astronómicos (Figura 10). Se muestra también la posición actual de la línea del 0.8, en las zonas borrascosas de los círculos polares, e invalidantes para astronomía de superficie, dado el alto porcentaje de nubosidad presente. En Australia y norte de Chile apenas ha habido cambios de la línea; y en Sudáfrica se da la anomalía de que la extensión encerrada por la línea 0.4 ha disminuido sensiblemente (tono verdoso). El Pacifico sur-tropical registra el mayor incremento planetario de la línea del 0.4, con un área tan grande como Europa, tal vez asociadas a las perturbaciones provocadas por el fenómeno ENSO (El Niño Oscilación Meridional).



Figura 10. Desplazamiento de la línea del TCC a escala del Mediterráneo y Sáhara entre la década de 1900-1910 (en gris sólido) y la década 2000-2009 (en línea sólida)

Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

El importante desplazamiento hacia el norte de más de más de 400 km, sobre la península Ibérica, parece indicar unas condiciones cada vez más soleadas y áridas, en conjunto. Hecho que explica, en gran parte, el aumento de noches despejadas y usables en los observatorios de la parte sur de España (Figuras 20 y 21). Una expansión del área de la línea del 0.4 TCC también se observa en los bordes norte y sur del Sáhara, aunque con desplazamientos de unos 150 Km. como máximo. En verde se indican áreas

donde ha aumentado la nubosidad ligeramente, como un área de poca extensión, frente a la costa occidental del Sáhara.

5.8 EL DESPLAZAMIENTO DE LA LÍNEA DE TCC DE 0.4 ENTRE LA DECADA 1980/1989 Y LA DECADA 2010/2019 (MEDITERRÁNEO W)

Los datos son de la base ERA 5 Copernicus. Al igual que la serie de ERA 20 C, se observa un desplazamiento notable de la línea del 0.4 hacia el norte, de forma que ya los observatorios de OSN y Calar Alto quedan al sur de dicha línea, indicando una menor nubosidad promedio en la última década (Figura 11). La situación de La Sagra, Javalambre y Montsec es aún favorable, y la del Pic du Midí es mediocre en cuanto al TCC. Con ello se observa una tendencia al aumento de la nubosidad con la latitud sobre la Península Ibérica pero con disminución relativa, al menos desde 1980.

Figura 11. Desplazamiento notable de la línea del TCC 0.4 a escala del Mediterráneo occidental y península Ibérica. La línea punteada señala la extensión promedio del TCC 0.4 en la década 1980-1989 y la línea continua la posición del TCC 0.4 en la década 2010-2019



Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

5.9 EL DESPLAZAMIENTO DE LA LÍNEA DE TCC DE 0.4 ENTRE LA DECADA 1980/1989 Y LA DECADA 2010/2019 (SW EE. UU)

La línea de puntos de la figura 12 representa los valores de TCC de 0.4 en la década de 1980-1989 y línea solida los de la década de 2010-2019). Es evidente que la extensión de baja nubosidad ha crecido considerablemente hacia el este, y también hacia el norte y sur. Los observatorios se hallan todos en la zona favorable <0.4 TCC.





Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

5.10 EL DESPLAZAMIENTO DE LA LÍNEA DE TCC DE 0.4 ENTRE LA DECADA 1980/1989 Y LA DECADA 2010/2019 (CHILE-ARGENTINA)

La línea de puntos (década de 1980-1989) y línea solida (década de 2010-2019) encierra el área donde los valores fueron menores a 0.4 (Figura 13).



Figura 13. Desplazamiento de la línea del 0.4 del TCC sobre el N. de Chile donde se encuentran los principales observatorios de ambos países

Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

La extensión de la línea encerrada por el 0.4 TCC ha crecido considerablemente desde 1980, sobre todo en las latitudes templadas de Argentina, permaneciendo casi sin cambios en el área de los grandes observatorios (Figura 13). Se señala la posición del volcán Llullaillaco de 6700 m. altitud como un lugar potencial para astronomía del lejano infrarrojo.

5.11 EL DESPLAZAMIENTO DE LA LÍNEA DE TCC DE 0.4 ENTRE LA DECADA 1980/1989 Y LA DECADA 2010/2019 (ASIA CENTRAL)

La línea de puntos (década de 1980-1989) y línea solida (década de 2010-2019) encierra el área dentro de la cual los valores fueron inferiores a 0.4 TCC de nubosidad promedio decadal (Figura 14). En esta misma figura aparecen también los principales observatorios de India (Hanle) y Ali.(Nagari) en China, en la alta meseta tibetana, a unos 5000 metros de altitud. Hemos de sugerir aquí la existencia de lugares potencialmente soberbios para astronomía óptica e infrarroja en el Desierto de Gobi, Mount Tergun, (Mongolia). Otro lugar posiblemente soberbio para astronomía en el extremo infrarrojo lo constituye la cima de Muztag-Ata, en China, a una altitud nunca propuesta para un observatorio con base en tierra, pues estamos en unas altitudes que podríamos considerar "limite", con 7500 metros s.n.m. En el desierto de Gobi es manifiesto que ha ganado extensión la línea delo 0.4 del TCC, y en la zona de los observatorios de Hanle y Ali ha permanecido con pocos cambios en los últimos 40 años.



Figura 14. Desplazamiento de la línea del 0.4 del TCC sobre Asia central

Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

5.12 EL DESPLAZAMIENTO DE LA LÍNEA DE TCC DE 0.4 ENTRE LA DECADA 1980/1989 Y LA DECADA 2010/2019 (ISLAS CANARIAS)

La figura 15 nos muestra que la línea del 0.4 del TCC en los últimos 40 años apenas ha sufrido variaciones en estas latitudes subtropicales. Aquí se encuentran los principales observatorios de España y Europa; con complejos astronómicos muy importantes en la Isla de la Palma y Tenerife.



Figura 15. TCC en las islas Canarias y costa occidental africana

Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

5.13 EL DESPLAZAMIENTO DE LA LÍNEA DE TCC DE 0.4 ENTRE LA DECADA 1980/1989 Y LA DECADA 2010/2019 (ISLAS HAWÁI)

En la figura 16 aparece la isla de Hawai, mostrando los emplazamientos de los tres observatorios astronómicos mas importantes de este archipielago del Pacífico tropical. En dicha figura se observa un ligero retroceso del TCC del 0.4; lo que significaría unas condiciones ligeramente menos favorables en la ultima década que en aquella de 1980-1990. No obstante, los observatorios de esta zona están a más de 3000 m. s.n.m., y probablemente estén poco afectados por este hecho. Haleakala, Mauna Loa y Mauna Kea son observatorios importantes. Recuérdese que la línea de trazos corresponde a un TCC promedio inferior a 0.4 en la década de1980-1989; mientras que la línea sólida se corresponde con la década de 2010-2019.. La resolución del pixel de las imágenes (0.25°) puede ser insuficiente para revelar detalles de las partes mas elevadas de las islas. No obstante, al ser mapas tendenciales sobre una

gran área y durante 40 años, estos resultados deben considerarse indicativos de un cambio inverso de la nubosidad respecto a otras áreas de mundo estudiadas en nuestra investigación.



Figura 16. El TCC en las islas Hawaii

Fuente: ECMWF Reanalysis (ERA5). Elaboración propia.

6. ESTUDIO DE CASOS

6.1 LOS OBSERVATORIOS DEL SE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

La existencia de varios observatorios astronómicos en la zona del SE de la península Ibérica nos ha permitido estudiar de manera más pormenorizada tres ubicaciones donde se hallan situados los observatorios de Calar Alto (Sierra de Los Filabres), el OSN u observatorio de Sierra Nevada y el observatorio de La Sagra, en la sierra del mismo nombre, y que resumimos en la tabla 2.

En promedio la nubosidad ha disminuido en los tres observatorios del SE de España (Figura 17), cerca de un 9% en los últimos 120 años (1900-2019). Este notable gradiente de nubosidad se observa en los tres observatorios, por lo que estimamos que es una tendencia regional, como se ve, asimismo, al comparar las figuras de diferenciales 6 y 8, que involucran a todos los pixeles de las imágenes. La tendencia fue establecida a través de la prueba de Mann-Kendall, con alto nivel de confianza (p-valúe < 0.0001, Alpha 0.05).

OBSERVATORIO	LATITUD º	LONGITUD º	ALTITUD m.	CLASE
Calar Alto	37.21 N	2.55 W	2167	Astrofísico
(Sierra Filabres)				
OSN	37.07 N	3.41 W	2880	Astrofísico
(Sierra Nevada)				
La Sagra	37.99 N	2.55 W	1550 -	Astrofísico
(Sierra Sagra)			1800	

Tabla 2. Las características de los observatorios del SE península Ibérica

Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. La serie de nubosidad en TCC promedio anual del Observatorio de Sierra Nevada (OSN, a), Calar Alto (b) y La Sagra (c) desde 1900 a 2019. Análisis de regresión y línea tendencial del TCC sobre Sierra Nevada, Calar alto y La Sagra



Fuente: ERA 20C y ERA 5 (ECMWF). Elaboración propia.

Fue necesario calibrar los valores de los datos de ERA 20C frente a ERA 5, sobre Calar Alto, permitiendo conocer el parámetro de normalización, usando como entradas los promedios anuales del TCC en que ambas series coinciden (1979-2010). La ecuación deducida con mejor ajuste lineal fue de <Era 5 = 1.08 ERA 20C> tuvo un coeficiente R^2 de 0.64 (Figura 18). Todo ello en base a las recomendaciones de la base de datos ERA 5 Copernicus, de considerar los datos de ERA 5 como los más recomendables hasta el momento, con propósitos de investigación.



Figura 18. Correlación cruzada para la construcción de la figura 17

Fuente: ERA 20C y ERA 5 (ECMWF). Elaboración propia.

6.2 LAS SERIES DE NUBOSIDAD DE CALAR ALTO

Puesto que un simple valor anual del TCC no nos informa con precisión del número de noches claras sobre un observatorio, efectuamos una correlación cruzada para el caso del observatorio de Calar Alto, como caso representativo de un gran observatorio en el SE de España, del que se dispone de información meteorológica de superficie, nocturna y diurna, e informes específicos efectuados por los astrónomos, que permiten cuantificar el número de noches claras anualmente. Esta información valiosa fue contrastada y confirmada, mediante el examen visual de las imágenes de MODIS a máxima resolución, en el periodo 2000 a 2017, asignando mediante criterio experto, si la noche fue clara o nubosa, para lo cual se dispuso de al menos dos estimaciones por noche (Figura 19). El TCC se extrajo mediante análisis de imágenes de satélites MODIS/TERRA y MODIS/AQUA.



Figura 19. Estimación cruzada del número de noches claras sobre Calar Alto (2000-2017) frente al TCC % de las imágenes del mismo periodo y sobre las coordenadas del observatorio

Fuente: Estación automática del observatorio astronómico de Calar Alto y TERRA/AQUA (NASA). Elaboración propia.

La estimación de noches claras se derivó de fuentes del propio observatorio y del criterio de inspección experta de las imágenes de TERRA y AQUA, en periodo nocturno y con datos diarios. Una noche clara se define, a efectos de esta figura 19, si aquella dispone de cielo despejado (en las imágenes a máxima resolución) en la zona central del cielo (entre 20 y 90° elevación sobre el horizonte), para lo cual se consideró que no hubiese nubes en un radio de 5 Km. sobre el píxel central de coordenadas del observatorio. Del gráfico se deduce una pendiente de +3.7 noches despejadas al año, con una disminución del 1% del TCC (Figura 20).



Figura 20. Cloud Cover TCC % de Calar Alto (1958-2022)

Fuente: ERA 40, periodo 1958 -1973 (ECMWF), estación meteorológica de Calar Alto (1973-2019), con un periodo de registro analógico no digitalizado entre 1973-1996, y MODIS/TERRA, periodo 2000-2022 (NASA). Elaboración propia.

Extrapolando y calibrando entre sí estas diversas fuentes de información climática, en los periodos citados y sus solapamientos, hemos deducido la evolución más probable del TCC % sobre el observatorio, para el día y la noche en su conjunto. Se observa una reducción significativa a lo largo del periodo de 63 años analizado, con oscilaciones anuales y decadales importantes, que no anulan la tendencia descendente. Este resultado fue previamente presentado por Moreno y Martínez, (2018), añadiéndose ahora los años que van del 2018 a 2022 (Figura 21).



Figura 21. Promedio anual de noches claras en el Observatorio de Calar Alto (1972-

Fuente: MODIS/TERRA y MODIS/AQUA (NASA), fuentes internas del propio observatorio (night report) de Calar Alto y datos meteorológicos de la estación del propio observatorio. Elaboración propia.

El número de noches observables o claras ha ido incrementándose en las últimas décadas en el observatorio de Calar Alto, pasando de un promedio de 180 noches en 1970 a > 200 en 2017 (Figura 21). Tendencia compatible con las figuras 5, 6, 7 y 8 para la región y presentados en este estudio. La serie de noches despejadas parece haber sufrido un incremento notable a partir de 2003, la cual se mantiene hasta la actualidad. La multiplicidad de fuentes que se han usado para construir la figura 21, refuerza la hipótesis de la progresiva disminución de la nubosidad en el área.



Figura 22. Promedio anual de noches claras por año en el Observatorio de Calar Alto, La Sagra y Sierra Nevada (2000-2022)

Fuente: Worldview Earthdata (NASA). Elaboración propia.

El análisis de imágenes nocturnas de NOAA se centró en la banda térmica infrarroja. La misma ofrece la temperatura de brillo superficial y permite discriminar, con claridad, las nubes de la superficie terrestre. La escala de píxel de imagen fue del orden de ~250 m. Este estudio se basó en el uso de máscaras superpuestas a las imágenes, discriminando la fracción cubierta de nubes en un área de 10 km de diámetro, centrada sobre cada uno de los observatorios. Se consideró despejada una noche con menos del 20% del área cubierta de nubes (Figura 22). Se analizaron un mínimo de dos imágenes por noche. Se observa una alta correspondencia de las figuras 20, 21 y 22, a pesar de proceder de fuentes diferentes. La tendencia al aumento de noches despejadas, desde principios de siglo, es inequívoca, habiendo pasado de unas ~190 en 2000 a ~215 en 2022, sobre el promedio conjunto de los tres observatorios (Figura 23). Salvo una brusca caída en 2006, el resto de las tres series climáticas mostró un ascenso monótono de tiempo claro, en sintonía con los cambios climáticos observados en el aumento de temperaturas medias y disminución de precipitaciones en este periodo estudiado, para la región del SE de la península Ibérica. Sierra Nevada parece gozar de una ligera ventaja respecto a los otros dos observatorios astronómicos, efecto quizá debido a su situación más al W y su mayor altitud. Desde una perspectiva universal, estos datos demuestran que el área aquí estudiada es muy competitiva frente a las demás áreas astronómicas consideradas como excelentes por la comunidad astronómica internacional (Chile, SW EE.UU, Tíbet, etc.). Además, de ello se muestra una rápida evolución sostenida hacia valores muy elevados de noches despejadas en las dos últimas décadas.



Figura 23. Promedios anuales de noches despejadas en el conjunto de los observatorios del SE de la península Ibérica (2000-2022)

Fuente: Worldview Earthdata (NASA). Elaboración propia.

6.3 AMPLIACION DEL EXTREMO SE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

La resolución de la figura 24 es de 0.1º /Píxel, aunque la base satelital se procesa a una resolución mucho mayor, de 1 Km./Píxel. Se puede observar que la situación de los observatorios de la zona está bastante favorecida, muy cerca de los mínimos del desierto de Tabernas, en el caso de Calar Alto, y de la situación general de las condiciones de nubosidad típicas reinantes en el SE de la península Ibérica en el caso de Sierra Nevada y del observatorio de La Sagra. Este último con una nubosidad media solo un poco superior a los de Sierra Nevada y Calar Alto. Se recomienda comparar la figura 24 con los resultados de la figura 7, para ver la gran similitud de resultados, si bien en la figura 7 se expresa el TCC como fracción de la unidad.



Figura 24. Promedio anual de nubosidad TCC (%) MODIS/TERRA (2010-2019) en el sector SE de la península ibérica

Fuente: Worldview Earthdata (NASA). Elaboración propia.

La discriminación de las nubes sobre la superficie del terreno o el mar es un asunto complejo (Ackerman et al., 2010) cuando se trata de extraer esta información de las imágenes de los satélites en órbita terrestre. Así, es necesario aplicar toda una serie de máscaras sobre la imagen original, a fin de obtener algo mínimamente utilizable como parámetro del TCC. De hecho, conforme se aumenta la resolución espacial más crecen las necesidades de correcciones ulteriores.

Nosotros hemos representado en la figura 24 la situación de nubosidad promedio porcentual para todo el sector SE de la península Ibérica, donde se ubican los observatorios de Sierra Nevada (OSN e IRAM), Calar Alto y La Sagra. La información proviene de los resúmenes mensuales de TERRA/MODIS entre los años 2010-2019. Se han considerado tanto imágenes diurnas como nocturnas. El reprocesado nuestro superpone una capa adicional con el TCC expresado en %.

A pesar de las muchas precauciones tomadas por los modelos de reducción de imágenes, aún persisten algunas anomalías evidentes, como es el campo gigantesco de invernaderos situado al SW de la ciudad de Almería (El Ejido), que al parecer no ha sido contemplado en el modelo de reducción de imagen de Ackerman et al. (2010).

7. DISCUSIÓN

Dentro de la literatura sobre nubosidad en observatorios astronómicos, hemos de destacar las contribuciones de los astrónomos como Cavazzani et al. (2011, 2013 y 2015), Suen et al. (2013), Erasmus (1997, 2005) y Erasmus y van Rooyen (2006), que han dedicado a este tema parte de su investigación. De ellos hemos extraído la conclusión acerca de la dificultad en la cuantificación de este problema. Estos trabajos, generalmente, se refieren a enclaves o regiones muy concretas, y tampoco suelen abarcar periodos de tiempo mayores a una década. Por otro lado, el utilizar unas imágenes u otras de tipo satelital, datos de superficie, etc., conduce a estimaciones bastante diferentes. Frente a esto hemos buscado bases de datos e imágenes de muy amplia base temporal (desde 1900-2019) y resolución espacial aceptable (0,25°) para ERA 20 C y ERA 5, y (0,1°) para MODIS/TERRA, desde el 2000 a 2019. Con ello hemos generado una cartografía temática propia, sobre los índices del TCC en regiones astronómicas muy significativas, que se remonta hasta principios del Siglo XX. Por ello nuestra visión, entendemos es más globalizadora, temporal y espacialmente. Como ejemplos mostramos un estudio de casos de observatorios astronómicos del SE de la península Ibérica, con un análisis temporal preciso del TCC anualizado, que cubre el periodo 1900-2022, del cual no conocemos ningún precedente.

Por otra parte, una buena parte de la literatura consultada proviene de publicaciones geofísicas o climatológicas, donde la multiplicidad de técnicas y objetivos científicos propuestos por los autores, a la vez que definiciones y "jergas" específicas de cada disciplina, hacen difícil una sistematización, o al menos una "adecuación" para el caso de observatorios astronómicos, ciertamente específico. Las bases de datos, archivos de imágenes de satélite y largos periodos de tiempo en estaciones de superficie, son los más idóneos para intentar dar una respuesta creíble a este entorno, tan difuso y cambiante de la nubosidad sobre puntos muy concretos. Las observaciones meteorológicas de las estaciones "in situ", junto a las imágenes satelitales reanalizadas, y a escalas de 0.25° y 0.1° por píxel, o aún menores, son claves para una correcta evaluación del TTC, o nubosidad total, en las áreas con ausencia de estaciones de superficie (Wielicki y Parker, 1992); y además es más fiable en tareas comparativas entre lugares y continentes muy distintos.

Hay que tener en cuenta, además, una serie de imponderables, que inciden en nuestra pretensión expositiva, marcadamente espacial y a lo largo de más de un siglo. Entre algunos de los trabajos consultados sobre el aspecto de datos seculares, o multidecadales, cabe señalar a Henderson-Sellers (1992), el cual encuentra un aumento

81

de la nubosidad a lo largo del siglo XX en la mayor parte de regiones del mundo, y en la península Ibérica, en desacuerdo con nuestros resultados actuales; no obstante, sus estimaciones se ha demostrado, después, que estaban muy influidas por la relativa alta nubosidad de las décadas 50, 60 y 70, y por la falta de homogeneidad de las fuentes y la ausencia significativa de las aportaciones de los satélites en su época. También en Sánchez-Lorenzo et al. (2012), You et al. (2014), Calbo et al. (2016) y Diodato et al. (2019) hemos encontrado una serie de cambios, detectados por los autores, hacia un mayor calentamiento, una disminución de la nubosidad y la presencia de ciclos decadales o aún seculares en las tendencias de la variación de la radiación y la nubosidad. Estos ciclos o periodos muy largos, de 30 años o más, están mal entendidos, siendo muy importantes en nuestro estudio.

Tampoco queda claro si el trabajar con pixeles del orden de 1 Km. o menor, resulta satisfactorio, dada la influencia de la de la orografía local sobre la formación de nubosidad "de evolución diurna", la cual tiende a distorsionar los valores reales de TCC verdaderamente aplicables a un observatorio astronómico que, por definición, trabaja durante la noche, excepto los solares y los radioastronómicos. Así, mapas de muy alta resolución, como los de Royé et al. (2019) o Wilson y Jetz (2016), construidos con máscaras de nubes que no consideran el efecto de los brillos artificiales (glints), o la distorsión del hielo y la nieve, resultando de todo ello algo más bien semejante a mapas de relieve, que a mapas de nubosidad, al menos en regiones de latitudes medias y altas. Por ello, entendemos, tienen solo una aplicación muy limitada para nuestro propósito, pues, por un lado, durante la noche, los observatorios situados a más de 2000 metros de altitud suelen estar libres de nubes bajas y su cielo está claro, aunque esté nevado, mientras que durante el mediodía y la tarde el cielo se cubre con frecuencia de nubosidad cumuliforme, que en gran medida enmascara la realidad del TCC global del observatorio astronómico a gran altitud.

Una mejora es la propuesta de King (2013), el cual encuentra diferencias significativas entre los datos aportados por MODIS/TERRA y MODIS/AQUA, al trabajar con alta resolución espacial. Sugiere construir máscaras de nubosidad específicas para el día y la noche que tengan en cuenta diversas variables atmosféricas y superficiales, como los reflejos del Sol y la nieve. La lucha de los modelizadores de máscaras de nubosidad ha sido constante desde los inicios del ISSCP (International Satellite Cloud Climatology Project) en 1983 (Schieffer y Rossow, 1983; Rossow y Schieffer, 1991 y 1999). Finalmente, los datos más recientes, y elaborados sobre nubosidad, son descritos por Young et al. (2018), dentro del contexto del ISCCP.

Los observatorios astronómicos del SE de la península Ibérica muestran una tendencia a la disminución de ~10% del TCC, en poco más de un siglo, lo que puede

extenderse a la zona del Mediterráneo occidental, lo que es equivalente a -1% decadal. Este hecho se demuestra sin ambigüedad, en las gráficas temporales de los observatorios de la península Ibérica (ver figuras 2, 19, 20, 21 y 22) y en las figuras 7 a 11 sobre los promedios, tendencias y la expansión de la línea del 0.4 TCC. Esta línea avanzó unos 4 grados hacia el norte, en detrimento de la nubosidad existente a principios del siglo XX, que se situaba entre el 0.45 y el 0.5 TCC. Esta disminución del TCC se extiende por la península Ibérica y el Mediterráneo occidental, así como en regiones del SW de EE. UU, América del Sur y Asia central.

En nuestro trabajo también encontramos un bajo promedio TCC en el área Mediterránea, en todos los contextos estudiados, y el desplazamiento hacia latitudes más altas de las nubosidades promedio, respecto a la primera parte del siglo XX, lo cual parece ser una constante en toda la cuenca del Mediterráneo (Sánchez-Lorenzo et al. 2012; Enríquez y Sánchez-Lorenzo, 2016). Caso que podemos aplicar también al SW de EE. UU y N. de México (Carrasco et al. 2017). Existe también una tendencia hacia una disminución del TCC en muchas otras áreas de interés astronómico, como el Tíbet chino (You et al., 2014).

La situación geográfica de los observatorios importantes de todo el mundo, creemos que está muy optimizada respecto al TCC, y que solo caben avances marginales alrededor de los emplazamientos actuales. Así, los observatorios situados en el norte de Chile no parecen haber experimentado grandes variaciones del TCC promedio, a lo largo del periodo 1900-2010, al menos a tenor de los mapas generados en este trabajo. No obstante, la línea del 0.4 se ha expandido considerablemente en los últimos 40 años en la zona oriental y central de Chile y W de Argentina (Figura 13). Por tanto, también en el hemisferio sur hay zonas donde se ha expandido esta zona de baja nubosidad hacia latitudes más altas y hacia el interior continental.

En conjunto, se aprecia una mayor disminución de la nubosidad en las áreas templadas del hemisferio norte, respecto al hemisferio sur, donde se aprecian cambios menores en las zonas de los observatorios del norte de Chile, Sudáfrica o Australia, a lo largo del último siglo. Aunque atendiendo a los últimos 40 años de ERA 5 (Figuras 12 a 16) sobre la línea del 0.4 del TCC, podemos advertir una disminución generalizada de la nubosidad en las zonas templadas y cercanas a los trópicos de ambos hemisferios, con presencia de observatorios importantes. No se encontraron variaciones significativas, sin embargo, en los archipiélagos de Canarias y Hawái, dado que la nubosidad sobre las áreas de los océanos donde se ubican parece haber experimentado menos cambios. Debemos indicar que, para islas tan pequeñas, la escala de píxel de este trabajo no refleja fielmente las condiciones de nubosidad nocturna sobre las partes altas de dichas islas, donde están ubicados los observatorios astronómicos.

Los estudios de detalle muestran algunas variaciones decadales sobre áreas de montaña al ser observadas mediante satélites de la serie NOAA, MODIS/AQUA y MODIS/TERRA, en resoluciones de 0.1º píxel. Pero en un contexto general, con observaciones completas de superficie y a largo plazo, la resolución de la base ERA 5 (40 años) y ERA 20 C (110 años), ambas de 0.25º por píxel, cumplen los propósitos de nuestro estudio, que requerían de una base de tiempo muy larga, donde los cambios climáticos son ostensibles y con tendencias significativas claramente observables. Este resultado solo está parcialmente de acuerdo con los de Curto (2009) para el observatorio del Ebro, o los de Perdigão et al. (2016) y Sánchez-Lorenzo et al. (2012 y 2017), quienes encuentran variaciones de la tendencia de la nubosidad en España, desde los años 70, pero con unos máximos relativos en torno a la década de los 50-70 del siglo pasado. Nosotros, con la base ERA 20 C y ERA 5 (1900-2019) tenemos una tendencia al descenso del TCC en el sur peninsular de carácter continuado. Aún así, la nubosidad pareció aumentar en las décadas de los 50 al 70, donde nosotros solo observamos un incremento relativo, que no compromete la tendencia secular. Así, en nuestro estudio de casos particulares de los observatorios del SE de España (Figura 17), la evolución del TCC ha sido descendente, desde comienzos del siglo XX, con los correspondientes periodos de oscilación superpuestos. Aunque nosotros hemos corregido los datos anuales de ERA 20 C, en un factor de 1.08 respecto a la ERA 5, mediante análisis de regresión en el periodo de 30 años de coincidencia de ambas bases (1979-2010), aunque su aplicación no altera la tendencia de la serie en ningún supuesto.

En un plano cuantitativo, hemos mostrado como a través de un modelo de correlación entre el TCC derivado de satélites, con alta resolución espacial, y el criterio experto, sobre las bases de tipo climático del observatorio de Calar Alto (Figuras 17 a 22), nos permite extrapolar el número de noches claras de calidad astronómica, a cualquier otro observatorio del mundo, conociendo su TCC promedio. El mejor ajuste señala un gradiente de 3.7 noches claras más por cada 1% de disminución del TCC. Esto, creemos, es un valor añadido en la planificación y las tareas de los observatorios existentes, o planeados para el futuro, en la zona estudiada.

7. CONCLUSIONES

7.1 HECHOS RELEVANTES ENCONTRADOS EN ESTE TRABAJO

La disminución de la nubosidad promedio, respecto a los valores de principios del siglo XX, de los observatorios de la península Ibérica y del Mediterráneo occidental, hace que nuestros observatorios sean realmente competitivos frente a las regiones más idóneas del planeta. Más aún, en un análisis tendencial, el sur de España tiende a una notable disminución de la nubosidad y el aumento de noches observables: uno de los parámetros más codiciado por los astrónomos y las instituciones científicas. El grado de mejora de las condiciones de observación es más que notable, si comparamos esta evolución con la del resto de áreas de gran desarrollo en infraestructuras astronómicas, como son el SW de EE.UU, norte de Chile y Asia central, en un contexto universal.

Las imágenes de satélite de alta resolución espacial, combinada con los registros meteorológicos de los propios observatorios astronómicos, permiten inferir y prever, de forma mucho más segura, las condiciones de nubosidad de muchos otros observatorios en latitudes templadas y tropicales.

En nuestro trabajo, hemos comprobado que la línea del TCC del 0.4 es particularmente sensible y un buen indicador de las tendencias decadales y seculares de desplazamientos de las fronteras del TCC. Este estudio muestra la progresiva extensión de la línea del 0.4 del TCC alrededor de los grandes desiertos templados y tropicales y su área de influencia, pero a la vez un relativo aumento de la nubosidad en las áreas centrales de dichos desiertos, afectando a una extensión de muchos millones de Km². Esta variación, aparentemente lineal, deberá ser estudiada más en profundidad en el futuro, conforme tengamos bases más fiables a más largo plazo como ERA 5 y MODIS TERRA/AQUA.

De nuestro estudio se desprende que existen aún lugares de muy bajo TCC y rápida expansión de la línea del 0.4, sin ningún observatorio relevante; y otras donde se ha instaurado en las últimas décadas un régimen de nubosidad muy bajo, con TCC<0.4, por lo que es deseable abordar futuros estudios en el contexto de futuras prospecciones de prueba de sitios, "site testing", para nuevos observatorios astronómicos y radioastronómicos.

La península Ibérica, en especial el sector SE, ha experimentado un aumento muy notable de noches despejadas por año (> 215) disponibles para observación astronómica.

El contexto de una nubosidad total promedio anual (TCC) decreciente es consistente con la tendencia actual de calentamiento global, al menos a escala regional
y local, tal como se observa, sin lugar a duda, desde imagen satelital como desde los registros en tierra de las estaciones climatológicas.

BIBLIOGRAFÍA

Aceituno, J., Sánchez, S. F., Aceituno, F. J., Galadí-Enríquez, D., Negro, J. J., Soriguer, R. C., & Gomez, G. S. (2011). An All-Sky Transmission Monitor: ASTMON. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 123(907), 1076-1086. doi: 10.1086/661918

Ackerman, S., Frey, R., Strabala, K., Liu, Y., Gumley, L., Baum, B., & Menzel, P. (2010). *Discriminating clear-sky from cloud with MODIS algorithm theoretical basis document (MOD35)*. Recuperado de https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod06.pdf

Adhikari, L., Wang, Z., & Liu, D. (2010). Microphysical properties of Antarctic polar stratospheric clouds and their dependence on tropospheric cloud systems. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115(7). doi: 10.1029/2009JD012125

Andersen, M. I., Pedersen, K., & Sørensen, A. N. (2009). Site testing on the Greenland Ice Cap. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 15, 634-635. doi: 10.1017/s1743921310010847

Bao, S., Letu, H., Zhao, J., Shang, H., Lei, Y., Duan, A., Shi, J. (2019). Spatiotemporal distributions of cloud parameters and their response to meteorological factors over the Tibetan Plateau during 2003-2015 based on MODIS data. *International Journal of Climatology*, *39*(1), 532-543. doi: 10.1002/joc.5826

Beckers, J. M., Breedlove, W. O., Devegvar, P. G. N., Johansen, E. E., Gilliam, L. B., Mann, G. R., ... Demastus, H. L. (1979). The night sky conditions at the Sacramento Peak Observatory. II - Cloud cover, seeing, and precipitable water. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 91(544), 857-860. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40677620

Birkle, K., Elsasser, H., Neckel, Th.and Schnur, G. (1976). Seeing Measurements in Greece, Spain, Southwest Africa, and Chile. Astronomy and Astrophysics, 46, 397-406. Recuperado de https://adsabs.harvard.edu/full/1976A%26A....46..397B

Burton, M. G. (2006). Special session 7 astronomy in Antartica. *Highlights of Astronomy*, 14, 683-685. doi: 10.1017/S1743921307012252

Calbó, J., Badosa, J., González, J. A., Dmitrieva, L., Khan, V., Enríquez-Alonso, A., & Sanchez-Lorenzo, A. (2016). Climatology and changes in cloud cover in the area of the Black, Caspian, and Aral seas (1991-2010): A comparison of surface observations with satellite and reanalysis products. *International Journal of Climatology*, *36*(3), 1428-1443. doi: 10.1002/joc.4435

Carrasco, E., Avila, R., Erasmus, A., Djorgovski, S. G., Walker, A. R., & Blum, R. (2017). A satellite survey of cloud cover and water vapor in the Southwestern USA and Northern Mexico. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 129(973). doi: 10.1088/1538-3873/129/973/035005

Cavazzani, S., Ortolani, S., Zitelli, V., & Maruccia, Y. (2011). Fraction of clear skies above astronomical sites: A new analysis from the GOES12 satellite. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 411(2), 1271-1283. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.17766.x

Cavazzani, S., & Zitelli, V. (2013). Satellite characterization of four interesting sites for astronomical instrumentation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 429(3), 1849-1857. doi: 10.1093/mnras/sts311

Cavazzani, S., Zitelli, V., & Ortolani, S. (2015). Long-term analysis of clear sky at astronomical sites: A comparison between polar and geostationary satellites. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452(2), 2185-2194. doi: 10.1093/mnras/stv1319

Clark, J. V., & Walsh, J. E. (2010). Observed and reanalysis cloud fraction. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115(23). doi: 10.1029/2009JD013235 Curto, J. J., Also, E., Pallé, E., & Solé, J. G. (2009). Sunshine and synoptic cloud observations at Ebro observatory, 1910-2006. *International Journal of Climatology*, 29(14), 2183-2190. doi: 10.1002/joc.1841

Diodato N, Büntgen U, Bellocchi G. (2019). Mediterranean winter snowfall variability over the past millennium. *International Journal of Climatology*, 39, 384-394. doi: 10.1002/joc.581

Enriquez-Alonso, A., Sanchez-Lorenzo, A., Calbó, J., González, J. A., & Norris, J. R. (2016). Cloud cover climatologies in the Mediterranean obtained from satellites, surface observations, reanalyses, and CMIP5 simulations: validation and future scenarios. *Climate Dynamics*, 47(1-2), 249-269. doi: 10.1007/s00382-015-2834-4

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMW). ERA-20C, Monthly Means of Daily Means. Recuperado de https://appdev.ecmwf.int/datasets/data/era20c-moda/levtype=sfc/type=an/

CAHA (2000). Consulting weather statistics. Recuperado de http://www.caha.es/guindos/WSTAT/wstat.htm

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMW). Reanalysis v5 (ERA5). Recuperado de https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5

Erasmus, D. A. (1986). Meteorological Conditions Affecting Observing Quality on Mauna Kea. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 98, 254-259. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40678725?seq=6

Erasmus, D. A., & Peterson, R. (1997). The Feasibility of Forecasting Cirrus Cloud Cover and Water Vapor Above Telescope Sites in Northern Chile. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 109(732), 208-2014. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40680884

Erasmus, D. A. (2005). An overview of recent site survey studies conducted for ELT projects: Aerial surveys and site comparisons of cloud cover and water vapour using satellite data. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 232, 510-513. doi: 10.1017/S1743921306001244

Erasmus. D. A., & van Rooyen, R. (2006). A satellite survey of cloud cover and water vapor in northwest Africa and southern Spain. Proceedings SPIE, 6267. doi: 10.1117/12.66949

Falvey, M., & Rojo, P. M. (2016). Application of a regional model to astronomical site testing in western Antarctica. *Theoretical and Applied Climatology*, 125(3-4), 841-862. doi: 10.1007/s00704-016-1794-x

Gil, V., Gaertner, M. A., Gutierrez, C., & Losada, T. (2019). Impact of climate change on solar irradiation and variability over the Iberian Peninsula using regional climate models. *International Journal of Climatology*, *39*(3), 1733-1747. doi: 10.1002/joc.5916

Haas, M. R., & Pfister, L. (1998). A High-Altitude Site Survey for SOFIA. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 110(745), 339-364. doi: 10.1086/316132

Harris, H. C., & Vrba, F. J. (1992). Seeing measurements and observing statistics at the U.S. Naval Observatory, Flagstaff Station. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 104, 140-145. doi: 10.1086/132969

He, Y., Wang, K., Zhou, C., & Wild, M. (2018). A Revisit of Global Dimming and Brightening Based on the Sunshine Duration. *Geophysical Research* Letters, 45(9), 4281-4289. doi: 10.1029/2018GL077424

Henderson-Sellers, A. (1992). Continental cloudiness changes this century. *GeoJournal*, 27(3), 255-262. doi: 10.1007/BF02482666

Hentgen, L., Ban, N., Kröner, N., Leutwyler, D., & Schär, C. (2019). Clouds in Convection-Resolving Climate Simulations Over Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(7), 3849-3870. doi: 10.1029/2018JD030150

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2023): ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). doi: 10.24381/cds.f17050d7.

Hidayat, T., Mahasena, P., Dermawan, B., Hadi, T. W., Premadi, P. W., & Herdiwijaya, D. (2012). Clear sky fraction above Indonesia: An analysis for astronomical site selection. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427(3), 1903-1917. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.22000.x

King, M. D., Platnick, S., Menzel, W. P., Ackerman, S. A., & Hubanks, P. A. (2013). Spatial and temporal distribution of clouds observed by MODIS onboard the terra and aqua satellites. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *51*(7), 3826-3852. doi: 10.1109/TGRS.2012.2227333

Kotarba, A. Z. (2015). Evaluation of ISCCP cloud amount with MODIS observations. *Atmospheric Research*, 153, 310-317. doi: 10.1016/j.atmosres.2014.09.006

McAdíe, A. (1920). Records of night cloudness for astronomers, PASP, 32, 300-306. Mallama, A., & Degnan, J. J. (2002). A Thermal Infrared Cloud-mapping Instrument for Observatories Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 114. 913-917. doi: 10.1086%2F341714 Molnar, G., & Coakley, J. A. (1985). Retrieval of cloud cover from satellite imagery data: a statistical approach. *Journal of Geophysical Research*, *90*(D7), 12960-12970. doi: 10.1029/JD090iD07p12960

Moreno, J. & Martínez-Ibarra, E. (marzo 2018). "Construcción de una serie climática de nubosidad en una montaña mediterránea: el caso de Calar Alto (Sierra de Los Filabres, Almería)". En M. Titos-Martínez, T. Luque-Martínez, & J.M. Navarro Llena (Eds.), Congreso CIMAS, Granada, España.

NASA. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Extraído de https://modis.gsfc.nasa.gov/data/

Nicholson, S. B. (1932). Sun-Spots and the Weather, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 44(260), 230-237. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40668939

Perdigão, J. C., Salgado, R., Costa, M. J., Dasari, H. P., & Sanchez-Lorenzo, A. (2016). Variability and trends of downward surface global solar radiation over the Iberian Peninsula based on ERA-40 reanalysis. *International Journal of Climatology*, 36(12), 3917-3933. doi: 10.1002/joc.4603

Rossow, W. B., & Schiffer, R. A. (1991). ISCCP cloud data products. *Bulletin - American Meteorological Society*, 72(1), 2-20. doi: 10.1175/1520-0477(1991)072<0002:ICDP>2.0.CO;2

Rossow, W. B., & Schiffer, R. A. (1999). Advances in Understanding Clouds from ISCCP. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(11), 2261-2287. doi: 10.1175/1520-0477(1999)080<2261:AIUCFI>2.0.CO;2

Royé, D., Lorenzo, N., Rasilla, D., & Martí, A. (2019). Spatio-temporal variations of cloud fraction based on circulation types in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 39(3), 1716-1732. doi: 10.1002/joc.5914

Sanchez-Lorenzo, A., Calbó, J., & Wild, M. (2012). Increasing cloud cover in the 20th century: review and new findings in Spain. *Climate of the Past Discussions*, 8(2), 1133-1167. doi: 10.5194/cpd-8-1133-2012

Sanchez-Lorenzo, A., Brunetti, M., Calbó, J., & Martin-Vide, J. (2007). Recent spatial and temporal variability and trends of sunshine duration over the Iberian Peninsula from a homogenized data set. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112(20). doi: 10.1029/2007JD008677

Sanchez-Lorenzo, A., Enriquez-Alonso, A., Calbó, J., González, J. A., Wild, M., Folini, D., ... Vicente-Serrano, S. M. (2017). Fewer clouds in the Mediterranean: Consistency of observations and climate simulations. *Scientific Reports*, 7. doi: 10.1038/srep41475

Schiffer, R. A., & Rossow, W. B. (1983). The International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP): the first project of the World Climate Research Programme. *Bulletin -American Meteorological Society*, 64(7), 779-784. doi: 10.1175/1520-0477-64.7.779

Steinbring, E., Carlberg, R., Croll, B., Fahlman, G., Hickson, P., Ivanescu, L., ... Schoeck, M. (2010). First Assessment of Mountains on Northwestern Ellesmere Island, Nunavut, as Potential Astronomical Observing Sites. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 122(895), 1092-1108. doi: 10.1086/656285

Tsay, W.-S., Bagnuolo, W. G., Jr., McAlister, H. A., White, N. M., & Forbes, F. F. (1990). Anderson Mesa, Arizona, as a site for an optical array. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 102, 1339-1350. doi: 10.1086/132772

Storey, J. W. V. (2012). Review of antarctic astronomy. In *Proceedings of the International Astronomical Union*, 8, 1-5. doi: 10.1017/S1743921312016596

Suen, J. Y., Fang, M. T., & Lubin, P. M. (2014). Global distribution of water vapor and cloud cover-sites for high-performance THz applications. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 4(1), 86-100. doi: 10.1109/TTHZ.2013.2294018

Wielicki, B. A., & Parker, L. (1992). On the determination of cloud cover from satellite sensors: the effect of sensor spatial resolution. *Journal of Geophysical Research*, *97*(D12). doi: 10.1029/92jd01061

Wild, M. (2012). Enlightening global dimming and brightening. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *93*(1), 27–37. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00074.1

Wild, M., Folini, D., Henschel, F., Fischer, N., & Müller, B. (2015). Projections of longterm changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. *Solar Energy*, 116, 12-24. doi: 10.1016/j.solener.2015.03.039

Wilson AM, Jetz W (2016) Remotely Sensed High-Resolution Global Cloud Dynamics for Predicting Ecosystem and Biodiversity Distributions. PLoS Biol 14(3): e1002415. doi:10.1371/journal.pbio.1002415

NASA. Nasa Worldview. Recuperado de https://worldview.earthdata.nasa.gov/

You, Q., Jiao, Y., Lin, H., Min, J., Kang, S., Ren, G., & Meng, X. (2014). Comparison of NCEP/NCAR and ERA-40 total cloud cover with surface observations over the Tibetan Plateau. *International Journal of Climatology*, 34(8), 2529-2537. doi: 10.1002/joc.3852 Young, A. H., Knapp, K. R., Inamdar, A., Hankins, W., & Rossow, W. B. (2018). The International Satellite Cloud Climatology Project H-Series climate data record product. *Earth System Science Data*, 10(1), 583-593. doi: 10.5194/essd-10-583-2018

Zhao C, Chen Y, Li J, et al. Fifteen-year statistical analysis of cloud characteristics over China using Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer observations. *International Journal of Climatology*, 39, 2612-2629. doi: 10.1002/joc.5975

CAPITULO II

AEROSOLES Y EXTINCIÓN ATMOSFÉRICA

INCIDENCIA SOBRE OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS A NIVEL PLANETARIO Y ESTUDIO DE CASOS EN LA PENÍNSULA IBÉRICA

1 OBJETIVOS

El objetivo general de este capítulo es analizar y mostrar el contenido de aerosoles en forma de mapas y tablas a nivel global para las regiones mundiales con interés astronómico. Para cubrir este objetivo general nos hemos apoyado también en el análisis bibliográfico como aproximación para abordar el problema de los aerosoles atmosféricos en la observación astronómica.

Por otro lado, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

Analizar las condiciones atmosféricas respecto al contenido de aerosoles de la región que abarca la península Ibérica, Canarias, norte de África y el sector central sur de Europa. Dentro de esta región se seleccionan varios observatorios prototipo para analizar sus datos.

Estudiar las variaciones altitudinales de la concentración de polvo y aerosoles sobre diversos observatorios astronómicos de nuestra región.

Examinar los contenidos en aerosol en Sierra Nevada (España) para una serie temporal representativa.

Valorar la incidencia de las erupciones volcánicas y grandes incendios en el grado de aptitud de las condiciones atmosféricas para la observación astronómica.

2 INTRODUCCIÓN

1.1 CONCEPTOS GENERALES

Las pequeñas partículas, sólidas y liquidas, suspendidas en la atmósfera son llamadas aerosoles. Entre los ejemplos de aerosoles naturales tenemos el aire cargado de polvo, las sales marinas, las cenizas volcánicas; y entre las causas artificiales y antropogénicas, el humo de los incendios, la polución emitida por fábricas y vehículos, La descripción del comportamiento de dichas partículas está gobernada por la "dispersión de Mie". Dependiendo de su tamaño, tipo y localización, los aerosoles pueden calentar o enfriar la superficie terrestre. Pueden acelerar la formación de nubes, o inhibirla, en otros casos. Su inhalación por personas y animales puede ser perjudicial en ciertas afecciones respiratorias.

Los aerosoles atmosféricos juegan un papel importante en el balance radiativo de la Tierra. Sin embargo, los aerosoles son una de las mayores fuentes de incertidumbre en el modelado climático. El forzamiento radiativo por aerosoles puede explicar la diferencia entre las tendencias observadas y modeladas en la temperatura global promedio. De hecho, la interacción con la radiación solar y terrestre por los aerosoles perturba el balance radiativo a través de la dispersión y absorción de la luz solar. Al actuar como núcleos de condensación de nubes o núcleos de hielo, las partículas de aerosol también modifican la microfísica de las nubes y, por lo tanto, pueden cambiar sus propiedades radiativas. El efecto directo de los aerosoles en el balance de radiación de la Tierra y el efecto indirecto de los aerosoles en el albedo de las nubes pueden tener un efecto de enfriamiento, que podría contrarrestar el calentamiento, debido al aumento de la concentración de dióxido de carbono. Las estimaciones actuales del forzamiento de los aerosoles en el clima global oscilan entre menos 0,6 vatios por metro cuadrado y 4.0 watios por metro cuadrado, cuando se combinan los efectos directos e indirectos de los aerosoles de sulfato y los aerosoles de quema de biomasa. También se sospecha que el polvo que se origina en el cambio de área local es un importante forzamiento climático. El efecto aerosol directo se debe a la reflexión directa de la luz solar al espacio por partículas de aerosol; mientras que el efecto indirecto es por la modificación de las propiedades de la nube, que a su vez modifica el balance radiativo. Estudios recientes muestran la importancia de incluir aerosoles en los modelos climáticos, para observar y medir la influencia humana en la química atmosférica y el cambio climático.

El espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS), a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA, se utiliza para monitorear, diariamente, el

92

espesor óptico del aerosol (proporcional a la carga total del aerosol) y la distribución del tamaño (integrado en la columna vertical) del aerosol ambiental (no perturbado), en la mayor parte del mundo (océanos y las partes húmedas de los continentes). MODIS se utiliza para monitorear la concentración de masa de los aerosoles, las propiedades ópticas y el forzamiento radiativo.

Sobre la Tierra, el espesor óptico del aerosol se deriva utilizando el enfoque de objetivo oscuro, y el método se limita a partes húmedas (y algunas semiáridas) de los continentes, excluyendo la nieve y la capa de hielo. Los algoritmos de productos de datos de aerosoles aprovechan el amplio rango espectral y la alta resolución espacial de MODIS, con cobertura global diaria. Estas características, únicas de MODIS, permiten un excelente rechazo de las nubes, al tiempo que mantienen estadísticas significativas de píxeles libres de nubes. El amplio rango espectral del instrumento permite una derivación sofisticada de la distribución del tamaño del aerosol sobre el océano, y la identificación eficiente de píxeles con cobertura superficial oscura sobre la tierra.

La información de aerosoles de MODIS se utiliza para: estudiar la climatología de aerosoles; para monitorear las fuentes y sumideros de tipos específicos de aerosoles (como sulfatos y otros aerosoles industriales/urbanos y aerosoles de quema de biomasa); para servir de insumo en la modelización climática y para la detección de las huellas dactilares del cambio climático antropogénico; y para realizar correcciones atmosféricas de reflectancia superficial de teledetección sobre la tierra. Estas imágenes se producen utilizando el "the dark target/Deep blue merged product", descrito en: https://darktarget.gsfc.nasa.gov/content/what-dark-targetdeep-blue-merged-product.

El perjuicio de los aerosoles para la observación astronómica, cuando sobrepasan unas determinadas concentraciones, deriva de una perdida de sensibilidad y estabilidad de los detectores ópticos empleados en cualquier investigación, máxime si se trata de objetos de débil emisión, como son las estrellas y demás cuerpos celestes lejanos. Hay unas determinadas localizaciones sobre la superficie terrestre que están notablemente libres de aerosoles y, por ende, son las más favorables para la instalación y funcionamiento de cualquier observatorio astronómico. De una manera general, trataremos de acercarnos a ellas en este capítulo.

El diagrama de flujo de la información del capítulo de aerosoles (Figura 25) sigue un esquema descendente. Inicialmente tenemos tres grandes fuentes de información: la revisión bibliográfica, un estudio de casos propios y una colección de imágenes y datos de bases AERONET y satélites como MODIS/TERRA. Ayudados por una potente herramienta de mapeado como Q-GIS, y siguiendo una metodología estandarizada, en nuestro estudio se procede a la confección de una serie de mapas a escala universal y regional, del efecto de los aerosoles en la transparencia atmosférica, que vendrán expresados en un índice apropiado AOD (Aerosol Optical Depth). Tras una discusión que tiene en cuenta lo publicado en la literatura, se procede a contrastarlo con nuestros resultados y dar forma a un documento final con conclusiones.



Figura 25. Diagrama de flujo del capítulo aerosoles



3.1 ESPECIFICACIONES SOBRE FUENTES DE AEROSOLES

La fuente de mayor precisión para el estudio del contenido de aerosoles tal vez sea https://aeronet.gsfc.nasa.gov/. Aquí podemos encontrar una red mundial de estaciones de medida en superficie, a veces en los mismos lugares de los observatorios astronómicos importantes, o muy próximos a éstos, de forma que sus datos son asimilables a estos lugares con observatorios próximos. Es una base con información homogénea, algo de agradecer, con posibilidades gráficas y estadísticas interesantes. Aparte del AOD se puede calcular el parámetro Ángstrom y el PWV; este último será expuesto en el capítulo correspondiente al vapor de agua. En cualquier caso, la longitud temporal de algunas de las estaciones de montaña más elevadas es corta, o de muy pocos meses o años de extensión.

Los mapas generados por observaciones diarias del "MODIS", que está montado en los satélites de la NASA, TERRA y AQUA, es de máxima utilidad, para estudiar el fenómeno globalmente. La máxima resolución es de 0. 1º por píxel. Se puede consultar en:

https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MODAL2_M_AER_OD.

La cantidad promedio mensual de aerosoles y de las demás variables atmosféricas puede también ser calculada para toda la superficie terrestre y descargarse gratuitamente en distintos formatos de compresión y tipos de archivos digitales. Para estudios muy específicos y a nivel de investigación, la NASA permite descargar ficheros tipo RAW sin corregir o de nivel 1, en este caso con una mínima corrección en la base datos, y con la máxima resolución. La información puede consultarse en: https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/)https://modis.gsfc.nasa.gov/d ata/

Para una escala de trabajo de 0. 5º píxel, adecuada para los mapas de nuestro estudio de casos, podemos descargar ficheros desde 1980 hasta la actualidad partir de: https://goldsmr4.gesdisc.eosdis.nasa.gov/opendap/MERRA2_MONTHLY/M2TMNXLN D.5.12.4/contents.html.

Estos satélites miden el espesor óptico de los aerosoles (Aerosol Optical Depth) a lo largo de un paso vertical en la Atmósfera hasta la superficie. Están basadas en el hecho de que las partículas de aerosol cambian la forma en que la luz del sol se refleja y absorbe en las bandas visible e infrarroja. Un espesor óptico "Óptical Thickness" de menos de 0.1 significa la presencia de cielos muy transparentes, con un máximo de visibilidad de hasta más de 100 Km. Mientras que un valor de 1 o cercano indicaría cielos muy contaminados por partículas, con un aspecto neblinoso en la visión de los objetos, aún los situados a muy pocos km del observador.

Las cantidades elevadas de aerosol en la Atmósfera están relacionadas con hechos regionales y procesos atmosféricos a lo largo del año. Las mayores concentraciones sobre América del Sur ocurren de julio a septiembre, y está provocada por las quemas de restos de vegetación, así como los incendios en la Amazonia, aprovechando la estación seca. El mismo comportamiento se observa en África central y Sudáfrica, de junio a septiembre, y en el Asia monzónica, en este caso de enero a abril.

En muchos otros casos la cantidad de aerosoles está ligada a la presencia de desiertos polvorientos sobre el norte de África, península Arábiga y desiertos del interior de Asia. También el exceso de ciertas actividades industriales, en India y China, dan cuenta de una extraordinaria cantidad de aerosoles en la Atmósfera durante gran parte del año.

El valor de los mapas de la variable AOD se refiere únicamente a la extinción provocada por los aerosoles y partículas, y ya están restados los efectos de extinción

causados por el aire (Dispersion de Rayleigh), por el ozono O_3 , por el vapor de agua H_2O , por el CO_2 y por el Metano CH_4 ; entre otros componentes menores de la Atmósfera. Sin embargo, los coeficientes de extinción astronómicos, como los del sistema de Jonhson, ya tienen en cuenta de forma integral las contribuciones de estos componentes, que se añaden a las del polvo atmosférico, definidas en AOD. Por tanto, son conceptos diferentes a la hora de determinar la extinción atmosférica (ver glosario de términos).

El "Aerosol Optical Depth" (AOD) en sus análisis de tipo mensual proviene de la colección de datos M2IMNXGAS (or instM_3d_gas_Nx). Es una representación bidimensional mensual de lo que en realidad es una realidad tridimensional, sobre cada punto o píxel considerado. Ello es accesible a través de la colección de MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications version 2). La información ha sido obtenida a partir de "Global Modeling and Assimilation Office" (GMAO).

Para valores más detallados y específicos, de cada observatorio concreto, es recomendable recurrir a los datos de la Red AERONET (https://aeronet.gsfc.nasa.gov/). En estos casos es posible obtener medias mensuales o diarias de manera totalmente realista, dado que los datos son suministrados por fotómetros solares o lunares en el mismo lugar.

3.2 PROCEDENCIA DE FUENTES PARA LOS MAPAS Y TABLAS

Para la obtención de los datos utilizados en la elaboración de mapas y tablas se han utilizado la base de datos de AERONET (https://aeronet.gsfc.nasa.gov), las imágenes de satélite MODIS/TERRA (https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MODAL2_M_AER_OD) y la "The Modern-Era Retrospective analisys for Research and Aplications, versión 2", de la NASA, disponibles en:

https://goldsmr4.gesdisc.eosdis.nasa.gov/opendap/MERRA2_MONTHLY/M2TMNXLN D.5.12.4/contents.html.

3.3 INSTRUMENTAL Y MÉTODOS DE MEDIDA DEL ESPESOR OPTICO (AOD)

3.3.1 Fotómetros solares "Sunphotometers"

Lo constituyen unos sistemas de fotómetros que apuntan al Sol, durante el día, o algunos modelos también a la Luna, durante la noche. La Red AERONET de la NASA está basada en este tipo de detectores de aerosol desde la superficie terrestre. Se disponen en batería, cada uno de ellos centrado en una banda del espectro solar específica, y ancho de banda estrecho (narrowband), para discriminar de forma apropiada el espectro solar. Los sistemas de reducción son similares a los usados en astronomía óptica para determinar el brillo de las estrellas durante la noche, y su descripción operativa escapa a las pretensiones de este trabajo.

La caracterización de las propiedades de los aerosoles a nivel universal, así como en la región de la península Ibérica y en el SE de España, es importante, debido a su proximidad al África continental y, por consiguiente, a la frecuente afectación del polvo sahariano, que entra en el continente europeo antes de mezclarse con aerosoles de origen antropogénico.

Durante los episodios de fuerte entrada de polvo sahariano podemos ver incrementos del valor del espesor óptico. Éste varía entre 0.1 (condición normal) hasta valores de 0.6 a 0.7 (atmósfera con mucho polvo). Para su determinación consideramos la banda de 500 nanómetros (nm.) del canal visible. Se puede determinar también el grosor medio de los granos de polvo transportados por el viento. Suele manifestarse con frecuencia una distribución bimodal, con un pico en torno a 0.6 micrómetros de radio para las de tamaño medio, y del orden de 0.4 – 4 micrómetros de radio para las más gruesas. El factor de incremento del número de partículas de radio grueso fue hasta 8 veces superior durante los episodios de invasiones de polvo sahariano.

El incremento de partículas muy finas menores de 0.4 micras de radio se mostró bastante parecido a las de situaciones sin polvo. Por tanto, se puede deducir que su origen es otro, generalmente más cercano y antropogénico (ver Lyamani et al., 2008)

3.3.2 LIDAR

Una muestra de medidas de aerosol son las realizadas en el Centro Andaluz de Estudios Ambientales (CEAMA) en Granada (http://www.iista.es/). En este caso, a partir de la técnica conocida como "LIDAR", o laser óptico de tecnología Raman. Con ello estudian la distribución altitudinal de las partículas de polvo debida a las irrupciones de aire sahariano. Con esta técnica es posible seguir la distribución vertical espaciotemporal de dichas partículas, su tamaño, grado de reflexión, color etc. Constituye una herramienta muy potente y útil en estudios ambientales y contribuye decisivamente a establecer los parámetros de calidad del aire en nuestra zona de estudio (ver Guerrero-Rascado et al., 2008).

El estudio del cielo mediante esta técnica sería muy útil en caso de establecerse en nuestros observatorios astronómicos. No obstante, el hecho de que sea un equipo pesado y caro, a la par que muy especializado, hace que su uso quede restringido a determinadas estaciones fijas que, generalmente, toman otros muchos datos sobre la calidad del aire en la región.

Tanto los resultados obtenidos con los fotómetros solares localizados a distintas altitudes en nuestra región, como los derivados de medidas a partir de LIDAR, o también cámaras "All-Sky", concuerdan plenamente y son muy útiles para estudiar la distribución y efectos sobre la trasparencia, especialmente durante las infrecuentes, pero intensas, oleadas de polvo, procedentes del Sáhara.

3.3.3 AOD con cámaras CCD

Es un nuevo método para obtener tanto el espesor óptico del aerosol (AOD) como el espesor óptico de las nubes, y se ha usado en las inmediaciones de nuestra zona de estudio. El método utiliza una cámara CCD con óptica "All Sky" y algoritmos de reducción de las imágenes, para determinar estos espesores a partir de la radiancia de las imágenes del cielo, teniendo en cuenta, entre otros paramentos, la distancia cenital y un modelo de trasferencia radiativa, para obtener dicho espesor a 500 nm. de longitud de onda, y poder homologarlo con los demás sistemas. Así es posible determinar el AOD (Aerosol Optical Depth) o el AOT (Aerosol Optical Thickness), ya que ambos términos tienden a describir el mismo fenómeno. El sistema CCD es operado lado a lado del "Sunphotometer", descrito más arriba, y muestra buena concordancia con los valores de espesor óptico obtenidos con dicho fotómetro solar (Lopéz-Alvarez et al., 2008).

Un caso especial lo constituye el instrumento dedicado a estudiar la extinción desde un punto de vista astronómico. Aquí se emplean imágenes del cielo nocturno desde distintos observatorios con base en tierra, como el caso de ASTMON sobre Calar Alto (Aceituno et al., 2011), y sobre los observatorios del Teide y La Palma (Varela et al., 2012). Los valores de coeficientes de extinción vienen expresados en magnitudes estelares por unidad de masa de aire, y se expresan mediante unos K_U, K_b, K_{v y}K_r, según consideremos la extinción en las bandas ultravioleta, azul visible y roja, del espectro electromagnético, de acuerdo a los estándares de sistemas astronómicos usados en astronomía, normalmente el U, B, V y R de Jonhson.

4 ESTADO DE LA CUESTIÓN

4.1 REVISION HISTÓRICO-BIBLIOGRÁFICA

En su visita al observatorio solar de Monte Wilson, en el otoño de 1916, Van der Bilt (1917) realizó algunas observaciones acerca de la transparencia del lugar. Este autor señala como no solo la altitud del observatorio es un factor a tener en cuenta, sino también otros como la presencia de finas partículas de polvo o humo de actividades industriales, que han de ser evitadas.

El método usado por este autor, aunque de tipo visual, es bastante preciso en cuanto da información muy detallada de la transparencia de un lugar de observación. Consiste, básicamente, en observar las estrellas al amanecer hasta que desaparecen visualmente, anotando la hora. Igualmente hay que hacer las observaciones con periodos de Luna, pero en observación nocturna, y en periodos sin Luna. De los cálculos de los tiempos de desaparición o aparición de las estrellas y las efemérides astronómicas, en particular la altura del Sol, sobre o bajo el horizonte, es posible construir una curva de extinción estelar realista, muy útil en determinación de calidad en cuanto a ausencia de aerosoles. El autor concluye que el límite de magnitud visual de Monte Wilson, en perfectas condiciones, y sin Luna, debe ser cercano a 6.9- 7 magnitud; esto es, es posible ver estrellas 2.5 magnitudes más débiles, que lo observable a nivel del mar en similares condiciones.

La extinción atmosférica en el Observatorio McDonald (Texas) fue medida durante el periodo 1960-1964 por de Vaucouleurs (1965). Este autor demostró que los valores de brillo estelar mostraron una brusca caída a partir de marzo de 1963, asociable a la erupción del volcán Agung en Indonesia (114° E, 9° S), de forma que, los coeficientes de extinción por unidad de masa de aire sufrieron unos incrementos de magnitud de 0.05 en v a 0.07 en b y 0.09 en u. Para su determinación se utilizaron los filtros del sistema propio del observatorio, muy próximos al sistema estándar de Johnson. Estos valores decayeron a la mitad un año más tarde, demostrando el efecto, a largo plazo, de las erupciones volcánicas en las condiciones de transparencia de las altas capas atmosféricas y, en particular, en la parte visible del espectro electromagnético. Simultáneamente se informó de atardeceres y amaneceres de color purpura, provocados por los aerosoles de partículas muy finas, emitidas por este volcán, sobre la luz solar retro difundida en la atmósfera terrestre.

Hartmann y Lockwood (1970) nos presentan un ejemplo de cielo polucionado por efecto de actividades industriales y mineras, en las cercanías del observatorio de Kitt-Peak, durante el periodo 1957-1969. Este hecho se observó en la escala diaria, coincidiendo con una visibilidad horizontal inferior a 60 millas. La huelga minera del sector de los años 66 y 67 pudo observarse por un incremento anual del número de días en los que la visibilidad fue notablemente mejor, lo cual muestra su probable origen. Adicionalmente, se pudo observar, desde el mismo observatorio, un ligero incremento en los valores de extinción atmosférica en el periodo estudiado. En este caso se utilizaron medidas fotométricas en el sistema estándar con filtros UBV y uvby. Al igual que en McDonald, en Kitt-Peak también pudo observarse un moderado incremento de los coeficientes de extinción de los filtros mencionados, debido, sin duda, a la erupción del Volcán Agung, en Bali, hecho reportado por de Vaucouleurs (1965).

Los mismos autores, esto son, de Vaucouleurs y Angione (1974), determinaron los coeficientes de extinción en los filtros estándar U, B, V, para el Observatorio de McDonald en Texas, correspondiendo las calibraciones a los años 1960-1968, durante 280 noches. Trataron de determinar los efectos del polvo volcánico, los aerosoles desérticos y humos industriales.

La variación estacional y espectral de los coeficientes de extinción se interpretó en forma de contenido de polvo en la atmósfera, corrigiendo para masa de aire = 1, teniendo en cuenta los efectos de la absorción del ozono estratosférico y del vapor de agua. De este modo, se determinó que desde 1963-1968 se produjo in incremento de los coeficientes de extinción de 0.03 magnitudes en los filtros referidos anteriormente. No quedó claro el origen de este incremento. Estos autores extienden el periodo de medidas de extinción sobre el observatorio MacDonald desde 1960 a 1980, en un periodo de 20 años (Angione y de Vaucouleaurs, 1986). Considerando, en conjunto, este periodo, no se encontró una tendencia significativa en los valores medios de extinción de los filtros del sistema estándar U, B, V., aunque si es observable una sinusoide anual con mínimos en enero.

Rufener (1986) mide durante varios años la extinción atmosférica en las bandas del sistema estándar U, B y V sobre el observatorio de La Silla (Chile). El autor determinó un coeficiente para el filtro V (550 nanómetros) de alrededor de 0.125 mag/masa de aire. Durante la erupción del Chinchón en México, en el mes de abril de 1982, los valores se incrementaron, porcentualmente, en todos los filtros del sistema, no menos de un 10% y hasta el 20%, persistiendo dicha anomalía durante varios meses. Ello a pesar de estar en un hemisferio de la Tierra diferente, donde la mezcla de masas de aire es menos evidente. Con todo, hay que tener presente que el fenómeno se extiende a grandes altitudes y cubre finalmente casi toda la parte superior de la Troposfera y la baja Estratosfera.

Los algoritmos utilizados en la reducción y calibración de las imágenes de los satélites TERRA Y AQUA son expuestos por Lorraine et al. (1996). Se detallan como

usarlos con plataformas MODIS, en bandas visibles e infrarrojas, y de uso diurno y nocturno, tanto sobre tierra como sobre los océanos. El producto de MODIS tratado tiene la denominación de nivel "Product ID: MOD04/MYD04" (ambos TERRA y AQUA). El algoritmo introducido permite calcular el espesor óptico del aerosol, o "AOD", en una columna atmosférica vertical. El resultado se obtiene para cada día del año y sirve de base para posteriores cálculos del balance radiativo atmosférico y estudios climáticos. MODIS tiene un amplio rango espectral y una alta resolución espacial (con 500 m. por píxel, desde 0.47 micras a 2.12 micras y 250 m. entre 0.66-0.86 micras).

Dado que no hay otros datos de imágenes promediadas y calibradas más completas, y con mayor cobertura espacial y temporal, esto es, una de las fuentes de datos e imágenes más fiables, nosotros hemos elegido el promedio mensual, desde los sitios de NOAA MODIS: https://modis.gsfc.nasa.gov/data/ https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MODAL2_M_AER_OD. Las usaremos para un estudio global de observatorios astronómicos, en este caso atendiendo al contenido medio de aerosoles.

Sobre los efectos en la emisión de aerosoles de origen antropogénico es útil consultar el trabajo de Eck et al. (1999). Según estos autores, las emisiones de origen antrópico son debidas principalmente a la quema masiva de material vegetal y restos de cosechas en países en vías de desarrollo. En conjunto, las áreas tropicales tienen altos índices de extinción por aerosoles, extendiendo su efecto a miles de kilómetros de distancia, según puede verse a través de las imágenes de satélite. Adicionalmente, también se estudian los efectos de los aerosoles producidos por las grandes ciudades y por los desiertos terrestres. En su estudio se comparan las características físicas de estos aerosoles, particularmente el tamaño de sus partículas.

Ferrare et al. (2000) emplearon fotómetros solares y medidores de Raman Lidar, durante la campaña de medidas TARFOX, en la que también se midió el vapor de agua precipitable (PWV), junto a la extinción atmosférica y el espesor óptico (AOT). Las observaciones fueron efectuadas en Wallops Island, Virginia (37.86 N, 75.51 W). Las medidas de polvo y aerosol atmosférico concordaron entre sí, con una discrepancia no mayor del 10%. De acuerdo con sus resultados, su concentración parece circunscribirse a los primeros 2-3 Km. de altitud.

Siher et al. (2002) usando datos de nueve años (1989-1997) en una serie de lugares de observación, llamados "IRIS", como son Oukaimeden en Marruecos, Kulgoora en Australia, Kumbel en Uzbekistán, Izaña en Islas Canarias, La Silla en Chile y Stanford en USA, estudiaron la velocidad de la oscilación solar y los datos de extinción. El coeficiente medio de extinción en Oukaimeden resultó ser de 0.12 mag. /masa aire, lo que es un valor muy aceptable para estudios de la variabilidad solar y enteramente

comparable a los demás lugares citados. Por tanto, se infiere que Oukaimeden constituye un lugar prometedor para extender la red de observación astronómica hasta el alto Atlas de Marruecos.

La opacidad atmosférica sobre ocho estaciones de medida en Sudáfrica y 13 estaciones en Alemania son reducidas por Power y Goyal (2003). Dos países muy distantes y con climas diferentes, y también en latitudes marcadamente distintas, por lo que constituyen una prueba diferencial muy apropiada para entender los fenómenos de la presencia de aerosoles en la atmósfera, sobre un país considerado aisladamente. Alemania mostró una fuerte componente de variación estacional, mientras que en Sudáfrica la variación era más atenuada. También se encontró que en las últimas décadas la turbidez atmosférica sobre las estaciones de tipo continental en Europa. Además, se han podido detectar los efectos de las erupciones del Chinchón y el Pinatubo, en los años 82 y 91 del siglo XX. Las estaciones en Sudáfrica no mostraron una tendencia clara a largo plazo, considerando que los aerosoles en Alemania provienen principalmente de fuentes externas al país, mientras que se detectó que en Sudáfrica son de origen local.

El análisis de los aerosoles y el polvo, así como de las cenizas volcánicas en la estratosfera, son estudiados por Stothers (2004, 2005), gracias a las notas de los observadores de eclipses lunares, principalmente desde Europa, y que cubre dos periodos. Un primer periodo abarca los años de 1600 a 1800; y un segundo periodo cubre desde 1801 a 1881. En el primer periodo se contabilizaron 36 eclipses de Luna. El tono e intensidad del disco lunar durante el eclipse permitió una aproximación acerca del espesor óptico atmosférico durante los siglos XVII y XVIII. Éste, a diferencia de lo ocurrido los siglos XIX y XX, mostró una estratosfera relativamente limpia de aerosoles. Esto también se ha confirmado estudiando los núcleos de hielo extraídos en Groenlandia (Clausen et al., 1997). En cualquier caso, la penetración del polvo volcánico en la estratosfera en estos dos siglos fue escasa.

Por el contrario, los años 1801-1881 si mostraron mayor presencia de aerosoles estratosféricos, derivados de las observaciones de los eclipses de Luna en ese periodo, 31 en total. Así se pudo ver que aún después de un año de la erupción del Volcán Tambora, en 1815 los eclipses lunares mostraron la total, o casi total, desaparición de brillo de la superficie Lunar. Ello es sólo explicable por una gruesa capa de aerosol a gran altitud en la atmósfera terrestre. Otros eventos volcánicos en esta época mostraron también indicios de opacidad elevada, pero no fueron tan concluyentes como en el caso del Tambora.

Vergaz et al. (2005) determinan el espesor óptico del aerosol (AOD) y el parámetro " α ", que identifican con el coeficiente de la turbidez atmosférica, para la zona del golfo de Cádiz (España), efectuando las medidas con un espectro radiómetro LICOR 1800, con una resolución espectral mediana. El periodo estudiado va de 1996-1999. La variabilidad del espesor óptico AOD, en la longitud de onda de 500 nanómetros, fue de 0.005, con una media de 0.12 anual y sigma de 0.07.

Según su procedencia se encontraron varios tipos de aerosoles. Los episodios del desierto del Sáhara fueron muy frecuentes, también los de tipo continental, presentándose con cierta frecuencia los derivados de actividades industriales locales.

Las propiedades principales del cielo sobre el observatorio astronómico de Calar Alto (España) son expuestas en un trabajo de Sánchez et al. (2007). El periodo de estudio fue entre 2004 y 2007. Se obtuvieron datos de tipo espectrofotométrico, imágenes calibradas fotométricamente. También se realizó una observación continuada con instrumental dedicado al "seeing" y la extinción atmosférica. De esta forma fue posible derivar, por primera vez, el cielo típico nocturno para este observatorio en noches sin Luna.

La fracción de las noches usables en el observatorio fue del 70%, de las cuales el 30% se consideraron fotométricas. La extinción típica de la atmósfera fue de 0.15 magnitudes por masa de aire en invierno, con poca variación a lo largo del año. Bien es cierto que en verano se observaron episodios de polvo sahariano que elevan los picos de extinción atmosférica. Algo muy habitual, por lo demás, en la cuenca mediterránea.

Los autores concluyen que tras 26 años de operación el observatorio sigue manteniendo unas características muy próximas a las de los mejores observatorios astronómicos de hoy en día. Por ello, no es descartable la posibilidad de instalar telescopios de última generación, de la clase 10 metros o más, en este sitio.

Para el territorio de las grandes llanuras de Estados Unidos, Sheridan et al. (2008) analizaron el espesor del aerosol AOD, y determinaron el coeficiente de turbidez α. Se usaron 27 estaciones de muestreo. Todo ello referido a una altitud equivalente de presión de 850 hPa (a unos 1500 m altitud). Se estudian los tipos de flujo del aire y su influencia en los parámetros antes indicados. Se identificaron hasta nueve tipos de flujos de aire distintos. Los flujos del W mostraron escaso contenido en aerosoles, siendo algo mayor con flujos del este, y muy alto con flujos de dirección sur.

El trabajo de Generoso et al. (2008) versa sobre el transporte de grandes masas de polvo desde el Sáhara hasta la costa de Sudamérica. Utilizaron los datos e imágenes de CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) y observaron el AOT (o espesor óptico del aerosol) desde la plataforma de MODIS, a bordo de los satélites TERRA y AQUA. De este estudio se pudo deducir que las plumas de polvo que cruzan el Atlántico pueden alcanzar los 8 km. de altitud en verano, y los 4 km. en invierno. Los modelos de predicción parecen sobrestimar el espesor óptico sobre el lugar de arranque del polvo y subestimarlo en las zonas lejanas donde se va depositando. Los autores sugieren que hay un fuerte mecanismo de deposición a la altura del mar Caribe. El 50% del polvo se asienta en la estación del verano y un 20% en invierno y primavera, siendo el otoño responsable de solo el 10% depositado. Solo en el episodio de polvo de la primera semana de Julio de 2006 se depositaron del orden de 5 Teragramos de polvo, lo cual equivale a un 4% del total promedio anual en la región.

Estas cifras dan idea de la gran cantidad de material transportable por el viento a través del Atlántico, tras ser arrancado de la vasta extensión seca del desierto del Sáhara, y que suele viajar en dirección W y SW. Marginalmente, el sur de la península Ibérica y Canarias se ven envueltas por el polvo en los episodios intensos, y cuando existe una circulación latitudinal desarrollada con flujos del sur, fenómeno más frecuente en verano en nuestra latitud.

Para estudiar la distribución altitudinal de las partículas de polvo, debida a las irrupciones de aire cargado de polvo sahariano, Guerrero-Rascado et al. (2008) realizan un estudio desde el Centro Andaluz de Estudios Ambientales (CEAMA), en Granada. Usaron la técnica conocida como "LIDAR", o laser óptico de tecnología Raman. Con esta técnica es posible seguir la distribución vertical y espaciotemporal de dichas partículas, su tamaño, grado de reflexión, color etc. Por lo que constituye una herramienta muy potente y útil en estudios ambientales, y contribuyen decisivamente a establecer los parámetros de calidad del aire en la zona del SE de la península Ibérica.

Sobre el tamaño de las partículas de aerosol, Komppula et al. (2009) realizan un estudio en un lugar remoto de la India (Mukteshwar), encontrando una alta dependencia estacional en la concentración de partículas. El número de partículas osciló entre 220 y 27,300 por cm³. Durante los meses lluviosos del monzón en la región, julio-agosto, la concentración de partículas decreció notablemente, así como el tamaño medio, que estuvo cercano a los 100 nanómetros de diámetro. Durante la noche las partículas tienden a descender en esta región, atrapadas bajo la capa limite atmosférica, volviendo a incrementarse durante el día, particularmente en la estación seca, debido a la alta actividad agraria e industrial de los habitantes de los valles vecinos.

Steinbring et al. (2009, 2012) miden la trasparencia del cielo nocturna desde el observatorio de Mauna Kea (Hawái) desde 2003 a 2005. El cielo estuvo claro durante el 76% del tiempo, con cielo con extinción menor de 0.2 magnitudes en V durante el 60% del tiempo. De la reducción fotométrica de las observaciones se dedujo que el 56%

de las noches fueron de máxima calidad, o fotométricas. La variación estacional de la trasparencia es poco marcada en este observatorio, que se halla a 19º de latitud norte.

También reportan las condiciones para brillo de fondo cielo y transparencia para una base del Ártico canadiense en la Isla Ellesmere, a 80º latitud y a 610 m. de altitud, cerca de Eureka (Canadá). No obstante, la logística de las latitudes polares impone severas restricciones a estaciones que deban ser operadas por personas, aún entrenadas. En este caso se contó con la logística de la base PEARL, de estudios geofísicos de Canadá, atendida durante todo el año. La dificultad mayor son las bajas temperaturas, con frecuencia entre 30 a 40º bajo cero, así como la lejanía de entidades de población de una estación remota, mucho más allá del Círculo Polar Ártico.

El Observatorio del Roque de los Muchachos, en la Isla de la Palma (España), es uno de los lugares candidatos para albergar el telescopio muy grande de la ESO o E-ELT. García Gil et al. (2010) señalan como el observatorio cuenta, además, con el mayor telescopio óptico infrarrojo hasta la fecha, con el GTC o Gran Telescopio de Canarias.

En este trabajo los autores presentan los resultados de transparencia atmosférica sobre el observatorio a lo largo de los últimos 20 años. Se presentan las medidas efectuadas en los filtros visible (V) y rojo (R), transformándose a un parámetro de trasparencia o K_v. Las medidas fueron efectuadas desde el telescopio Carlsberg Meridian Telescope (CMT). El valor mediano de K_v fue de 0.13 mag extinción por masa de aire. Los meses de verano, de junio-septiembre, presentan un mayor coeficiente de extinción que el resto del año, debido a cirros y algunas incursiones de polvo sahariano. Esto supuso un 29% noches verano afectadas, frente a solo un 13% para el resto del año. No se observó tendencia en la evolución de la transparencia, sugiriendo ello condiciones estables a largo plazo. La pérdida total de noches anuales en cuanto a malas condiciones de tiempo o transparencia fue del 20.7%, siendo este un valor notablemente bueno, respecto a la media de observatorios de primera línea.

Aceituno et al. (2011) nos presentan el instrumento ASTMON (All-Sky Transmission Monitor). El mismo está diseñado para monitorizar de manera continua el brillo de fondo de cielo en varios filtros del sistema estándar. A partir del cual es posible derivar las condiciones de transparencia y nubosidad durante la noche, en distintos observatorios astronómicos y parques naturales, como lugares donde es más sensible la medida de estos parámetros atmosféricos. Los instrumentos iniciales se instalaron en el observatorio astronómico de Calar Alto (Almería) y el Parque Nacional de Doñana (Huelva), constituyendo una buena prueba de la necesidad de contar con instrumentos relativamente simples y robotizados. Los mismos permiten medir las condiciones atmosféricas relevantes en cualquier circunstancia meteorológica. Los resultados obtenidos sobre el Calar Alto están de acuerdo con los estudios previos para este mismo este observatorio reportado por Sánchez et al. (2007).

Las variaciones diarias de aerosoles derivadas de las medidas de la red AERONET (Aerosol Robotic Network), sobre Norteamérica, Sudamérica e islas y océanos adyacentes, son presentadas por Zhang et al. (2012). El análisis muestra una amplia variación del contenido de aerosol del AOD (Aerosol Optical Depth), así como el exponente de turbidez "α" (Ångström). Los autores avanzan que los satélites geoestacionarios no son muy adecuados para la determinación de la concentración de aerosol en sitios muy localizados. Estiman, incluso, que a escala regional también se presentan dificultades, debiéndose conocer mejor los mecanismos de trasporte para ser verdaderamente útiles y complementar la red AERONET.

En 2013 Preunkert y Legrand analizan la composición química de testigos de hielo de los Col Dôme, un glaciar a 4250 m. de altitud en los Alpes franceses. Con ello fue posible reconstruir los elementos atmosféricos en forma de aerosol presentes en la atmósfera de Europa antes de la II Guerra Mundial. Los aerosoles más comunes detectados fueron especies inorgánicas como Na+, Ca2+, NH+4, Cl-, NO-3, and SO2-4. En el periodo 1971-1988 el contenido de partículas submicroscópicas se incrementó en un factor 3 respecto a la época 1921-1951. Ello se debió, principalmente, al incremento de sulfatos, que aumentaron por un factor 5; y por amoniaco y partículas solubles en agua, que aumentaron por un factor 3. También los aerosoles de origen biogénico sufrieron un importante incremento en el segundo periodo analizado. Este último aspecto ha de ser investigado, para ver cómo afecta este tipo de aerosol al cambio climático, tan presente en nuestros días.

Un trabajo didáctico es el de Muhs (2013). Nos presenta un artículo de reconstrucción climática a escala universal, basada en registros de tipo geológico, completada con una extensa cartografía. Este trabajo es muy útil para entender los procesos de emisión del polvo, su trasporte y sedimentación a escala global. Su papel es importantísimo en los fenómenos de fertilización y crecimiento de microorganismos sobre tierra y océanos.

Los fenómenos glaciares, y no glaciares, producen una cantidad considerable de partículas de grano fino a lo largo de los continentes. Los archivos geológicos más estudiados para las deposiciones de polvo y aerosoles son los grandes depósitos de loess, sedimentos lacustres, sedimentos en suelos, de fondo oceánico, y contenidos en los casquetes glaciares y glaciares de montaña.

Gran parte de la superficie de la Tierra tuvo un mayor aporte de polvo que en la actualidad durante el último periodo glacial. Una Tierra más polvorienta, durante los periodos glaciales, parece deberse al aumento de las áreas áridas o con poca

vegetación, características de los periodos fríos, baja humedad del suelo y fuertes vientos, además de una reducción del volumen de agua del ciclo hidrológico en dichos periodos.

Luo et al. (2014) presentan los resultados de AOD sobre el territorio de China durante la década 2000-2010 con datos extraídos de la plataforma MODIS de los satélites TERRA y AQUA, dividiendo el país en 10 sectores diferentes.

China presenta dos grandes centros de alta concentración de aerosoles, y dos grandes centros de baja concentración, allí donde existe más vegetación y la población es de baja densidad. En el desierto de Tarim, y alrededores, la presencia de polvo es dominante, pese a ser un área poco poblada. Las áreas más densamente pobladas de China, en torno a los grandes ríos, megalópolis industriales y deltas, son las que presentan mayor cantidad de aerosol de origen antropogénico, con espesores AOD elevados. Las medias se sitúan en torno a 0.8 para el coeficiente.

Por su parte, Liu et al. (2014) usan el "Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)" del satélite SUOMI. Este sensor dispone de capacidades de observación global de los aerosoles, junto con la Plataforma MODIS de la Nasa (TERRA y AQUA). Debido a un complejo y largo proceso de calibración de la plataforma VIIRS, es posible derivar medidas realistas del espesor óptico atmosférico (AOT) a 550 nanómetros. Las medidas de VIIRS se compararon con la de la red AERONET y MODIS.

Las variaciones encontradas entre VIIRS y MODIS son pequeñas, de solo 0.01-0.03 en el índice AOT, pero si se encontraron grandes contrastes espaciales. Todo ello permite establecer la solidez de las estimaciones de AOT mediante la plataforma de VIIRS-SUOMI. En definitiva, se puede concluir que la misma constituye una herramienta potente para el estudio global de la presencia de aerosoles, permitiendo su cuantificación, así como el establecimiento de su monitorización en áreas sensibles.

Obregón et al. (2015) establecen las propiedades de los aerosoles sobre la estación de Cáceres (España). En este caso se utilizó un fotómetro solar CIMEL de la red AERONET. La extensión del estudio fue de 7 años (2005-2012). Se determinaron la evolución temporal y los parámetros más importantes que definen al espesor óptico (τ) y el parámetro de turbidez (α); todo ello en base a las medidas sobre el cielo con condiciones de llegada de masas de aire muy diferentes. Analizaron los aerosoles según su frecuencia anual y su relación con las masas de aire. Los mayores índices de espesor óptico (τ) ocurren entre los meses de agosto y septiembre, asociables a incursiones de aire procedente del Sáhara. En estos casos dicho índice sobrepasa el valor medio de 0.2

El contenido de aerosoles sobre la India es estudiado por Sanap y Pandithurai (2015). Se estudiaron las medias del satélite TOMS (Total Ozone Monitoring

Spectrometer). Encontraron una gran prevalencia de aerosoles de origen antropogénico (quema de restos cosecha) y procedentes de los desiertos cercanos del NW de la India y del NE de Pakistán.

Los autores sugieren afectaciones de la elevada concentración de estos aerosoles en la formación de nubosidad, en la radiación registrada cerca de la superficie, así como en el aumento del efecto de invernadero en la Troposfera.

Storelvmo (2017) nos describe como las nubes de la atmósfera terrestre están compuestas de gotas de agua, cristales de hielo o una mezcla de ambas formas. La termodinámica de las nubes está controlada por la temperatura, pero otros materiales, del tipo aerosol, pueden tener también alguna influencia en su formación.

La influencia de los aerosoles sobre el clima ha constituido un tema de investigación a lo largo de las últimas dos décadas. Con todo, sus efectos globales apenas se comprenden. De hecho, se está estudiando, actualmente, mediante observaciones de satélite y modelos numéricos, si la fase del agua en las nubes afecta a la interacción del aerosol con el clima, dado que no se conoce la fuerza de esta interacción, ni el sentido en que lo hace.

Las emisiones de polvo con origen en altas latitudes y climas fríos (Bullard y Mockford, 2018) están recibiendo mucha atención en la última década. Esto es debido a la frecuencia de emisión y magnitud de la misma, que se espera aumente con el calentamiento actual, llevando a una reducción de las masas de hielo y un incremento de la sedimentación del polvo transportado por el viento.

En concreto, estudian la zona W de la Isla de Groenlandia, en la estación de Kangerlussuaq. Sus resultados muestran estacionalmente el camino del polvo de la zona y de los sedimentos hacia el W, dirigiéndose con preferencia hacia el estrecho de Davis y Labrador, en Canadá. Se ha constatado un incremento de magnitud de los episodios, pero no así su frecuencia en el periodo indicado.

Sheel et al. (2018), utilizando un modelo llamado MOZART (Model for Ozone And Related Chemical Tracers), que calcula el espesor óptico AOT, compararon sus valores con aquéllos dados por la red de estaciones AERONET. También los cotejaron con los obtenidos de las imágenes de los satélites TERRA y AQUA, para medir espesor óptico en la banda de 550 nanómetros. El modelo parece sobrestimar el espesor óptico de las emisiones de las quemas agrícolas de los países en vías de desarrollo, y aquellas zonas próximas a desiertos polvorientos, como el Sáhara. Por el contrario, parece subestimar los espesores ópticos sobre los países europeos industrializados y el Mediterráneo. Por lo demás, se ajusta a las variaciones estacionales y regionales obtenidas de la red AERONET y de los satélites con MODIS. La serie de datos e imágenes cubre desde 2000 a 2007. De acuerdo con Harrison et al. (2019) la parte central del Sáhara occidental es la mayor fuente de aerosol de origen mineral durante el verano boreal, pero la red de observatorios en esta zona es muy dispersa, y con estaciones muy distantes entre si. De este modo las observaciones "in situ" más fiables son de poca cobertura temporal. Su trabajo trata de interpolar las condiciones entre ellas, mediante modelos numéricos.

Para paliar esta deficiencia, los autores proponen un sistema en base a los mecanismos de emisión, para los meses de junio-agosto, y una cobertura de observación desde 2004-2017, usando un método de inferencia automático, el cual traza las trayectorias de las plumas de polvo con las condiciones de convección, observadas a través de las imágenes del Meteosat de Segunda Generación (MSG).

Rieger (2019) describe la base de datos recolectada por OSIRIS (Optical Spectrograph and InfraRed Imaging System). Este sensor viaja a bordo del satélite Odin, y presenta una base de 17 años de cobertura, para el análisis de los aerosoles en la Troposfera y Estratosfera a nivel planetario. Esta base ha sido fuente para numerosas investigaciones sobre el papel de los aerosoles y su incidencia en varias disciplinas. El modelo usado para su interpretación tiene en cuenta la incidencia de las nubes estratosféricas polares, así como la presencia de aerosoles de origen volcánico.

Los grandes incendios del W de Estados Unidos, en el mes de agosto de 2017, han sido estudiados por Bourassa et al. (2019). Sus resultados muestran que las columnas de humo alcanzaron la Estratosfera, con una intensidad poco usual en los incendios forestales. De hecho, el humo subió hasta alturas de 23 Km., y persistió durante 5 meses. La capa de aerosol se extendió entre los 20º y 60º de latitud norte, y pudo ser fotografiada por los satélites de seguimiento de los fenómenos atmosféricos durante largo tiempo. El estudio del limbo de las imágenes permitió interpretar las concentraciones de humo y aerosoles a distintas alturas de la superficie.

Estos episodios catastróficos tienen incidencia en la calidad de las observaciones astronómicas y geofísicas de los numerosos observatorios, situados entre las latitudes antes citadas, pudiendo alcanzar la extinción de la luz estelar hasta un factor 10, respecto a los valores normales en las longitudes de onda del visible y el infrarrojo próximo.

Wang et al. (2019) presentan los primeros resultados sobre aerosoles del satélite geoestacionario japonés Himawari. Este satélite mide el contenido de aerosoles en la región hemisférica de Japón con una gran resolución temporal. El periodo de análisis fue de 2015 a 2017, estableciendo la red AERONET como referencia para determinar el AOD. Las medidas sobre tierra mostraron desviaciones mayores que aquellas deducidas sobre el mar a través de la red de estaciones MAN (Maritime Aerosol Network).

Finalmente, aparece publicado un interesante trabajo de Falchi et al. (2023), en que se presenta una tabla con extinciones (T), para una serie de observatorios astronómicos importantes de todo el mundo. En general, sus resultados son congruentes con los alcanzados por nosotros en este capítulo.

5 ESTUDIO DE CASOS

5.1 MAPAS PROMEDIO Y DIFERENCIALES DE AEROSOLES Y EXTINCIÓN (AOD) SOBRE REGIONES DE INTERÉS ASTRONÓMICO

Se han elaborado en base a los datos de MERRA2, con una resolución temporal anual y de píxel de 0. 5º de lado, y para el periodo de 1980 a 2020. Dado que esta fuente proporciona los datos ya filtrados, y para una altura promedio del píxel, al ser este bastante grueso, no nos da más que una aproximación al contenido real de AOD a la altura de un observatorio astronómico (estos están normalmente elevados más de 1000 m. sobre la altura promediada del píxel satelital). Por ello solo lo utilizaremos a escala regional, para ver las condiciones generales del aerosol promedio presente en el área. Con ello podemos distinguir las principales fuentes de aerosol en todo el mundo, y la situación relativa de los distintos observatorios a nivel mundial.

5.2 LOS AEROSOLES A ESCALA REGIONAL Y PLANETARIA SEGÚN MERRA2

En el planisferio (Figura 26) de la media MULTIDECADAL 1980 – 2020 del índice AOD, se observa que las zonas tropicales del hemisferio norte de la Tierra están muy afectadas por las grandes fuentes de polvo y aerosol, constituidas por los aportes de los grandes desiertos y por la actividad agrícola e industrial en países en vías de desarrollo. El hemisferio norte del planeta es claramente más polvoriento que el hemisferio sur. Las áreas mundiales de interés astronómico, como son la zona mediterránea, península lbérica, el Tíbet, SW de EE. UU., Norte de Chile y las regiones Ártica y Antártica, están bastante libres de altos contenidos de aerosoles. En la Antártida, donde el contenido de aerosol es tan bajo que raya lo indetectable, es un caso especial, y por ello se han trasladado allí numerosos experimentos astronómicos, que requieren de una extrema transparencia atmosférica. Figura 26. Índice promedio AOD a escala mundial entre 1980 y 2020

INDICE AOD



Fuente: Worldview Earthdata (NASA). Elaboración propia.

En la figura 27 se observan cambios significativos entre las décadas de 1980-1989 y 2010-2019. En concreto, se aprecia una disminución del contenido de aerosol atmosférico en toda la cuenca mediterránea y centro y este de Europa. También ocurre lo mismo en la parte este de EE. UU. y norte de México. Por el contrario, en la mayor parte de la India y China se comprueba un espectacular incremento del contenido de aerosoles, achacable a la quema masiva de restos de cosechas y la industrialización descontrolada. El incremento en la parte noroccidental de Norteamérica es atribuible a los repetidos mega incendios forestales de aquella región en la última década. Las zonas de interés astronómico en norte de Chile, SW de EE. UU., meseta del Tíbet, Sudáfrica, Australia y Regiones Ártica y Antártica, apenas han tenido variaciones significativas. En el caso del SE de la península Ibérica hemos detectado en los últimos 40 años una disminución del índice en casi 2 centésimas, considerados en promedio. Figura 27. Diferencial del índice AOD a escala mundial entre las décadas de 1981-1990 y 2011-2020



Fuente: Worldview Earthdata (NASA). Elaboración propia.

5.3 MAPAS REGIONALES DE AOD EN PROMEDIO DE 40 AÑOS (1981-2020)

En la figura 28 aparecen instalaciones astronómicas de primer nivel en el sur de Europa y norte de África. Todas gozan de excelente transparencia atmosférica, considerando que están relativamente cerca del centro emisor de polvo más importante a nivel mundial, el Sáhara, cuyo borde norte aparece en la parte media e inferior del mapa, afectando de manera ostensible a la cuenca del Mediterráneo.

Figura 28. AOD promedio 1981- 2020 en la península Ibérica y áreas adyacentes ÍNDICE AOD



Fuente: Worldview Earthdata (NASA). Elaboración propia.

En la figura 29 situamos los observatorios astrofísicos operativos en la península lbérica y Marruecos. Los niveles promedio de polvo y aerosoles son bastante bajos en la Meseta Norte y Pirineos, con algunos núcleos en el SE peninsular con bajo contenido de aerosol. Se observa la nula existencia de observatorios profesionales importantes en el sector centro, norte y oeste de la península Ibérica, pese a ser menos polvoriento por su situación geográfica. El alto Atlas dispone de un solo observatorio, en Oukaimeden, con niveles moderados de transparencia, si lo comparamos con la península Ibérica. Todo el sector argelino del norte de África y el propio mar Mediterráneo tienen presencia de polvo y calima, que hacen subir los valores del índice AOD por encima de la media de la península.

Figura 29. Mapa en detalle con isolíneas AOD promedio 1981- 2020. Detalle de la península Ibérica, Atlas marroquí y Mediterráneo occidental



Fuente: Worldview Earthdata (NASA). Elaboración propia.

5.4 EL CASO DEL MACIZO DEL TIBESTI (SAHARA CENTRAL), SEGÚN MERRA2 Y MODIS/TERRA

En la figura 30 (a) tenemos los valores derivados de MERRA2 (promedio 1981-2020). La imagen presenta un aspecto algo difuso, debido al grueso del píxel, de 0. 5º de lado. El valor más probable del AOD estaría en torno a 0.18 para Emi Kousi, a 3400 m. En (b) tenemos el promedio de AOD para 2020, según MODIS/TERRA, con una resolución de píxel de solo 0. 1º de lado. El valor de AOD se sitúa, en este caso, en torno a 0.15, aunque son posibles valores de alrededor de 0.12 para lugares elevados, en el centro norte del macizo volcánico, situado en la frontera entre Chad y Libia. En ambas instantáneas se observa una gran fuente de polvo a 300 Km. al SW de Emi Kousi. Esta fuente es casi permanente y es provocada por los vientos alisios del NE, sobre una formación calcárea blanda, que esta rellenando la depresión de lo que antes fuese parte del lago Chad. Las áreas marrones oscuras de la figura 30 (b) son áreas sin datos.

Figura 30. Un ejemplo de cómo un macizo volcánico en el centro del desierto del Sahara (Tibesti) puede tener un cielo bastante libre de polvo en altitudes elevadas, a más de 3000 m.



Fuente: Worldview Earthdata y Nasa Earth Observation -NEO- (NASA). Elaboración propia.

5.5 EL CASO DEL SW DE EE. UU. Y BAJA CALIFORNIA (MÉXICO)

En la figura 31 podemos observar donde se localizan importantes observatorios astronómicos, los cuales tienden a concentrase en el extremo SW de Norteamérica. A pesar de estar en regiones donde existen algunos desiertos de tipo medio, la transparencia atmosférica es notable y supera ligeramente a la región de la península lbérica, aunque no llega a superar a la zona del norte de Chile (Figura 32), donde aparecen características soberbias de transparencia y tiempo despejado.

Figura 31. Región de interés astronómico del W de EE. UU y norte de México ÍNDICE AOD



Fuente: Nasa Earth Observation- NEO- (NASA). Elaboración propia.

5.6 EL CASO DE AMÉRICA DEL SUR

En Chile se concentran los observatorios astronómicos más avanzados del mundo. Todos ellos tienen una excelente transparencia atmosférica, por el bajo valor del índice AOD. Una región que quizá permita futuros desarrollos en la zona de la cordillera de los volcanes, donde el índice AOD se vuelve extremadamente bajo, y en la práctica, quizá, la más favorable del mundo, para astronomía óptica, infrarroja y radioastronómica. La extrema altitud de la barrera de los Andes frena completamente el desplazamiento de los aerosoles presentes en toda la cuenca del Amazonas y del Paraná, donde la quema de restos de cosecha es una práctica muy extendida.

Figura 32. Región de interés astronómico del norte de Chile

ÍNDICE AOD



Fuente: Worldview Earthdata (NASA). Elaboración propia.

5.7 LA REGIÓN DEL TÍBET

En la figura 33 podemos ver como la región del Tíbet muestra valores del índice AOD extremadamente bajos, dada la altitud media del terreno, en torno a los 5000 m. En esta zona se constata un rápido incremento de instalaciones científicas y astronómicas, por parte de ambos países, con los observatorios de Hanle (India) y Ali (China). Hemos de hacer notar la extrema contaminación de la provincia china de Sichuan (mancha marrón en el margen SE de la imagen), donde los niveles promedio de AOD son preocupantes, incluso para la salud humana. Allí se radican importantes industrias, agricultura intensiva y ciudades gigantescas, todo ello en una zona relativamente baja altitud, que permite la acumulación natural de gran cantidad de partículas contaminantes. El Tíbet es un área inmensa, donde existen muchas posibilidades de desarrollar observatorios de extrema altitud. Los científicos chinos consideran factible instalar observatorios incluso a más de los 7000 m. de altitud.



<u>ÍNDICE AOD</u>



Fuente: Worldview Earthdata (NASA). Elaboración propia.

5.8 TABLAS RESUMEN DE RESULTADOS PARA AOD

Del examen de la tabla 2 se deducen los valores de AOD sobre los observatorios polares, y los de gran altitud, que están en el límite de lo detectable con los sensores de los satélites en órbita terrestre. Por ello tienen la máxima transparencia posible, debido a la bajísima concentración del polvo y aerosoles, siendo su límite de transparencia el impuesto por el índice de Rayleigh. La altura media del píxel de las imágenes de MERRA2 son inferiores a las alturas reales, al menos en observatorios caracterizados por estar situados en cadenas montañosas elevadas sobre llanuras, o planicies adyacentes, a mucho menor altura. Por tanto, cabe considerar que existe una ponderación al alza, particularmente notable en islas pequeñas con grandes altitudes y en los sistemas alpinos, como los de la península Ibérica, Canarias, el Atlas o los Alpes.

OBSERVATORIO	ALTITUD	LONGITUD	LATITUD	AOD MERRA 2	∆ AOD (40 AÑOS)
				unidades	milésimas
<u>EUROPA</u>	m.	0	0		
TENERIFE	2400	16.6 W	28.3 N	0.116	-10
S. NEVADA	3000	3.42 W	37.11 N	0.085	-13
PIC DU MIDI	2880	0.14 E	42.93 N	0.084	-20
ALPES FRANCES.	2500	5.9 E	44.66 N	0.074	-20
AMERICA SUR					
CHAJNANTOR	5000	67.8 W	23.03 S	0.032	2
VLT	2600	70.4 W	24.62 S	0.039	0
LA SILLA	2400	70.74 W	29.24 S	0.032	-5
AMERICA NORTE					
SUNSPOT	2810	105.85 W	32.7 N	0.061	-7
KITT-PEAK	2000	111.6 W	31.95 N	0.069	-5
S. PEDRO MARTIR	2900	115.5 W	31.00 N	0.049	-7
MAUNA KEA	4200	155.6 W	19.9 N	0.058	-2
AFRICA					
OUKAIMEDEN	2750	7.8 W	31.22 N	0.119	-11

Tabla 2. Lugares seleccionados para el estudio del AOD a largo plazo (1981-2020) en
el contexto de MERRA2

EMI KOUSI	3400	18.55 E	19.83 N	0.195	8	
NAMIBIA	2400	16.22 E	23.34 S	0.06	16	
ETIOPIA	4000	38.24 E	13.22 N	0.137	5	
ASIA						
TIBET CHINO	5200	80.9 E	31.27 N	0.038	1	
MONGOLIA SUR	3400	100 E	44.97 N	0.097	-4	
IRAN (ZAGROS)	3000	52.4 E	30.97 N	0.11	6	
CAUCASO	3000	42 E	43.5 N	0.088	-20	
					-	
SE TURQUIA	3000	35.15 E	37.75 N	0.093	0	
					-	
AUSTRALIA						
N GALES SUR	800	1/0 E	35 3 5	0.043	7	
N. OALLO SOR	000	143 L	00.0 0	0.045	1	
ARTICO						
	4500	00.00.14/	04 5 1	0.050	10	
ELLESMERE	1500	83.00 W	81.5 N	0.053	-12	
GROENLANDIA	3200	40.24 W	73.32 N	0.033	-9	
ANTARTICA						
DOME C	3200	128 E	77.3 S	0.005	-2	
Fuente: Worldview Earthdate (NASA) Eleboración propio						

Fuente: Worldview Earthdata (NASA). Elaboración propia.

La Red AERONET de medidores de AOD (Tabla 3) es una fuente muy apropiada de medición de extinción por el polvo y aerosoles (en un gran número de observatorios se dispone de series largas de datos). Aquí hemos elegido las superiores a un año de muestreo. Entre las más largas figuran Mauna Loa (Hawai) e Izaña (Islas Canarias). El observatorio de Mauna Loa, junto con los observatorios del desierto de Atacama,

antárticos y árticos, figuran entre los menos contaminados por el polvo de todo el mundo, acercándose a valores de pocas centésimas de extinción en términos del índice AOD.

					۸ÑOS
LUGAR	ALIIIOD	LONGITOD	LAIIIOD	AUD	ANUS
				AERONEI	
	0000	40.014	00.0 N	0.054470474	47
	2390	16.6 W	28.3 N	0.054176471	17
PALMA					
OUKAIMEDEN	2750	7.8 W	31.22 N	0.153	1
C POYOS	1820	3.48 W	37.11 N	0.108444444	9
A. UNIVERSIT	2550	3.39 W	37,1 N	0.0695	2
ARAS OLMOS	1280	1.10 W	39.9 N	0.080666667	6
MONTSEC	1574	0.73 E	42.05 N	0.14575	8
PIC DU MIDI	2880	0.14 E	43.93 N	0.0316	5
OHP FRANCE	680	5.714 E	43.93 N	0.094272727	11
REUNION	2130	55.38 E	21.08 S	0.023	2
M LOA	3450	155.58 W	19.53 N	0.019107143	28
(HAWAI)					
T MOUNTAIN	2200	117.68 W	34.38 N	0.047066667	15
FLAGSTAFF	2179	111.63 W	35.21 N	0.056	7
ARIZONA.	2791	110.79 W	32.44 N	0.101	2
RED M. PASS	3376	107.71 W	37.9 N	0.052588235	17
PARANAL	2650	70.4 W	24.62 S	0.02175	4
VLT					
CASLEO	2450	69.3 W	31.80 S	0.02675	4
CHACALTAYA	5232	68.13 W	16.35 S	0.0655	4
DOME C	3250	123.33 E	75.1 S	0.0525	2
POLO SUR	1880	0	90.00 S	0.026266667	15
HESS	1818	16.50 E	23.27 S	0.0875	6
TAMANRRAS.	1377	5.53 W	22.79 N	0.2521875	16
PEARL	615		80.05 N	0.070416667	12
CAMBERRA	600	149.11 E	35.27 S	0.0746	15
LANGTANG	3670	85.5 E	28.01 N	0.0325	4

Tabla 3. Promedio anual AOD para distintos observatorios en un contexto planetario deducido de las estaciones próximas de la Red AERONET

Fuente: Red AERONET (NASA). Elaboración propia.

En la península Ibérica, Sierra Nevada y el Pic du Midi (Pirineos) también muestran valores de AOD compatibles con cielos muy poco contaminados por polvo y aerosoles.

Una revisión de los datos disponibles en la Red AERONET (Tabla 3), sobre algunos de los más importantes observatorios donde se dispuso de datos, muestra como los lugares desérticos, como Tamanrraset (Argelia) o Oukaimeden (Atlas), tienen un índice bastante alto, lo cual limita las observaciones astronómicas fuera del cenit. En un nivel aceptable del índice AOD, en torno a 0.1, aparecen una gran cantidad de observatorios en la zona templada del planeta; entre ellos la mayoría de los observatorios en la península Ibérica y Canarias. En el umbral más favorable del índice, en torno a <0.05 AOD, tenemos los mejores lugares encontrados en todo el mundo; como ejemplo aparece el Dome C antártico, los lugares en el Tíbet (Langtang) y los del norte de Chile (VLT, ELT). Las islas de Hawái, con Mauna Loa, y Reunión, en el Índico, parecen tener condiciones promedio extraordinariamente favorables, con índices AOD en torno a 0.02.

5.9 COMPARATIVA AOD ENTRE LUGARES CON OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS DE TODO EL MUNDO

En la figura 34 aparece el índice AOD para los observatorios astronómicos de referencia a escala mundial. Se observan diferencias significativas entre los observatorios próximos a las fuentes de polvo desértico, y las restantes, ya sean próximas al polo, regiones lluviosas tropicales o de latitudes medias alejadas de estas fuentes de aerosoles.


Figura 34. Índice AOD deducido de la red de estaciones AERONET

Fuente: Red AERONET (NASA). Elaboración propia.

5.10 EL CASO DEL AOD EN TRES OBSERVATORIOS EN EL SE DE LA PENINSULA IBERICA

Los observatorios de Calar Alto y OSN (Sierra Nevada) (Figura 35) mostraron prácticamente el mismo espesor óptico para el año 2016, aunque se aprecia alguna diferencia estacional. En todo caso, el espesor medio, algo próximo a 0.12, en la escala de 0 a 1, es un valor muy aceptable. En cuanto al valor obtenido para el Observatorio de La Sagra, éste parece mostrar mejor comportamiento que los dos anteriores en todos los meses. Su valor medio es de 0.077, lo cual es excelente. El valor promedio de 0.15 a 0.20 podemos calificarlo como el umbral máximo permitido para tener un cielo con verdadera calidad para la observación astronómica.



Figura 35. Espesor óptico AOD sobre los tres observatorios del SE de la península Ibérica

5.11 AEROSOLES MODIS TERRA (PROMEDIO AOD 2018-2020)

En la tabla 4 aparecen los resultados promedio del índice AOD, para los lugares donde existen observatorios astronómicos operativos, para el ámbito de la península Ibérica, archipiélago Canario y Atlas marroquí. El índice parece ser muy bajo en los observatorios de La Sagra, Javalambre y Pic du Midi. Sierra Nevada y Calar Alto tienen un AOD aceptable, en comparativa regional. Los de Canarias, La Palma y Tenerife posiblemente estén sobreestimados, debido a la indeterminación de asignar una altura promedio de píxel en las imágenes MODIS TERRA. Para más información remitimos a los resultados de AERONET (Tabla 3 y Figuras 41 y 42).

observatorios astronomicos en la región permisuía ibenca Carianas y Atlas marroqui								anoqui	
AÑO	PALMA	IZAÑA	OUKAIMED	OSN-	CALAR	SAGRA	JAVALAMBRE	MONTSEC	PIC DU
				IRAM	ALTO				MIDI
2018	0.154	0.106	0.1192	0.110	0.135	0.065	0.059	0.126	0.085
2019	0.119	0.116	0.1167	0.109	0.123	0.082	0.053	0.118	0.088
2020	0.144	0.084	0.1080	0.078	0.129	0.063	0.061	0.108	0.055
Media	0.139	0.102	0.1147	0.099	0.129	0.070	0.058	0.117	0.076

Tabla 4. Promedio anual (2018-2020) para el índice AOD para una serie de observatorios astronómicos en la región península Ibérica Canarias y Atlas marroquí

Fuente: Nasa Earth Observation- NEO- (NASA). Elaboración propia.

Fuente: Nasa Earth Observation- NEO- (NASA). Elaboración propia.

5.12. AEROSOLES DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO

El índice AOD (Figura 36) se incrementó en California en casi un orden de magnitud mensual, respecto a la media anual típica, en la longitud de onda del verde (500 nm.).



Figura 36. Efecto de grandes incendios en el estado de California en septiembre de

Fuente: Red AERONET (NASA).

Esto debió dejar impracticable el cielo para astronomía en todo el SW de EE. UU. durante semanas. Esta es una región con alta densidad de observatorios astronómicos de primer nivel. El efecto es dependiente de la longitud de onda considerada, siendo máximo en longitud de onda del azul, en el entorno de los 400 nm.

5.13 LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN CUMBRE VIEJA ISLA DE LA PALMA EN 2021

Imagen de la Erupción de Cumbre Vieja en la Isla de la Palma (Figura 37), tomado el 19 de octubre de 2021 por TERRA/MODIS, con las bandas espectrales 7, 2 y 1. El flujo de aire de los alisios, con predominio este, impulsa la masa de ceniza y humo hacia el interior del Atlántico Norte. El volcán cesó su actividad a finales de diciembre de 2021. Su incidencia astronómica ha sido solo significativa durante la segunda parte de 2021 en los observatorios astronómicos del Teide y en los de la propia isla de la Palma.



Figura 37. Imagen en falso color de los efectos del humo volcánico del episodio de Cumbre Vieja (Isla de la Palma)

Fuente: Worldview Earthdata (NASA). Elaboración propia.

5.14 EL CASO DE LA ERUPCIÓN DEL VOLCAN CUMBRE VIEJA (ISLA DE LA PALMA, CANARIAS SEGÚN AERONET)

En la figura 38 podemos ver el desarrollo del AOD en el lado norte de Cumbre Vieja, que entró en erupción en septiembre de 2021, y finalizó en diciembre del mismo año. Allí se halla un observatorio astronómico importante, el Roque. El efecto sobre la transparencia para las observaciones astronómicas, aunque importante, no llego a ser dramático, salvo en las irrupciones más potentes en la primera fase de la erupción (sepoctubre). Las observaciones desde la isla de Tenerife, con las estaciones de Izaña y Teide, mostraron un efecto más atenuado de la erupción, pues, con bastante frecuencia, los límites del AOD no sobrepasaron el valor de 0.2. Así, por ejemplo, las erupciones del Chinchón, en 1981, y del Pinatubo, en 1993, tuvieron un efecto mucho mayor sobre los índices AOD a escala planetaria. Por ello la erupción de Cumbre Vieja en la Palma ha sido importante a una escala regional y, en menor medida, a escala planetaria. Los picos de los meses de mayo, junio y julio, corresponden a oleadas de polvo sahariano, conllevan cantidades de polvo que hacen subir los índices AOD a niveles similares a los de una gran erupción volcánica. Es de notar, que las cenizas volcánicas, debido al menor radio de sus partículas de aerosol, tienden a permanecer más tiempo en suspensión atmosférica, que las del polvo sahariano, que tienden a depositarse con rapidez. En la figura 38 puede observarse como el índice AOD es dependiente de la

longitud de onda desde donde se determina el AOD para cada banda espectral, siendo mayor cuanto menor es ésta.



Figura 38. El índice AOD sobre el observatorio de La Palma, según la red de fotómetros AERONET

5.15 AOD SOBRE SIERRA NEVADA (DEDUCIDO CON LA BASE MERRA2)

La evolución del AOD de la figura 39 corresponde al área de Sierra Nevada, España, tomados de MERRA2. Los valores se corresponden con promedios de los meses de enero y julio entre 1980-2022. Se observan valores extremos en 1983 y 1992, debido a erupciones importantes de los volcanes Chinchón en (México) y Pinatubo (Filipinas). Con ello se muestra el efecto adverso en la transparencia atmosférica a causa de emisores muy lejanos, y que se prolongan durante meses o años. Los efectos del volcán Cumbre Vieja de la Isla de la Palma apenas tuvieron efecto en el valor medio anual del AOD (2021) de Sierra Nevada, de acuerdo con esta serie de datos satelitales. En conjunto, la serie anual muestra una tendencia decreciente del AOD en Sierra Nevada.

Fuente: Red AERONET (NASA).

Figura 39. El caso de los efectos de grandes erupciones volcánicas sobre la trasparencia en los cielos de Sierra Nevada (SE España)



Fuente: Worldview Earthdata (NASA). Elaboración propia.

6 UMBRALES, AJUSTES Y CALIBRACIONES

6.1 AJUSTE DE VALORES DE AOD DE OBSERVATORIOS DEDUCIDO DE LOS DATOS ERA5 (COPERNICUS) Y DEL AOD DEDUCIDO DE LOS DATOS DE AERONET (NASA)

Dada la variación de la concentración de aerosoles con la altitud se realizó un análisis logarítmico (Figura 40). El mismo se efectuó sobre los distintos observatorios, con datos de la Red AERONET en la península Ibérica. Este ajuste permite extrapolaciones posteriores a observatorios sin datos directos de AOD. También es posible ajustar los mapas y series de observatorios extraídos de las bases de datos ERA5, cuya determinación del AOD viene dado por un valor para un punto concreto, mediante el modelo de ajuste logarítmico de reducción, aplicado a dicha base de datos. Con la determinación de la altitud del píxel de los mapas generados con ERA5, con 0. 25º por pixel, es factible el cálculo del AOD para distintas áreas de todo el mundo. En nuestro caso hemos efectuado además algunos ajustes, sobre todo en el área de Canarias, norte de África y península Ibérica (Figuras 41, 42 y 43).

Figura 40. Dependencia del AOD con la altitud para observatorios de la región de la península Ibérica. Correlación logarítmica entre el índice AOD y la altitud del observatorio, a tenor de los datos de las estaciones próximas a los observatorios astronómicos. En torno a los 2500 m de altitud se alcanzan niveles óptimos de transparencia, con AOD <0.05



Fuente: Red AERONET (NASA). Elaboración propia.

La figura 41 es un ajuste logarítmico obtenido con los datos de las estaciones próximas a los observatorios astronómicos existentes en la zona de Canarias y el sector costero de Marruecos. La dependencia del índice AOD es muy acusada con la altura, si bien se requieren alturas considerables, iguales o superiores a 3000 m., para alcanzar un umbral óptimo de 0.05. Es decir, transparencia excelente.



Figura 41. Correlación logarítmica entre el índice AOD y la altitud del observatorio (área de Canarias)

Fuente: Red AERONET (NASA). Elaboración propia.



Figura 42. El promedio anual de noches despejadas (con el índice AOD >0.1) en función de la altitud del observatorio

Fuente: Red AERONET (NASA). Elaboración propia.

En la figura 42 se correlaciona la altitud de la estación con el número de noches despejadas, para la zona comprendida entre las montañas ibéricas y los observatorios en la zona de Canarias. La fuente de los datos procede de la red de estaciones AERONET. Aparece un excelente acuerdo para una regresión a un modelo de disminución logarítmico del índice AOD con la altitud del observatorio. Las noches con mayor extinción (>0.1) son tanto más escasas cuanto mayor es la altitud. Ello implica que la mayoría de las noches despejadas, a gran altitud, disponen de cielos muy transparentes, con AOD < de 0.1.

El número de días promedio anual en que el índice AOD (datos de la Red AERONET) superó el umbral de 0.1 sobre varios observatorios astronómicos de la península Ibérica, Canarias y el Atlas marroquí aparece en la figura 43. Los lugares más favorables se sitúan en Sierra Nevada (Albergue) y Pirineos (Pic du Midi). La mayor incidencia se da en zonas con baja altitud, como Granada (ciudad), Aras de los Olmos (Valencia) o el Montsec (Cataluña). Como representante del alto Atlas marroquí, tenemos el observatorio de Oukaimeden. En el mismo se muestra una gran incidencia de días con AOD > 0.1, al menos 100 días por año.



Figura 43. El número de días con umbral de AOD >0.1

Fuente: Red AERONET (NASA). Elaboración propia.

7 DISCUSIÓN

Del estudio de la base de datos de MERRA2, MODIS/TERRA y AERONET se deduce que los incrementos o decrecimientos de la extinción atmosférica han sido muy pequeños en las zonas de estudio en 40 años (pocas milésimas del índice AOD). Por tanto, se puede concluir que los cambios de transparencia atmosférica, o extinción, han mostrado escasa significación estadística en las zonas aquí estudiadas y con importantes observatorios astronómicos (ver tablas 2, 3 y 4 y Figuras 25-32).

Los datos que aparecen en las tablas 2, 3 y 4 nos muestran la diversidad espacial de la transparencia atmosférica, en términos del AOD, en lugares de interés global para la observación astronómica.

Podemos iniciar el recorrido por el archipiélago de Canarias, con los grandes observatorios en las islas de Tenerife y la Palma. Ambos están situados a unos 2400 m de altitud, por lo que forzosamente tienen índices de AOD parecidos, y bastante favorables, en torno a 0.05 – 0.11, según consideremos AERONET o MERRA2. En el caso de las islas, si son de pequeño tamaño, como es este el caso, los datos de MERRA2 están muy sesgados al alza, por lo que un valor en torno a 0.05 es más realista, al proceder de estaciones AERONET, situadas a la misma altitud del observatorio. Los episodios de polvo sahariano son frecuentes en verano, y ocasionalmente el índice AOD puede exceder 0.5 durante varios días seguidos. Los resultados concretos de "extinción atmosférica", desde un punto de vista de observación

telescópica, como coeficientes de extinción atmosférica, son resumidos por Cuevas et al. (2009). Sus resultados coinciden con los nuestros de manera notable. Hacemos aquí referencia al comportamiento promedio de la incidencia del polvo atmosférico y la frecuencia e intensidad de los episodios de presencia de polvo en suspensión.

"Los resultados de la incidencia del polvo africano en los observatorios astronómicos de Canarias muestran que ambos observatorios tienen un cielo extremadamente claro, solo afectado parcialmente por masas de aire que transportan polvo africano en verano (julio-septiembre). Simulaciones a largo plazo (1958-2006) del total de partículas en suspensión (TSP) muestran que no hay un aumento con el tiempo en ambos observatorios. Estos resultados están en sintonía con las mediciones llevadas a cabo en ambos observatorios. Las simulaciones de los modelos muestran una incidencia más baja del polvo africano en el ORM respecto del OT, tal como se espera debido a la localización geográfica de ambos observatorios.

La extinción típica en el ORM es de 0.13 mag/arcsec² en la banda V, 0.127 mag/arcsec² en J, 0.06 mag/arcsec² en H y 0.009 mag/arcsec² en K. Se considera que una noche es fotométrica cuando la extinción en V es menor que 0.15 mag/arcsec²," (Cuevas et al., 2009).

En el caso de Sierra Nevada, ya en la península Ibérica, tenemos algunos observatorios de importancia, como los del OSN (CSIC), cercano a los 3000 m de altitud, y el observatorio de radio IRAM, a la misma altitud. Los índices dados por AERONET a 2500 m de altitud son en promedio de 0.069; mientras que los deducidos de MERRA2 están en torno a 0.085. Un valor probable ajustando la altitud de los observatorios con MERRA2 quizá se pueda situar en 0.06. Este valor es excelente en un contexto de transparencia atmosférica. El observatorio cercano de Calar Alto, en Sierra de los Filabres (Almería), no dispone de estación AERONET, pero un valor probable de AOD lo podemos fijar en torno a 0.08, según la figura 34 de este capítulo.

Unos 100 Km al norte de Calar Alto, tenemos el observatorio de La Sagra, que actualmente tiene instalaciones a 1530 m. y 1850 m.; pudiendo teóricamente elevarse en el futuro, hasta casi 2400 m. Ciñéndonos a esta última altitud, y de acuerdo con los datos de MERRA2, mostrados en las figuras 41 y 42, el valor más probable se situaría en torno a 0.07; valor también obtenido por análisis de los datos de MODIS/TERRA (Tabla 4).

En toda el área de la península Ibérica las irrupciones de aire cargado de polvo sahariano son infrecuentes, su duración es de pocos días y los índices AOD raramente exceden el valor 0.3-0.5. Por tanto, en este aspecto, esta región es más favorable que Canarias y el Atlas marroquí, según los valores del AOD. Es más, el gradiente de AOD tiende a mostrar valores más bajos conforme nos adentramos hacia el norte y NW peninsular (Figuras 27 y 28). En este contexto, encontramos el observatorio de Javalambre (1950 m.). Su situación, en el centro este de la península Ibérica, rodeado de sistemas montañosos, hacen que el índice AOD estimado se situé en torno a 0.06 (MODIS/TERRA, tabla 4). Los valores de estaciones próximas de AERONET dan valores promedio más altos, en torno a 0.14 para el Montsec, datos AERONET, tabla 3. Este lugar, a 1570 m. en Cataluña, dispone de instalaciones de observación aastrofísica, y su valor parece indicar que, con frecuencia, la capa limite planetaria (la inversión térmica), sobrepasa la altura del observatorio; de ahí, probablemente, la mayor concentración de polvo presente en Montsec con respecto a Javalambre que, como hemos indicado, se sitúa casi a 2000 m.

En los Pirineos franceses encontramos un observatorio de gran altitud, a 2880 m., el Pic-du-Midi. Es un observatorio con más de 100 años de trayectoria, y numerosas instalaciones astronómicas. Su calidad de imagen y transparencia se han hecho proverbiales en el contexto europeo. El AOD más fiable es el deducido de los muchos años con observaciones fotométricas de AERONET. Las mismas ofrecen un excedente valor de 0.03 (Tabla 3 y Figura 34). Este valor rivaliza con los mejores del mundo encontrados en los Andes y en la Meseta del Tíbet. Una situación semejante se encuentra en los Alpes, siempre que consideremos alturas del orden de los 2500 m, donde existen algunos observatorios astronómicos y radioastronómicos (Tablas 2, 3 y 4 y figuras 27 y 28).

La región del SW de EE. UU. y norte de México (Figura 30, Figura 34 y tablas 2, 3 y 4) ofrecen una amplia variedad de observatorios astronómicos que se sitúan entre los 2000 y 3500 m de altitud. Toda la región es muy favorable la observación astronómica por los valores alcanzados de transparencia atmosférica, según se deduce de estaciones AERONET, en el lugar o zonas próximas.

Así, para Flagstaff (Arizona) encontramos valores en torno a 0.056; y para las montañas del Sur de Colorado y Nuevo México los mismos se sitúan en torno a 0.04 a 0.05. Valor prácticamente idéntico al obtenido para S. Pedro Mártir, México (2880 m.), con AOD de solo 0.049, según MERRA2. Son valores sorprendentemente bajos. No obstante, hay que tener en cuenta la menor entidad de los desiertos norteamericanos y la elevada altitud de las estaciones consideradas. Si se compara esta región con la península Ibérica, parece haber una ligera ventaja por parte de los lugares del SW de Norteamérica. Con especial incidencia, entre 2017 y 2020, se han producido gigantescos incendios forestales en la región, afectando severamente la transparencia del cielo de los numerosos observatorios astronómicos de la región (Figura 41).

Los países asiáticos son todos difíciles de estudiar e, incluso, recomendar, desde un punto de vista económico y sociopolítico. Sin embargo, las condiciones de los lugares de gran altitud en el Tíbet y otras zonas, con observatorios astronómicos, construidos o previstos, son excelentes. El caso del AOD es superior, y quizá de los mejores del mundo. Como mejores zonas, con observatorios existentes, tenemos el Cáucaso, con AOD del 0.088 a unos 3000 m. de altitud. El caso del SE de Turquía, con algunos proyectos de observatorios nacionales, con AOD del 0.09, a unos 3000 m. de altitud, muestra valores similares a los anteriores. Más al este, en la región de la alta meseta del Tíbet, y de acuerdo con MERRA2, tenemos los observatorios del Hanle (India) y Ali (China), con altitudes del orden de los 5000 m. Aquí incluso los valores del AOD son aún más bajos, ~0.038 (ver tablas 2 y 3).

Existen algunas posibilidades en los Montes Zagros (Irán), donde se planea un observatorio nacional. Aunque con tiempo muy favorable el AOD no es excepcional, y estaría, en promedio, en torno a los valores de 0.11 (Tabla 3). En el caso de las elevaciones y altas mesetas del centro y W de Mongolia, con AOD probable de 0.1, o algo inferior, nos muestran aptitudes algo menos favorables que las del Tíbet, los Andes y las regiones polares.

Un caso de extrema dificultad logística y sociopolítica, respecto a la instalación de observatorios, lo constituye África. De hecho, solo en las antiguas colonias de Sudáfrica y Namibia se han desarrollado algunos observatorios astronómicos modernos. El AOD que hemos deducido para la zona central de Namibia estaría en torno a 0.087, para el observatorio HESS, a partir de los datos AERONET (Tabla 2 y Figura 34). No es muy favorable la situación del observatorio marroquí de Oukaimeden, a 2750 m. de altitud, en el Atlas central. Con un AOD en torno a 0.15 según AERONET (Tabla 4), y 0.119 según MERRA2 (Tabla 4).

En ciertos macizos montañosos de África centro oriental, como Etiopia, con altitudes del orden de 4000 m., es posible tener valores AOD de 0.137 (Tabla 2). Esto mismo también sucede en el macizo del Tibesti, en el Sáhara central, donde hemos detectado que el AOD no bajaría del 0.19, según MERRA2. Con todo, es muy probable que puedan alcanzarse valores bastante más bajos en las máximas alturas, que rondan los 3400 m., puesto que el polvo del desierto raramente rompe la barrera de los 3500-4000 m. en el Sáhara central. Debemos hacer notar que la mayor fuente de polvo detectada por los satélites en órbita terrestre se encuentra justo al sur del Tibesti (Figura 25), pero al ser arrastrado con fuerza por la corriente de los alisios, que fluyen hasta unos 2000 metros de altitud desde el NE, es por lo que estimamos que, a pesar de esta circunstancia negativa, el macizo volcánico está relativamente exento de polvo. Un detalle de la zona puede verse en la figura 29 (a, b).

Australia no cuenta con alturas importantes donde instalar observatorios modernos. No obstante, a pesar de tener grandes desiertos, los índices AOD se

mantienen bastante bajos, sobre todo en la parte suroriental del continente, donde existen algunos observatorios a escasa altitud. Aquí existen lugares con excelente transparencia, como es el caso de Nueva Gales del Sur (Mount Stromlo), con solo 800 m de altitud, y un AOD de 0.045, según MERRA2 (Tabla 2).

América del sur y, en particular, el norte de Chile se ha convertido en la meca de los más grandes y mejores observatorios astronómicos y radioastronómicos. Destacan los observatorios de La Silla, Cerro Tololo y las Campanas, con AOD entre 0.03 a 0.04. Sus alturas van desde los 2,400 m a los 3,000 m. Ya en pleno Trópico, aparecen los observatorios de VLT (Paranal) y E-ELT (Armazones), con AOD de alrededor de 0.04. Ligeramente más al norte, y cercano a los más altos volcanes de los Andes, el observatorio Chajnantor, que varía entre los 5000 y 5600 m de altitud, actualmente el observatorio más elevado del mundo muestra un AOD estimado de 0.03. Estos valores son realmente extraordinarios, y tienden a confirmar la excelencia de esta región para el mejor desempeño posible de los observatorios astronómicos allí instalados. Además, la logística de todos ellos es muy favorable, pese a hallarse en un país distante, y en una región remota. Los datos pueden apreciarse en la tabla 3 y en la figura 30.

Un caso aparte lo constituyen las regiones polares, con las islas del Ártico, (Groenlandia y Ellesmere), y el propio continente helado de la Antártida, donde algunas bases científicas cuentan con instrumental astronómico y, además, existen planes ambiciosos para determinados lugares, óptimos para la investigación astrofísica actual. Aunque existe alguna discrepancia en las observaciones del polvo y los aerosoles en puntos tan altos en latitud y altitud, con valores siempre bajos de AOD, los instrumentos han de estar extraordinariamente bien calibrados, por tanto, los valores se sitúan siempre por debajo de 0.05 y, probablemente, estén gran parte del tiempo en torno a 0.02 (Tablas 2 y 3 para los datos de MERRA2 y AERONET, respectivamente). Una situación de conjunto a escala planetaria puede verse en la figura 25.

Si hacemos un análisis crítico de la literatura astronómica consultada, y la comparamos con nuestros resultados, derivados de observaciones satelitales y de estaciones de la Red AERONET, observamos con frecuencia, especialmente en lugares próximos a desiertos, o áreas polucionadas por el hombre, como los datos se refieren únicamente a los periodos donde las observaciones astronómicas fueron viables. Por tanto, en la revisión bibliográfica se observa un sesgo en el cálculo de la transparencia promedio en estos lugares. Aparte de eso, los astrónomos dan la medida de la transparencia merced a un índice expresado en magnitudes estelares, y los geofísicos recurren a un AOD, que expresa el aerosol presente en una columna atmosférica por unidad (masa de aire = 1). De alguna manera, estos índices son complementarios, pues el cálculo del AOD (usado en este capítulo), se refiere al principal contaminante, el polvo

y el humo, mientras que la extinción, en magnitudes, engloba a todos los constituyentes atmosféricos, incluyendo el aire, el polvo (AOD) y los demás componentes transparentes, que no en vano pueden ejercer una potente absorción, dependiendo de las condiciones de presión, temperatura y proporción de mezcla. Ese coeficiente de extinción es enteramente variable, también con la longitud de onda considerada. Por ello el estudio de este fenómeno es muy complejo y la simplificación que supone usar bases homogéneas de AOD, satelitales o con base en Tierra, y a escala universal, garantiza un mínimo de uniformidad, necesario a la hora de establecer algún criterio comparativo desde la perspectiva astronómica.

Este estudio ha sido necesariamente generalista, dada la amplitud del espacio a tratar (Universal), y de la longitud temporal considerada (varias décadas). No obstante, se ha puesto de manifiesto qué áreas son más favorables desde el punto de vista astronómico, y en qué grado lo son, pues los valores promedio de AOD son lo suficientemente robustos, para establecer sin apelativos, las bondades de transparencia, deducibles de nuestra particular recopilación y análisis de datos.

8 A MODO DE EPÍLOGO

Hemos podido observar que, junto a causas puramente naturales (aerosoles de los desiertos, cenizas y gases volcánicos), tenemos la pertinaz presencia de aerosoles de tipo antropogénico en la atmósfera de toda la Tierra, principalmente debidas a la minería y las emisiones industriales, cuando no incendios forestales. Sus efectos son importantes en los países en vías de desarrollo, sobre todo, durante la época de la quema de rastrojo de la cosecha anterior. Son paradigmáticos los casos de China, India, Brasil y los países del Sahel. Países que dan cuenta de la mayor parte de estas emisiones, principalmente, de humo, cuyas partículas muy finas, pueden persistir semanas o meses en la atmósfera, antes de poder ser arrastradas por la lluvia y la gravedad terrestre.

De todos los lugares investigados con observatorios astronómicos, así como de las observaciones de los satélites en órbita terrestre, se deduce que los lugares a altas latitudes (Antártida y Ártico), o de grandes altitudes (Andes, Tíbet), son los que están libres, o casi libres, de polvo y aerosoles atmosféricos, en el sentido de que puedan interferir en las medidas astronómicas, aún con los más sensibles detectores.

Se observa una alta variación de AOD en los lugares investigados. Hay bastantes estudios regionales, y pocos análisis globales del fenómeno. Al ser un fenómeno más geofísico-climático, no suele tener excesivo registro en la toma de datos de los observatorios astronómicos, deduciéndose los contenidos de aerosoles de las propias medias fotométricas estelares, efectuadas con los instrumentos acoplados al telescopio, y más raramente con instrumentos dedicados específicamente a estudiar la extinción.

En un contexto planetario, la península Ibérica y Canarias, tienen buenas características de transparencia atmosférica, con índices de AOD desde moderados a bajos.

La zona SW de Norteamérica mantiene también un nivel alto de trasparencia, si bien en línea con lo observable en la península Ibérica.

La región norte de Chile y la cordillera de los volcanes parecen mostrar los índices de AOD más bajos durante todo el año, al menos en la región templada del planeta.

Finalmente, en las regiones del Tíbet y las polares aparecen cielos completamente trasparentes, con bajísimos contenidos de polvo y aerosoles, si bien existe alguna discrepancia en los datos, dependiendo de las procedencia y método de análisis.

Las erupciones volcánicas más importantes, de las que se tienen datos, ocurren varias veces por siglo, llegan a obscurecer los cielos de todo el planeta, durante muchos meses, siendo el caso de la erupción del volcán de la isla de la Palma en 2021 un caso menor, pues sus efectos han sido ostensibles pocos meses, y muy centrados en la zona de la erupción, donde, a la postre, existen observatorios astronómicos importantes.

Dada la dispersión de estudios sobre aerosoles y fuentes de datos, normalmente orientados a análisis muy específicos (geofísicos, astrofísicos, climatológicos etc.), cada uno con sus propios índices y el empleo de una "jerga" corporativa diversa, nuestro trabajo, entendemos, puede contribuir a aportar una cierta homogeneidad y una visión de conjunto. Por tanto, creemos que hemos podido esclarecer la importancia que los aerosoles atmosféricos manifiestan en la observación de los modernos observatorios astronómicos, desde una perspectiva mundial. Así, hemos señalado algunos de los lugares o regiones donde la concentración antropogénica o natural de aerosoles puede arruinar la observación astronómica durante meses, y excepcionalmente durante años.

Por orden de importancia cuantitativa, quizá sea el aerosol de los desiertos el más pertinaz y perjudicial, astronómicamente hablando, seguido de los humos de derivados de incendios de todo tipo y por las industrias y, finalmente, las partículas provenientes de las erupciones volcánicas, fenómeno más acotado, espacial y temporalmente, aunque puede ser de gran intensidad.

BIBLIOGRAFÍA

Aceituno J., Sánchez, S. F., Aceituno, F. J., Galadi-Enriquez, D., Negro, J. J., Soriguer, C., & Sánchez Gómez, G. (2011). An All-Sky Transmission Monitor: ASTMON. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 123, 1076-1086. doi: 10.1086/661918

Angione, R. J., & de Vaucouleurs, G. (1986). Twenty years of atmospheric extinction at McDonald Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 98, 1201-1207. doi: 10.40678837

Bourassa, A. E., Rieger, L. A., Zawada, D. J., Khaykin, S., Thomason, L. W., & Degenstein, D. A. (2019). Satellite limb observations of unprecedented forest fire aerosol in the stratosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 9510-9519. doi: 10.1029/2019JD030607

Caton Harrison, T., Washington, R. & Engelstaedter, S. (2019). A 14-year climatology of Saharan dust emission mechanisms inferred from automatically tracked plumes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 9665-9690. doi: 10.1029/2019JD030291

Clausen, H. B., Hammer, C. U., Hvidberg, Ch. S., Dahl-Jensen, D., Steffensen, J. P., Kipfstuhl, J. & Legrand, M. (1997). A comparison of the volcanic records over the past 4000 years from the Greenland Ice Core Project and Dye 3 Greenland ice cores. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102, 26707-26723. doi: 10.1029/97JC00587

de Vaucouleurs, G. (1965). Atmospheric extinction at McDonald Odservatory, 1960-64. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 7(454), 3-7. doi: 10.1086/128144

Cuevas, E., Baldasano, J.M., Rodríguez, S., Romero, P.M., Alonso-Pérez, S., Basart, S. & Pérez, C. (2009). *Report on the Incidence of African dust intrusions at the Astronomical Observatories of the Canary Islands: characterization and temporal analysis.* Recuperado de https://www.iac.es/sites/default/files/documents/2018-06/cuevas_et_al_2009.pdf

de Vaucouleurs, G. & Angione, R. J. (1974). Atmospheric extinction at McDonald Odservatory, 1960-68, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 86, 104-115. doi: 10.40675505

Eck T.F., Holben, B. N., Reid, J. S., Dubovik, O., Smirnov, A., O'Neill, N. T., Slutsker, I., & Kinne, S. (1999). Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104, 31333-31350. doi: 10.1029/1999JD900923

NASA. Wordlwide. Recuperado de https://worldview.earthdata.nasa.gov/

Ferrare, R., Ismail, S., Browell, E., Bracket, V., Clayton, M., Kooi, S., Melfi, S. H., Whiteman, D., Schwemme, G., Evans, Kr., Russell, P., Livingston, J., Schmid, B., Holben, B., Remer, L., Smimov, A., & Hobbs, P. V. (2000). Comparison of aerosol optical properties and water vapor among ground and airborne lidars and Sun photometers during TARFOX. *Journal of Geopysical Research*, 105, 9917-9933. doi: 10.1029/1999JD901202

Garcia-Gil, A., Muñoz-Tuñon, C., & Varela, A.M. (2010). Atmosphere Extinction at the ORM on La Palma: A 20 yr Statistical Database Gathered at the Carlsberg Meridian

Telescope. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 122, 1109-1121. doi: 10.1086/656329

Generoso, S., Bey, I., Labonne, M., & Breon, F.M. (2008). Aerosol vertical distribution in dust outflow over the Atlantic: Comparisons between GEOS-Chem and Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO). *Journal of Geopysical Research*, 113. doi: 10.1029/2008JD010154

Guerrero-Rascado, J. L., Ruiz, B., & Alados-Arboledas, L. (2008). Multi-spectral lidar characterization of the vertical structure of Saharan dust aerosol over southern Spain. *Atmospheric Environment*, 42, 2668-2681. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.12.062

Hartmann, W. K. & Lockwood, G. W. (1970). Visibility variations at Tucson, Arizona and Kitt Peak National Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 82, 1346-1351. doi: 40676472

Holben B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanre, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., & Smirnov, A. (1998). AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sensing of Environment*, 66(1), 1-16. doi: 10.1016/S0034-4257(98)00031-5

Bullard, J.E., & Mockford, T. (2018) Seasonal and decadal variability of dust observations in the Kangerlussuaq area, west Greenland, *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 50(1), S100011. doi: 10.1080/15230430.2017.1415854

Komppula, M., H. Lihavainen, A.-P. Hyvärinen, V.-M. Kerminen, T. S. Panwar, V. P. Sharma, & Viisanen, Y. (2009). Physical properties of aerosol particles at a Himalayan background site in India. *Journal of Geopysical Research*, 114, D12202. doi: 10.1029/2008JD011007

Remer, L. A., Tanré, D., & Kaufman, Y. J. (1996). Algorithm for remote sensing of trppospheric aerosol from MODIS: Collection 5. Product ID: MOD04/MYD04. Recuperado de https://modis-images.gsfc.nasa.gov/_docs/MOD04-MYD04_ATBD_C005.pdf

Liu, H., Remer, L. A., Huang, J., Huang, H.C., Kondragunta, S., Laszlo, I., & Jackson, J. M. (2014). Preliminary evaluation of S-NPP VIIRS aerosol optical thickness. *Journal of Geopysical Research*, 119, 3942-3962. doi: 10.1002/2013JD020360

Luo, Y., Zheng, X., Zhaoc, T., & Chen, J. (2014). A climatology of aerosol optical depth over China from recent 10 years of MODIS remote sensing data. *International Journal of Climatology*, 34, 863-870. doi: 10.1002/joc.3728

Muhs, D. R. (2013). The geologic records of dust in the Quaternary. Aeolian Research, 9, 3-48. doi: 10.1016/j.aeolia.2012.08.001

NASA. Aerosol optical thickness (1 month – TERRA/MODIS). Recuperado de https://neo.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MODAL2_M_AER_OD

NASA. Aerosol Robotic Network (AERONET). Recuperado de https://aeronet.gsfc.nasa.gov/

NASA. Worldview. Recuperado de_https://worldview.earthdata.nasa.gov/

Obregón, M. A., A. Serrano, M. L. Cancillo, V. E. Cachorro and C. Toledano (2015). Aerosol radiometric properties at Western Spain (Cáceres station). *International Journal of Climatology*, 35, 981-990. doi: 10.1002/joc.4031

Power, H. C. & Goyal, A. (2003). Comparison of aerosol and climate variability over Germany and South Africa. *International Journal of Climatology*, 23, 921-941. doi:10.1002/joc.918

Preunkert, S. & Legrand, M. (2013). Towards a quasi-complete reconstruction of past atmospheric aerosol load and composition (organic and inorganic) over Europe since 1920 inferred from Alpine ice cores. *Climate of the Past*, 9(4), 1403-1416. doi:10.5194/cp-9-1403-2013

Rieger, L. A., Zawada, D., Bourassa, A. E., & Degenstein, D. A. (2019). A ultiwavelength retrieval approach for improved OSIRIS aerosol extinction retrievals. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 7286-7307. doi: 10.1029/2018JD029897

Rufener F. (1986). Extinction Variations at La Silla. *The Messenger*, 44, 32-35. Recuperado de https://adsabs.harvard.edu/full/1986Msngr..44...32R

Sanap, S. D. & Pandithurai, G. (2015). Inter-annual variability of aerosols and its relationship with regional climate over Indian subcontinent. *International Journal of Climatology*, 35: 1041-1053. doi: 10.1002/joc.4037

Sánchez S. F., Aceituno, J., Thiele, U., Pérez-Ramirez, D., & Alves, J. (2007). The Night Sky at the Calar Alto Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 119, 1186-1200. doi: 10.1086/522378

Schmid B., Michalsky, J. J., Slater, D. W., Barnard, J. C., Halthore, R. N., Liljegren, J. C., Holben, B. N., Eck, T. F., Livingston, J. M., Russell, P. B., Ingold, T., & Slutsker, I. (2001). Comparison of Columnar Water-Vapor Measurements from Solar Transmittance Methods. *Applied Optics*, 40, 1886-1896. doi: org/10.1364/AO.40.001886 Sheel V., Guleriab, R.P., & Ramachandrana, S. (2018). Global and regional evaluation of a global model simulated AODs with AERONET and MODIS observations. *International Journal of Climatology*, 38(Suppl. 1), e269–e289. doi: 10.1002/joc.5367

Sheridan, S., Helen, C., Power C., Senkbeil, J. C. (2007). A further analysis of the spatio-temporal variability in aerosols across North America: Incorporation of lower tropospheric (850-hPa) flow. *International Journal of Climatology*, 28, 1189-1199. doi: 10.1002/joc.1628

Siher, E.A., Zouhair, B. & Fossat, E. (2002). Diurnal Atmospheric Extinction Over Oukaïmeden Observatory using IRIS Database: 1989–1997. Comparison With The Other IRIS Sites. *Experimental Astronomy*, 13, 159-170. doi: 10.1023/A:1025535615069

Smirnov, A., Holben, B.N., Lyapustin, Slutsker, I., & Eck, T.F. (mayo de 2004). AERONET processing algorithms refinement. En: A. Smirnov, B. N. Holben, A. Lyapustin, I. Slutsker, I., & T.F. (Eds.), *Optical Properties of Atmospheric Aerosol in Maritime Environments. AERONET Workshop.* El Arenosillo (Moguer), España.

Steinbring, E., Jean-Charles Cuillandre, and Eugene Magnier (2009). Mauna Kea Sky Transparency from CFHT SkyProbe Data. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 121, 295-302. doi: 10.1086/597766

Steinbriong, E., Ward, W., & Drummond, J.R. (2012). Astronomical Sky Quality Near Eureka, in the Canadian High Arctic. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 124:185-194. doi: 10.1086/664444

Storelvmo T. (2017). Aerosol Effects on Climate via Mixed-Phase and Ice Clouds, *Annual Review Earth and Planetary Sciences*. 45, 199-222. doi: 10.1146/annurev-earth-060115-012240

Stothers, R. (2004). Stratospheric Transparency Derived from Total Lunar Eclipse Colors, 1665-1800. *Publications of The Astronomical Society of The* Pacific, 116, 886-893. doi: 10.1086/425537

Stothers, R. (2005). Stratospheric Transparency Derived from Total Lunar Eclipse Colors, 1801-1881. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 117, 1445-1450. doi: 10.1086/497016

van der Bilt, J. (1917). Transparency of the atmosphere at the Mount Wilson Solar Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the* Pacific, 29, 41-48. doi: 10.40710506

Varela, A.M., Munoz-Tunon, C., García-Lorenzo, B., Fuensalida, J.J., Castro-Almazán, J.A. (2012). On the use of remotely sensed data for astronomical site characterization. Proceedings SPIE, 1-18

Vergaz, R., Cachorro, V.E., de Frutos, A.M., Vilaplana, J.M., & de la Morena, B.A. (2005). Columnar characteristics of aerosols by spectroradiometer measurements in the maritime area of the Cadiz Gulf (Spain). International Journal of Climatology, 25, 1781-1804. doi: 10.1002/JOC.1208

Wang, W., Mao, F., Pan, Z., Gong, W., Yoshida, M., Zou, B., & Ma, H. (2019). Evaluating aerosol optical depth from Himawari-8 with Sun photometer network. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 5516-5538. doi: 10.1029/2018JD028599

Zhang, Y., et al. (2012). Aerosol daytime variations over North and South America derived from multiyear AERONET measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D5). doi: 10.1029/2011JD017242.

APÉNDICE A

GLOSARIO

AERONET

Red de estaciones de observación de aerosoles y otros constituyentes de la atmósfera terrestre, situados en lugares estratégicos de todo el mundo. La red AERONET aunque extensa, adolece de que muchas estaciones funcionan de manera discontinua y a veces por poco espacio de tiempo. No obstante, constituye una valiosa fuente de datos para propósitos de investigación de composición atmosférica y también es utilizada para prepósitos de calibración de los satélites en órbita terrestre que monitorizan la atmosfera continuamente.

AOD (AERONET)

La profundidad óptica de aerosol (AOD) es la medida de aerosoles (por ejemplo, neblina urbana, partículas de humo, polvo del desierto, sal marina) distribuidos dentro de una columna de aire desde el instrumento (la superficie de la Tierra) hasta la parte superior de la atmósfera. El voltaje (V) medido por un fotómetro solar es proporcional a la irradiancia espectral (I) que llega al instrumento en la superficie. La parte superior estimada de la irradiancia espectral de la atmósfera (Io) en términos de voltaje (Vo) se obtiene mediante mediciones con fotómetros solares en el Observatorio Mauna Loa en Hawái. La profundidad óptica total (TTOT) se puede obtener utilizando la siguiente ecuación según la ley de Beer-Lambert-Bouguer:

 $V(\lambda) = Vo(\lambda)^* d^{2*} exp[-\tau(\lambda)TOT * m]$

donde V es el voltaje digital medido en la longitud de onda λ , Vo es el voltaje extraterrestre, d es la relación entre el promedio y la distancia real Tierra-Sol, TTOT es la profundidad óptica total y m es la masa de aire óptica *(Holben, 1998).* Otros componentes atmosféricos pueden dispersar la luz y deben tenerse en cuenta al calcular el AOD. La profundidad óptica debida al vapor de agua, la dispersión de Rayleigh y otros gases traza dependientes de la longitud de onda deben restarse de la profundidad óptica total para obtener el componente del aerosol:

 $\tau(\lambda)$ Aerosol = $\tau(\lambda)$ TOT - $\tau(\lambda)$ water - $\tau(\lambda)$ Rayleigh - $\tau(\lambda)$ O3 - $\tau(\lambda)$ NO2 - $\tau(\lambda)$ CO2 - $\tau(\lambda)$ CH4

Angstrom Parameter

La distribución del tamaño de los aerosoles se puede estimar a partir de la profundidad óptica espectral del aerosol, típicamente de 440 nm a 870 nm. La pendiente negativa (o primera derivada) de AOT con longitud de onda en escala logarítmica se conoce como el parámetro de Angstrom (α). Este parámetro se puede calcular a partir de dos o más longitudes de onda utilizando un ajuste de mínimos cuadrados. Los valores de α superiores a 2.0 indican que existen partículas de modo fino (por ejemplo, partículas de humo y sulfatos), mientras que los valores de α cercanos a cero indican la presencia de partículas de modo grueso, como el polvo del desierto (Eck, 1999).

Dispersión de Mie

En la atmósfera real, donde se encuentran las nubes y los aerosoles, las dimensiones de las partículas no son despreciables en relación con la longitud de onda de la radiación. Sus propiedades dispersantes dependen de su tamaño, de su forma, de la parte real e imaginaria de su índice de refracción, así como de la distribución de tamaños. La primera teoría completa sobre la dispersión esférica fue desarrollada por Gustav Mie (1908). Según la dispersión de Mie, se produce más dispersión hacia delante que en ninguna otra dirección. Conforme aumenta el tamaño de la partícula, la dispersión hacia delante también aumenta.

Esta teoría describe la interacción de una onda plana con un dieléctrico esférico. La teoría de Mie se basa en las ecuaciones de Maxwell, a partir de las cuales se puede obtener la ecuación de onda vectorial en coordenadas esféricas. Haciendo uso de la separación de variables, se puede expresar la solución de los campos eléctrico y magnético de la onda incidente en forma de funciones matemáticas. Para el campo de dispersión a mucha distancia de la esfera, la dispersión y la sección de extinción se pueden determinar en función de una serie infinita que contiene asociados los polinomios de Legendre y las funciones esféricas de Bessel.

La solución de Mie se publicó hace muchos años. Debido a que no existe solución analítica al problema, su aplicación ha tenido que esperar al desarrollo computacional, que permite el cálculo numérico del gran número de funciones y coeficientes puestos en juego.

Dispersión de Rayleigh

La intensidad *l* de la luz dispersada por una pequeña partícula (menor que la longitud de onda de la luz visible), en un haz de luz de longitud de onda λ e intensidad *l*₀ viene dada por:

$$I = I_0 (1 + \cos^2 \theta) / 2R^2 (2\pi/\lambda)^4 (n^2 - 1/n^2 + 2) (d/2)^6$$

donde *R* es la distancia a la partícula, θ es el ángulo de dispersión, *n* es el índice de refracción de la partícula y *d* es el diámetro de la partícula. Los gases atmosféricos son los principales responsables de este tipo de dispersión de la luz.

Extinción atmosférica

La extinción atmosférica es el parámetro astronómico que estima la transparencia del cielo. Las fuentes principales que afectan negativamente a la transparencia del cielo son las nubes (vapor de agua) y aerosoles (incluidas partículas de polvo).

La extinción atmosférica produce cambios en la intensidad de la radiación que la atraviesa. Depende del lugar de observación y la altitud. Tiene tres componentes principales: Absorción molecular (o telúrica), dispersión de Rayleigh (para partículas mucho menores que la longitud de onda del fotón) y dispersión por aerosoles (para partículas de tamaño comparable a la longitud de onda del fotón).

La extinción atmosférica es importante para la astronomía en tierra en las bandas óptica del infrarrojo cercano. Esto es debido a que la extinción está asociada con la absorción molecular y dispersión por aerosoles de los fotones que llegan a la atmósfera terrestre procedente de objetos astronómicos.

La extinción atmosférica se mide usando monitores de extinción. Su funcionamiento se basa en observar estrellas estándares en diferentes filtros a diferentes alturas sobre el horizonte. Comparando el brillo intrínseco de estas estrellas con el brillo medido en esa noche puede obtenerse la extinción. Por otro lado, el contenido de aerosoles en la atmósfera puede ser medido usando satélites (Varela et al., 2012).

Extinción estelar

La extinción es un término utilizado en astronomía para describir la absorción y la dispersión de la radiación electromagnética emitida por objetos astronómicos. Estos fenómenos son debidos a la existencia de materia, principalmente gas y polvo, entre el objeto emisor y el observador. El concepto de extinción interestelar se atribuye generalmente a Robert Julius Trumpler, aunque sus efectos fueron identificados por primera vez en 1847 por Friedrich Georg Wilhelm Von Struve. En el caso de observadores en la Tierra, los efectos de la extinción provienen tanto del medio interestelar como de la atmósfera terrestre. Asimismo, puede haber extinción debida al polvo circunestelar alrededor del objeto observado (por ejemplo, en discos de acrecimiento alrededor de estrellas). La acentuada extinción atmosférica en ciertas longitudes de onda (por ejemplo, rayos X, ultravioleta e infrarrojo) requiere el uso de observatorios espaciales. Debido a que, en longitudes de onda visibles, la luz azul es atenuada con mayor intensidad que la luz roja, los objetos se observan más enrojecidos de lo esperado, por lo cual, la extinción estelar es llamada muchas veces «enrojecimiento interestelar».

Precipitable Water

La extinción causada por el vapor de agua ocurre principalmente en el intervalo de longitudes de onda infrarrojas, y es poco importante en el visible, comparado con los aerosoles.

La determinación de la cantidad total de vapor de agua de la columna utiliza tres canales: 675 nm, 870 nm y 940 nm. La transmisión total (T) se calcula para 675 nm y 870 nm. utilizando profundidades ópticas de Rayleigh y aerosol. La transmisión total para 940 nm (T940) se determina mediante extrapolación. La transmisión extrapolada a 940 nm se resta de la transmisión medida a 940 nm (T940) proporcionando la transmisión perdida, solo debido al vapor de agua (Tw). (Schmid 2001; Smirnov 2004)

APÉNDICE B

OBSERVATORIOS DE LOS QUE SE DISPONE DE DATOS DE EXTINCIÓN AOD

Lista de observatorios donde se encontraron datos de extinción (última columna), junto con la altitud del sitio, la profundidad óptica \mathbf{T} y la extinción en magnitudes correspondientes, para cada altitud, a K = 1 a nivel del mar. Nuestros datos de extinción por aerosoles están expresados en términos de AOD y son equivalentes al (\mathbf{T}) de la tabla inserta abajo.

Nombre del sitio	Altitud (m)	Profundidad óptica τ	Extinción <i>Kv</i> para <i>K</i> ' = 1 (mag)	Extinción medida <i>Kv</i> (mag)
Observatorios de Mauna Kea	4160	0.083	0.090	0.103 a
Observatorio La Silla	2360	0.124	0.134	0.13b
Roque de los Muchachos Obs.	2344	0.124	0.135	0.13c
Observatorio Paranal	2635	0.115	0.125	0.13d
Apache Point Obs.	2790	0.111	0.120	0.14e
Observatorio Palomar	1712	0.151	0.164	0.158f
Observatorio Lick	1260	0.177	0.192	0.183g
Beijing Astronomical Obs.	880	0.206	0.223	0.228h

Nombre del sitio	Altitud (m)	Profundidad óptica τ	Extinción <i>Kv</i> para <i>K</i> ' = 1 (mag)	Extinción medida <i>Kv</i> (mag)
San Pedro Mártir	2795	0.110	0.120	0.13Yo
Observatorio de Calar Alto	2160	0.131	0.142	0.15j
Observatorio Devasthal	2450	0.121	0.131	0.16
Muelle de revestimiento	1130	0.186	0.202	0.18k
Observatorio McDonald	2026	0.137	0.148	0.16
Cerro Tololo	2210	0.129	0.140	0.14m

Fuente: Falchi et al. (2023)

CAPITULO III AGUA PRECIPITABLE (PWV)

1 OBJETIVOS

El objetivo general es mostrar a escala universal y en grandes regiones de interés las concentraciones espacio-temporales del agua precipitable para el conjunto de la columna atmosférica, conocida por sus siglas en inglés como PWV. Para se calculan los promedios generales de las últimas décadas, así como las variaciones interdecadales y los aspectos geográficos con mayor relevancia en el contenido total del PWV.

En cuanto a unos objetivos más específicos estos pueden ser resumidos en los siguientes:

Localizar las áreas más idóneas para la observación astronómica, no solo en el visible, sino en el infrarrojo y en radio submilimétrico, pues el PWV juega un papel determinante.

Realizar un análisis específico y particularizado de la península Ibérica, Canarias y norte de África, pues constituye nuestra región de análisis preferencial para testar su potencial astroclimático respecto al PWV.

Analizar de forma pormenorizada el caso de Sierra Nevada (SE de España), pues creemos que constituye una zona de especial interés para la astronomía infrarroja a nivel del continente europeo.

2 INTRODUCCIÓN

El aire es una mezcla de gases compuesta, principalmente, por nitrógeno y oxígeno y, en bastante menor proporción, por argón y dióxido de carbono, constituyendo todos ellos el 99.98% de su volumen (aire seco).

El aire contiene cantidades muy variables de vapor de agua (PWV) que se integra en la atmósfera y proviene, principalmente, de los océanos, la tierra y los ríos. En virtud de la constante evaporación y precipitación se mantiene un equilibrio de la masa de vapor de agua a nivel planetario. No obstante, su contenido es muy variable desde el ecuador a los polos, y con una escala de altura muy próxima a 1.3 Km. sobre las regiones polares. Este valor se ha podido deducir experimentalmente en muchos casos sobre los niveles bajos de la troposfera terrestre. En regiones templadas se ha observado que dicha escala de altura es de alrededor de 1.8 Km., y de más de 2 Km. en zonas ecuatoriales y tropicales.

No obstante, diversos fenómenos de transporte vertical y horizontal de las masas de aire causan que variaciones del contenido total de vapor de agua para esas dos componentes (vertical y horizontal).

Bien es cierto que, casi todo el vapor de agua en un lugar dado queda confinado en una estrecha capa atmosférica llamada "capa limite planetaria". La misma varía entre 600 y 1500 m. sobre el nivel del mar en latitudes templadas. Aunque su ubicación depende de la rugosidad del terreno, de la temperatura y situación atmosférica en general.

El vapor de agua es un agente importantísimo en el transporte de energía, tanto meridional como latitudinal. El vapor de agua es, además, un fuerte absorbente de la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre y, por tanto, contribuye al efecto invernadero, junto a otros gases atmosféricos, como el dióxido de carbono y el metano.

En cuanto al ciclo hidrológico del agua a escala planetaria aún hoy en día hay factores y mecanismos poco entendidos, que hacen difícil estimar el balance global de la precipitación, la fusión y evaporación, siendo mejor conocidas parcelas concretas de la superficie terrestre, donde existen suficientes datos climáticos.

La investigación sobre el contenido de agua atmosférica reviste un creciente interés, al tratarse del único componente que se encuentra en la atmósfera en los tres estados, participando de una manera directa y mayoritaria en los procesos de atenuación de la radiación. Su evolución a lo largo del año resulta ser de especial importancia en el desarrollo de la vida de nuestro planeta.

En cuanto a la medida del vapor de agua atmosférico, se ha determinado de forma muy consistente, mediante radio sondeos, midiendo temperatura y humedad relativa a lo largo del ascenso de la sonda, normalmente hasta unos 20 Km. de altura.

Más recientemente se ha generalizado la medida del vapor de agua atmosférico mediante radiómetros a bordo de satélites climatológicos, que barren continuamente la superficie y la atmósfera terrestre.

La técnica más socorrida, por lo económica y funcional, es la determinación radiométrica de la transmisión atmosférica en las ventanas del infrarrojo próximo, siendo el propio observatorio, u otro lugar cercano, la base de medición. Para los

detectores de silicio se suelen seleccionar filtros interferenciales de 880 nanómetros para el continuo solar; y los 940 nanómetros para la banda de absorción más próxima. El set de filtros debe ser estrecho, con una anchura equivalente de unos 10-20 nanómetros. Los instrumentos más sencillos pueden hacer medidas de absorción de vapor de agua midiendo la radiación solar o la lunar durante la noche. Su principal inconveniente es que a muy bajas cantidades de agua precipitable (<1 mm.) el instrumento tiende a ser impreciso, por la poca señal diferencial entre los dos filtros mencionados.

La determinación del vapor de agua mediante los satélites de posicionamiento global (GPS) (Galisteo, 2013) es una novedosa técnica que se basa en el retraso de la señal de los satélites en órbita terrestre. Al cruzar la atmósfera atravesarán un paso mayor o menor de vapor de agua; y este gas es muy absorbente en ciertas longitudes de onda en las cuales trabajan los GPS. El retraso de la señal por receptores precisos, corregidos los efectos de otros gases atmosféricos y la masa total de aire atravesada, determina, con cierta precisión y comodidad, la cantidad de agua precipitable sobre un lugar dotado de tales receptores.

Digamos, además, que el PWV sobre un lugar está muy influido por el resto de las variables meteorológicas y por factores de tipo geográfico. Entre los ciclos más destacados estaría el diurno, el estacional y el anual. Se han observado ciclos más largos, en todo caso mal entendidos y relacionados con fenómenos como El Niño Oscilación Meridional (fenómeno ENSO) y, también, posiblemente, el ascenso de temperatura de las últimas décadas. No obstante, se han reportado lugares donde la cantidad de agua precipitable parece declinar con el transcurso de las últimas décadas, fenómeno quizá relacionado con el cambio climático y la tendencia hacia una mayor aridez de los bordes de los principales desiertos del planeta.

3 FUENTES Y METODOLOGÍA

3.1 ORGANIGRAMA DE FLUJO DEL CAPITULO PWV E INVERSIÓN

En la figura 44 podemos ver como el PWV es una variable clave en la observación astronómica del infrarrojo y en radio. Como puede desprenderse de su lectura, se ha realizado un estado de la cuestión, mediante un análisis histórico-geográfico, describiendo sus hitos y las preocupaciones principales de los astrónomos en este sentido.



Figura 44. Diagrama del flujo de la información en el capítulo de PWV

La comprensión del tema aquí trabajado se ha realizado a través de varias fuentes: desde las documentales a la revisión bibliográfica, hasta el análisis de largas bases de datos de tipo digital, incorporando, además, un estudio de casos concretos. El proceso avanza con la generación de cartografía, a nivel regional y local, apoyado todo en sistemas GIS-QGIS. Tras el apartado de discusión, se pasa a unas conclusiones que presentan al documento como un todo, de cara a posibles estudios futuros que tengan relación con la variable que nos ocupa en esta sección.

3.2 FUENTES DOCUMENTALES

De acuerdo con Revuelta (1985) existen un buen número de métodos de medida del agua precipitable entre los que destacan: 1) Métodos aerológicos, basados en radio sondeos con globos sonda, extraídos de la página web de Meteociel; 2) Métodos basados en las medidas de humedad absoluta en superficie, con datos accesibles a partir de la página web de la Organización Meteorológica Mundial; y 3), Métodos actinométricos, mediante fotómetros o radiómetros en el infrarrojo. Es quizá este último el método más preciso y fiable. Aquí podemos consultar las estaciones de Aerosol Robotic Network (AERONET), en la página web de la NASA, que proveen también datos de cantidad de agua precipitable (PWV).

3.3 BASES DE DATOS DIGITALES Y DE IMÁGENES SATELITALES

Son las de mayor cobertura espacial y con mayor continuidad. Solo están disponibles, aproximadamente, desde 1980, aunque algunas bases cuentan con reanálisis de datos superficiales y aerológicos que llegan hasta 1900.

Las bases de datos digitales se han obtenido a partir del ERA 5 del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) y de la Nasa Earth Observations (NEO), esta última accesible a partir de: https://neo.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MODAL2_M_SKY_WV

Para la combinación de MODIS TERRA/AQUA con resolución espacial de 1 km. disponemos de imágenes diarias en: https://worldview.earthdata.nasa.gov/.

En cualquier caso, la consistencia de los datos de AERONET es alta, su distribución casi universal, su cobertura temporal alta, en muchos casos, por lo que constituye una herramienta básica a la hora de estudiar el agua precipitable sobre los más diversos entornos físico-climáticos de la superficie terrestre (Pérez-Ramirez et al., 2014).

Los modelos atmosféricos que derivan el PWV de satélites en órbita son calibrados mediante las cantidades reales medidas por los radiosondeos simultáneos de la red mundial de estaciones de radiosondeo, y por las estaciones fijas de AERONET.

MODIS es el instrumento satelital principal para obtener datos sobre el PWV. Las derivaciones son hechas sobre zonas que muestran reflejo suficiente para captar la radiación solar en su retorno. Los canales usados están en las cercanías de 0.905, 0.936 y 0.940 micras, y bandas en el continuo adyacente a 1.24 y 0.865 micras. Se estimaron los errores de calibración entre un 5% y 10%, produciendo una serie de imágenes estándares con contenido digital del valor de PWV georreferenciados. Los valores presentan una resolución temporal diaria, semanal y mensual. La NASA provee rutinariamente estas imágenes en un grid de 0.1x0.1 grados en longitud y latitud, para toda la Tierra.

En origen, existen dos archivos de productos de datos de vapor de agua MODIS: MOD05_L2, que contiene datos recogidos desde la plataforma Terra; y MYD05_L2, que contiene datos recogidos desde la plataforma Aqua. Los datos de Nivel 2 se generan a la resolución espacial de 1 km, utilizando el algoritmo de infrarrojo cercano durante el día, y a una resolución de 5x5 píxeles de 1 km, tanto de día como

de noche, utilizando el algoritmo de infrarrojo, cuando al menos nueve campos de visión están libres de nubes. No obstante, para un trabajo de generalización a escala universal hemos preferido usar los promedios mensuales que se suministran ya tratados, a una resolución de 0. 1º por píxel en formato GeoTiff. Con ello se pueden hacer composiciones muy variadas del comportamiento universal del vapor de agua con MODIS/TERRA desde el año 2000 hasta la fecha.

En nuestro posterior desarrollo y tratamiento de las imágenes con cobertura mundial, utilizaremos este tipo de imágenes, utilizando la base de datos MODIS de la NASA y también la de ERA5 del ECMWF. Esta fuente tiene carácter abierto en los niveles que nosotros precisamos, mostrando los datos digitales reducidos suficiente precisión, para hacer viable una comparación a escala global.

Mediante un modelo atmosférico, Gao y Kaufman (2003) consiguen determinar la cantidad de agua precipitable (PWV), que, a su vez, servirá como calibración para los canales infrarrojo cercano del MODIS, a bordo de los satélites de NASA, TERRA y AQUA. Las derivaciones se realizan sobre áreas que tienen superficies reflectantes en el IR cercano, como áreas terrestres claras, nubes y océanos. El algoritmo se basa en observaciones sobre la atenuación que produce el vapor de agua en la radiación reflejada por las superficies y las nubes.

Chen y Liu (2016) presentan de manera universal la concentración y tendencia temporal del PWV atmosférico desde 1979 a 2014, usando la base de datos de ERA del ECMWF. También se colectaron los datos de los radiosondeos rutinarios con muestras de todo el globo; de recepción de satélites GPS; así como análisis de los datos de microondas enviados igualmente por satélites.

En conjunto se encontró una la tendencia temporal positiva del PWV con un incremento de alrededor de 0.61 mm. por década, con un error del 33%. La correlación lineal entre temperatura superficial y PWV también ha resultado positiva, sobre gran parte de los océanos y ambos polos. Sin embargo, correlaciones positivas o negativas pueden ocurrir en otras zonas de cambiante mezcla, en las zonas de máxima convergencia intertropical, solo explicables por cambios climáticos a largo plazo, quizá de una década o de mayor duración, según nuestra apreciación.

El capítulo muestra, por lo demás una amplia cartografía de los contenidos globales del PWV y de su distribución estacional; así como de sus ritmos de cambio. Consideramos, pues, este trabajo como básico a la hora de entender la distribución universal de PWV para los observatorios astronómicos, actuales y propuestos.

Cheng et al. (1996) encuentran una modulación extra a la típica variación estacional de las cantidades globales de PWV sobre la red mundial de radio sondeo y también de los datos e imágenes enviados por los satélites climatológicos. Dicha modulación tiene una moderada amplitud y una frecuencia del orden de 90 a 150 días. Todo ello superpuesto al ciclo hidrológico anual. Ello prueba también la fiabilidad del sistema Global Data Assimilation Systems (GDAS), y también del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). El método es consistente, en aquellas áreas donde existe una buena densidad de estaciones meteorológicas de radiosondeo; mientras que es poco sólido en aquellas áreas con pobre cobertura espacial de estaciones de toma de datos. Ello muestra también la complejidad de evaluación global de la cantidad del agua precipitable, dentro de un margen de error razonable, a partir de modelos o imágenes de satélite, principalmente, para zonas remotas del planeta, como los polos.

4 REVISIÓN HISTÓRICO-GEOGRÁFICA

4.1 LOS PRIMEROS TIEMPOS

Un somero recorrido histórico, por la bibliografía que hemos seleccionado para la variable del PWV, nos lleva hasta Dunham (1939), que es de los primeros en señalar como la existencia de vapor de agua en la atmósfera terrestre puede dificultar, seriamente, la forma de detectar el vapor de agua en las atmósferas de los planetas del Sistema Solar, sobre todo en Marte y Venus.

Otro problema se presentaba a la hora de estimar la temperatura de la superficie y las atmósferas de los planetas cercanos a la Tierra. Los planetas emiten radiación en dos formas, una la propiamente reflejada del Sol, en el visible y la otra de su propia emisión, centrada en el infrarrojo, y que corresponde a la emisión de un cuerpo negro, según la temperatura superficial del planeta. Afortunadamente, se vió que ambas radiaciones estaban ampliamente separadas y era posible discriminarlas, mediante filtros adecuados, en el foco del telescopio. En el caso de la emisión infrarroja tenemos una fuerte limitación debido al vapor de agua y dióxido de carbono presente en la atmósfera terrestre, lo cual deja solo unas estrechas ventanas en varias zonas del espectro. Además, se requiere conocer la cantidad total de agua precipitable (PWV) en la atmósfera de la Tierra sobre el lugar de observación, para poder aplicar las oportunas correcciones de transmisión.

Deducido que Mercurio no tenía atmósfera apreciable, los esfuerzos se centraron en la composición de las atmósferas de Venus y Marte, resultando que la atmósfera de Venus contenía una alta cantidad de CO₂ y, quizá, menos de 1 mm. de agua precipitable, lo cual parecía dificultar la existencia de vida. En cuanto al planeta Marte, pronto quedó claro que era un planeta con una atmosfera débil, y con muy poco contenido de vapor de agua, y temperaturas muy bajas en superficie todo el año. Los gases más abundantes encontrados, fueron el CO₂ y algo de oxígeno, pero en cantidad de existencia de vida en Marte, creencia muy extendida al menos hasta los años 60 del siglo XX. En los planetas gigantes, Júpiter y Saturno, tampoco se detectó vapor de agua medible, y de existir estaría en forma de cristales de hielo, en nubes tapadas por las capas superiores de la gruesa atmósfera de estos planetas, compuesta de hidrógeno y helio, fundamentalmente.

Ya en la década de los 60 del pasado siglo se iniciaron una serie de pruebas estratosféricas en Estados Unidos, a fin de determinar si la cantidad de agua precipitable sería significativa para la medida en bandas de infrarrojo lejano, desde aeronaves, globos o cohetes. Efectivamente, Murcray et al. (1960) encuentran cantidades de agua precipitable iguales o superiores a 20 micras en alturas superiores a 30 Km., sobre el desierto de Nevada en verano. Estos resultados sugieren que solo el espacio exterior está libre de vapor de agua en cantidades suficientes como para afectar a la trasmisión de todo el espectro infrarrojo de los cuerpos celestes. Las medidas fueron realizadas con globos sonda sobre Alamogordo, EE. UU., lugar de la célebre base de desarrollo de armas nucleares. Los resultados sugieren que existen aún núcleos con concentraciones anómalas de vapor de agua por encima de los 30 Km.

Una localización extraordinaria para astronomía infrarroja, la cima de Mauna Kea, en Hawái, fue la propuesta por Morrison et al. (1973). Las excelentes condiciones halladas, sobre el contenido de vapor de agua, indicaron que era posible tener cantidades del orden de 0.9 mm. Con todo, cabe advertir que parecen referirse a condiciones excepcionales. No en vano, reconocimientos posteriores, como los de Warner et al. (1977) y Wallace at al. (1984), dan valores promedios entre 2 y 3 mm. para el PWV en el mismo observatorio.

Wesphal (1974) realiza un estudio radiométrico en el año 1969, sobre 8 lugares del territorio continental de Estados Unidos, Islas Hawái, Baja California (México) y norte de Chile. El objetivo fue conocer el lugar que ofrecería las mejores condiciones

para astronomía infrarroja. De los resultados conseguidos, se dedujo que probablemente, White Mountain, a 4340 m. de altura, en la cordillera de Sierra Nevada, en California, fuese el lugar con más bajo contenido de agua precipitable, con alrededor de una media anual de 1.5 mm. No obstante, Mauna Kea, a 4.200 m de altura, parece ofrecer características más homogéneas a lo largo del año, amén de mejores accesos y, en general, unas mejores condiciones climáticas.

Situándonos en el hemisferio sur, Hansen y Camainque (1975), encuentran, para el Cerro Tololo, en Chile, cantidades de agua precipitable entre 1 y 7 mm., con una mediana que puede estimarse en torno 3 mm. El medidor fue de tipo radiométrico diferencial, con filtros en 1.65 micras y 1.87 micras (banda de absorción). Ello puede deducirse de los gráficos e histogramas que muestran en su trabajo. Se observa una alta estacionalidad, con máximos en el verano del hemisferio sur. Señalan que la correlación entre humedad absoluta medida en superficie con la correspondiente a la medida integrada del radiómetro infrarrojo solo fue moderada, por lo que concluyen que esta técnica no es recomendable usarla, salvo en trabajos previos de campo, o como medida complementaria a las mediciones radiométricas desde el mismo lugar.

Roosen y Angione (1977) efectúan una serie de observaciones para establecer la cantidad de agua precipitable en una serie de lugares. Estas mediciones se realizaron en observatorios astronómicos vinculados con la "Smithsonian Institution". Para ello utilizaron datos de humedad absoluta superficial y de vapor de agua precipitable. Podríamos indicar que, es un trabajo novedoso para la época , pero que con el devenir del tiempo se ha mostrado poco preciso, no ya por el método de correlación usado, perfectamente válido, sino por la falta de homogeneidad, extensión y sincronicidad de los datos meteorológicos. Aun así, se pone de manifiesto la superioridad de lugares de gran altitud y enclavados en lugares desérticos, como el Monte Santa Catherine (Monte Sinaí, Egipto), con 2 mm. de PWV, o lugares como Calama, Chile, en el desierto de Atacama.

Con objeto de poder comparar zonas muy distantes entre sí, Warner (1977) sugiere dividir los lugares de astronomía infrarroja en tres categorías:

A) aquellos con PWV < 1mm.; B) aquellos con 1-3 mm. PVW; y C) aquellos con >3 mm. PWV.

En este artículo se estudiaron 5 lugares: Chacaltaya, cerca de la Paz (Bolivia) a 5300m con 2.31 mm. PWV; Mount Lemont (USA) con 2.7 mm. PWV; Mauna Kea, Hawaii, con 2.04 mm. PWV; Wyoming, USA, con 1.5 mm. PWV; y, Cerro Tololo, Chile, con ~3 mm

PWV. Las medidas fueron efectuadas con medidores para la ventana de 10 micras, en el infrarrojo térmico. Esta técnica ya fue expuesta por Westpal en 1974.

Greve (1978) reporta las medidas de vapor de agua atmosférico en diversos lugares con observatorios en Europa occidental. En el "survey" se pudo medir la atenuación solar a distintas horas del día, durante varios meses del año 1975. Su intención fue seleccionar el mejor candidato posible para un observatorio de radio, con posibilidades en el milimétrico y submilimétrico. En el caso de Sierra Nevada (Granada) reportaron cantidades de 2.1 mm. de PWV; aunque la serie de medidas fue muy corta en el tiempo para establecer un promedio anual consistente.

Igualmente, para la zona alpina del observatorio suizo del Gornergrat, a 3150 m. de altitud, Bensammar (1979), realizando medidas en el infrarrojo lejano, entre 20 y 40 micras, deduce que la cantidad promedio de PWV para dicho observatorio estaría en torno a los 2.7 mm. Valores que, como veremos, se ajustan bastante a nuestros resultados para el caso de Sierra Nevada (Granada), en la misma época.

4.2 LOS ESTUDIOS DE PWV DESDE 1980

4.2.1 Agua precipitable en latitudes templadas

Los grandes observatorios astronómicos del mundo lo están en dicha zona por la benevolencia de su clima y su accesibilidad. Fue un asunto de elección, probablemente, relacionado con su conveniencia logística, y conforme se fue desarrollando la astronomía en el siglo XIX y XX, cuando se fueron desplazando lejos de las grandes ciudades, y situándose a altitudes moderadas (de 2000 a 3000 m.)

Con el desarrollo de la astrofísica moderna, a partir de la 2^a mitad del siglo XX, se vio necesario y conveniente emplazar los observatorios astrofísicos en montañas muy elevadas, de hasta 5000 m. o más, y en las regiones polares, donde las condiciones, de temperatura y humedad atmosférica (PWV), hacían viable las exigentes observaciones que había que llevar a cabo, no solo en el visible, sino también en el infrarrojo y en las bandas de radio de longitud de onda submilimétrica. Esto solo podía conseguirse en lugares tan exóticos como las cimas del Tíbet, los Andes, o la alta meseta Antártica. Esto supuso y es, actualmente, un desafío logístico sin precedentes, con costes económicos elevadísimos, aunque solo sea para establecer una simple estación automática, o controlada remotamente.

Se barajan escenarios futuros para instalar nuevos observatorios de gran tamaño, en la parte más elevada del altiplano Antártico, o en las cimas de la meseta del Tíbet y los Andes, algunos de ellos en ejecución actualmente, como el E-ELT de la ESO (telescopio extremadamente grande del Observatorio Sur de Europa). Todo ello da una idea de la competitividad extrema entre academias científicas de todo el mundo, nucleadas actualmente en tres polos, los americanos, los europeos y los chinos.

Podemos considerar a Landau (1982) como uno de los pioneros en medir el vapor de agua (PWV) en lugares remotos, con condiciones primitivas de campo y presupuesto escaso. Así nos presenta un diseño compacto de monitor de vapor de agua, usable tanto con el Sol como con la Luna. Se usan series de medidas diferenciales, entre dos filtros interferenciales estrechos, centrados en el continuo y la banda de absorción del infrarrojo próximo, respectivamente. Este diseño fue adoptado por nosotros para medidas de vapor de agua PWV en Sierra Nevada (Granada) y Calar Alto (Almería).

Entre sus virtudes cabe señalar que es un instrumento robusto, fácil de transportar y que rinde medidas realistas de cantidad de vapor de agua, tanto de día como durante la noche.

La transparencia atmosférica en la ventana del IR lejano entre 19 y 23 micras es medida por Grasdalen et al. (1985) en el observatorio de Wyoming (E.E.U.U.). Para ello utilizan bolómetros de Germanio-Galio, enfriados a la temperatura del helio líquido. El sitio de Wyoming parece ser tan bueno como las mejores ubicaciones propuestas hasta la fecha para astronomía infrarroja, como Mauna Kea, Wheeler Peak o Mount Graham (todos estos observatorios están por encima de los 3000 metros sobre el nivel del mar). El comportamiento anual mostró una mayor estacionalidad en el territorio continental de Estados Unidos, respecto a Mauna Kea, en las Islas Hawái, que está a una latitud de solo 19º N.

Quesada (1989), autor de la presente tesis doctoral, realizó medidas radiométricas en el Pico Veleta, a 3400 m de altitud, en Sierra Nevada (España), desde 1983 a 1987. Las observaciones se efectuaron en el refugio de montaña del mismo pico Veleta, y también en puntos más bajos. Estas últimas medidas de base se corrigieron por efecto de la altitud. Todo ello se comparó con las medidas en los mismos meses, realizadas, en este caso, en el observatorio de Calar Alto, en Sierra Filabres (Almería). En total se midió el PWV durante 180 días y 117 noches, con promedios respectivos de 3.7 y 2.1 mm. de PWV. Estos resultados son enteramente similares a aquellos reportados para los promedios de Mauna Kea. Esto cualifica a las
altas cumbres de Sierra Nevada como un sitio muy adecuado para astronomía infrarroja. Al tiempo que la accesibilidad está garantizada aún en periodo invernal, cuando se dan las temperaturas más bajas y las precipitaciones nivosas.

Como es un lugar de la zona templada de la Tierra, se observa una marcada estacionalidad, con máximos en verano y a mediodía, y mínimos en invierno, durante la noche. Las cantidades mínimas, medidas con varianza notable, están muy por debajo de 1mm. de PWV, y pueden ocurrir durante varios días y noches seguidas en invierno. Se observó también una disminución exponencial con la altura, de forma que la escala de altura (ver glosario términos) para el PWV sobre Sierra Nevada debe ser del orden de 1800 m.

Stevens (2005), en un artículo sobre turbulencia, nubosidad, precipitación y otros tópicos climáticos relacionados con los mecanismos de transporte de la humedad atmosférica, señala tres formas básicas o predominantes en que se produce el transporte de humedad, como son la formación de estratocúmulos, los cúmulos formados por los "trade winds" y aquel dominado por la convección marítima. Cada uno de estos regímenes está estrechamente ligado a los componentes principales de la circulación atmosférica y son fenómenos de una gran variedad de formas. Los recientes avances en simulación numérica indican que los avances en detección remota de fenómenos relacionados con el transporte de humedad y, por tanto, del PWV, serán muy importantes en el futuro.

Los análisis previos de contenido de vapor de agua, desde la superficie hasta el nivel de 500 hPa, son debidos a Durre et al. (2009). Los datos provienen de radio sondeos y comprenden 300 estaciones en el hemisferio norte, para un periodo de análisis de 1973 a 2006.

La tendencia ajustada del PWV es de un incremento significativo de 0.45 mm. de PWV por década para los lugares continentales; también es muy significativo el incremento en las islas del Pacifico tropical oeste, Japón y Estados Unidos, para todas las estaciones del año. Esta situación podría deberse a un paulatino aumento de la temperatura troposférica y a los cambios en los mecanismos de transporte de humedad, que han continuado en los años recientes. Esto parece estar de acuerdo, en líneas generales, con los datos de ERA 5, que nosotros exponemos en nuestros resultados y estudio de casos.

Pérez et al. (2010), continuando la caracterización de Sierra Nevada (España) llevada a cabo por Greve (1978) y Quesada (1989), y para su posible inclusión como lugar de astronomía infrarroja y radio submilimétrica, señalan como es uno de los mejores lugares de más de 3,000 metros de altitud en el sur de Europa, con sus consiguientes ventajas logísticas. De las cantidades deducidas al pico Veleta, a 3400 m., se extrajo que al menos el 25% de las medidas caen por debajo de 2.3 mm. de PWV. Estos resultados son comparables con las cantidades de 2.1 mm de PWV obtenidos en observatorios consolidados, como Mauna Kea, en las Islas Hawái.

Sierra Nevada (Granada) es, por lo tanto, un lugar muy conveniente para astronomía infrarroja en la zona templada del planeta. Sería posible obtener resultados científicos competitivos, comparado con lugares de extrema latitud y dificultades logísticas manifiestas, y con una latitud aún aceptable a 37º N, con razonable cobertura celeste sobre ambos hemisferios.

Pérez-Ramírez et al. (2011) deducen la cantidad de agua precipitable PWV desde la ciudad de Granada. Para ello utilizan fotometría solar y estelar, mediante instrumental, con filtros en la banda de absorción del infrarrojo cercano, en 0.940 micras. Las medidas fueron validadas mediante la técnica Raman-Lidar, de manera simultánea, reduciendo las medidas a 1 atmósfera de espesor, mediante una expresión de transmisión atmosférica simplificada. Los errores estimados del 3% con el Sol y del 6% con las estrellas se consideran bastante aceptables. No obstante, en promedio, las medidas con Raman-Lidar mostraron unos valores inferiores a los obtenidos con los fotómetros, en un 9%.

De las tablas y gráficos de estos autores nosotros deducimos unos 12 mm. de PWV para la altura de la ciudad de Granada, a 680 m de altitud, y para los días 9 al 13 de mayo de 2007.

Se observan los picos de subida de PWV en las horas centrales del día, y mínimos relativos durante la noche, lo cual está totalmente de acuerdo con nuestras apreciaciones para Sierra Nevada, Pico Veleta, a 3400 m de altitud (Quesada, 1989).

La cantidad de agua precipitable sobre el observatorio de Izaña, en la Isla de Tenerife, a 2373 m., es determinada por Barreto et al (2013). Para ello utilizan un fotómetro de tipo CIMEL, que puede medir el brillo lunar en ciertas bandas del vapor de agua en el infrarrojo próximo. Los datos corresponden al periodo julio-agosto de 2011. Al mismo tiempo se dedujo el contenido de agua precipitable con radiosondas, equipadas con la sonda estándar RS 92 de Vaisala. Adicionalmente utilizan un receptor GPS, que permitió estimar la cantidad de PWV sobre el observatorio.

Se observó que las medidas fotométricas tienden a sobrestimar la cantidad de PWV respecto a las medidas de radio sondeo y de GPS. Ello indica la necesidad de extremar la precaución a la hora de elegir los filtros que se usan en el fotómetro CIMEL. Las cantidades presentadas por los autores corresponden a una época de verano, y se muestran en línea con lo esperado para la época del año, la latitud y la elevación del lugar. El resultado gráfico se sitúa en torno a los 8 mm. de PWV. Cantidades menores son esperables en invierno; aunque también en verano pueden presentarse días con muy bajo contenido de vapor de agua.

Perez-Ramirez et al. (2014) presentan un trabajo donde se discuten diversas técnicas para derivar el PWV atmosférico como los GPS, la técnica MWR o la radiometría de microondas, frente a la técnica radiométrica de filtros estrechos, en el visible e infrarrojo cercano, que es la principal aportación a la base de datos de la red mundial de AERONET de la NASA. Los autores señalan que todas estas técnicas son consistentes. No obstante, indican que los promedios de AERONET son un 5-10% inferiores a los de otros procedimientos. El error puede deberse a errores de reducción a columna atmosférica unidad, situación geográfica o la elección de los filtros usados en la red.

En un extenso artículo, Bock et al. (2014) nos muestran una gran cantidad de técnicas de postproceso, para homogeneizar largas series de datos, derivadas de radiosondeos, de todo el mundo, comparando con los datos GPS e imágenes de satélite, en lo que respecta al PWV. En conjunto, los autores seleccionan 81 estaciones representativas de todas las latitudes. El trabajo se orienta más en el sentido de entender la distribución del PWV en toda la Tierra y del balance hidrológico. También analizan su relación con el cambio climático.

Un modelo predictivo del contenido de PWV fue desarrollado por Pérez-Jordan et al. (2015), sobre el observatorio de la isla de la Palma (Canarias). Este modelo fue construido en base a los radiosondeos diarios efectuados en la cercana isla de Tenerife (Güímar), durante el periodo de un año. Ello permitió validar el modelo predictivo de PWV de la Palma a partir del nivel de los 2200m de altura. La prueba del modelo mostró correlaciones de más de 0.90, considerando todos los casos.

Los valores obtenidos, una mediana de 3.8 mm. PWV para la isla de la Palma, y de 18.3 MM PWV para Güímar, a solo 105 m. sobre el nivel del mar. Estos valores fueron también cotejados con los obtenidos de forma rutinaria en la Palma, mediante la técnica de recepción GPS.

En el este de Anatolia (Turquía), Özdemir et al. (2018) nos presentan resultados de PWV sobre el observatorio Karakaya. Aquí se prevé instalar un telescopio de 4 metros, a más de 3000 metros de altitud. El resultado mediano de PWV fue de 2.7 mm.

Éste quedó determinado sobre el lugar mediante recepción GPS durante un periodo de un año.

Adicionalmente, también presentan resultados y correlaciones con otros parámetros astroclimáticos, en este caso derivados de radiosondeos de estaciones próximas. Estos valores de PWV son excelentes, pero quedan también lejos de los estándares actuales para infrarrojo lejano y submilimétrico, donde se han establecido algunos lugares con cantidades medianas anuales de PWV iguales o inferiores a 1 mm. (Cerro Chajnantor y Antártida); lugares que se clasifican como clase A: < 1 mm. PWV. En nuestra apreciación es un lugar comparable a nuestro caso de Sierra Nevada (Granada); y tal vez a Mauna Kea. Lugares igualmente clasificables como Clase B (1 a 3 mm. PWV de media anual).

Li et al. (2018) utilizan una técnica espectroscópica para determinar el PWV sobre Apache Point Observatory a 2788 m. Aquí opera el telescopio SLOAN, con el que se realizó un aclamado "survey" digital de todo del cielo.

Estudiando la anchura equivalente de la banda H (dada por el espectroscopio acoplada al telescopio) se puede determinar, con precisión, el vapor de agua en condiciones nocturnas. Con ello es posible establecer una dinámica del PWV y de su comportamiento, en pocas horas días o semanas. Se encontró que las variaciones son inferiores a 1 mm. de vapor de agua para periodos de una hora, con precisión instrumental de 0.11 mm. de PWV. Los valores medianos anuales para Apache Point Observatory se estimaron en 3.8 mm PWV; resultados en línea para un observatorio continental en la latitud de EE. UU.

4.2.2 Los lugares antárticos y árticos

Townes y Melnick (1990) son de los primeros en reportar las cantidades de PWV sobre la base Scott del Polo Sur (USA), a 2800 metros de altitud, en lo que pudiésemos considerar una falda del gran casquete de hielo, que alcanza sus máximas alturas cerca de la base rusa de Vostok, a 3500 metros, y Dome A, con 4080 metros, siendo estos lugares muy inaccesibles, logísticamente hablando.

Los autores citados encuentran para el Polo Sur que las cantidades pueden ser tan bajas como 0.1 mm. de PWV en el invierno correspondiente; y que el promedio anual se sitúa en torno a 0.3 mm de PWV. Estas cantidades hacen del lugar un sitio excelente para trabajar en ventanas del infrarrojo lejano, en torno a 20 micras, y también en radio submilimétrico, entre 0.3 y 1.3 mm. Las medidas fueron efectuadas con fotómetros y radiómetros, y contrastadas con frecuentes vuelos de radiosondeos, efectuados desde la misma estación, si bien en meses diferentes. Se encontró que las medidas espectroscópicas eran sistemáticamente más bajas que las de radiosondeos, debido a que los sensores de la sonda están saturados y operan pobremente a temperaturas inferiores a -30° C. De igual forma, se sugiere en este trabajo que los valores de PWV de Vostok deben ser del orden del 80% respecto al Polo Sur. Este valor quedó deducido a partir de las diferencias altitudinales; la altura de Vostok es unos 600 metros superior.

En el mismo contexto, los mejores lugares para astronomía infrarroja submilimétrica son señalados por Lawrence (2004). El autor trajo a colación aquellos situados en la alta meseta Antártica, a unos 4000 metros de altitud, donde la alta trasparencia atmosférica y muy baja temperatura (~-70° C), garantizan el máximo de trasmisión y el mínimo ruido atmosférico. Las condiciones de la meseta Antártica son inigualables; aún si estos se encontrasen a mayor altitud. El autor señala tres localizaciones óptimas que se corresponde con las denominaciones de Dome C, a 3250 metros, Dome A, a 4080 metros, y Dome F, a 3810 metros, aproximadamente. Si comparamos Dome A, con el sitio de la base del polo sur geográfico, situado a 2800 metros de altura, la ganancia en sensibilidad en el infrarrojo próximo es del orden de 10, siendo del orden de 2 veces respecto a Dome C. Ganancias mucho mayores, de hasta 100 o 1000 veces se pueden deducir si comparamos Dome A con el resto de los observatorios de gran altitud, situados en la zona templada del planeta, como pueden ser Mauna Kea en Hawái, a 4200 m. y Llano Chajnantor, a 5000 metros, en el norte de Chile; especialmente, si nos atenemos al fondo de ruido térmico en el infrarrojo lejano y radio submilimétrico.

Utilizando equipos propios de satélites artificiales, Walden et al. (2005) realizan una serie de experimentos sobre Dome C, en la Antártida (75° Sur, a la espera 3,250 m), que muestran que este es uno de los lugares más fríos y secos de la Tierra. El lugar tiene, por tanto, un alto potencial para observación astronómica, particularmente en la zona infrarroja, y también es un lugar adecuado para probar equipos aeroespaciales. Las medidas se efectuaron durante los veranos de 2003 y 2004. Se realizaron además unos 100 radiosondeos de calibrado. Los experimentos mostraron que la ventana infrarroja Q, de 18.7 micras, tiene una excelente transmisión para astronomía infrarroja, muy difícil de conseguir en otros lugares. Los cálculos indican que la transmisión en tiempo de verano sobre las bandas M, N y Q es mayor que el 95%.

El balance de humedad atmosférica sobre los océanos que rodean al continente austral y la meseta de la Antártida es estudiado por Tietäväinen y Vihmab (2008). En su trabajo, toman de base un periodo 1979-2001, con datos procedentes de la base ERA-40 (Reanalysis of the European Centre for Medium Range Forecasts, ECMWF). El transporte meridional de grandes células de humedad hace el mayor traslado de agua precipitable hacia la Antártida. A su vez, la circulación polar cerca de la costa Antártica, permite que la zona de convergencia de ambas corrientes se traduzca en la mayor concentración de PWV cerca de la costa o en los océanos adyacentes, en una latitud que va desde los 64º S a 68º S.

El análisis de los datos de 1979-2001 no muestra una tendencia significativa respecto a las precipitaciones, que se mantiene en torno a 177 +/- 8 mm. sobre la plataforma de hielo costera de la Antártida. No obstante, para la evaporación neta (evaporación-condensación), sobre todo en el sector continental, si se muestra un balance positivo. Gráficamente, estos autores nos muestran que la humedad absoluta en superficie raramente excede los 0.5 g/Kg. en latitudes meridionales de más de 80°. Ello se traduce en bajas precipitaciones, casi siempre en forma de nieve.

Yang et al. (2009), mediante un consorcio de instituciones científicas, chinas y americanas, presentan los primeros resultados fiables sobre condiciones climáticas y PWV para el Dome A (Chinese Kunlun Station -80.250000, +77.060000, a 4087 metros de altitud, en la cima del casquete de hielo antártico).

La base denominada "PLATO" es fundamentalmente controlada remotamente, dada la dureza del entorno, de extremo frio, baja presión y sequedad atmosférica. Consta de los siguientes instrumentos automatizados: 1) CSTAR., un array de pequeños telescopios de gran campo fotográfico; 2) Gattini., un medidor de nubosidad y brillo de fondo de cielo; 3) DASLE., una estación meteorológica de superficie: 4) Pre-Heat., un radiómetro submilimétrico destinado a medir la opacidad atmosférica (T) en las bandas de radio de menor longitud de onda y deducir el PWV; 5) SNODAR., sondeo acústico de la atmósfera para medida de turbulencia atmosférica, relacionadas con el "seeing" óptico.

El SNODAR mostró que la capa más turbulenta se ciñe a los primeros 20 metros de altura, y raramente asciende a los 50 metros, aún en verano antártico (febrero).

De las distintas medidas se dedujo que es posible tener <de 0.1 mm. de PWV durante largos periodos de tiempo, cubriendo así las máximas expectativas de poder observar el infrarrojo lejano y radio submilimétrico, en ventanas radiométricas muy problemáticas. De hecho, no se ha encontrado ningún otro lugar con menor contenido atmosférico de PWV en toda la superficie de la Tierra.

En la región polar del hemisferio norte, Weaver et al., (2018) evalúan el PWV atmosférico sobre la Base Nunavut, en la parte norte de la isla Ellesmere, en el ártico canadiense. Los datos tomados en tierra, mediante un espectrógrafo infrarrojo, y de los procedentes de varios satélites meteorológicos, se complementaron con los datos estándar del radiosondeo de la cercana base de lanzamiento de Eureka, cercana a los 80º latitud norte.

El artículo discute extensamente las correlaciones entre estos diversos instrumentos y las variaciones espaciales del PWV sobre todo el área, mostrando que la proporción de mezcla alcanza sus máximos en las inmediaciones de la tropopausa polar, a unos 8-10 km. altitud, mostrando grandes variaciones espacio-temporales. No obstante, la cantidad total de variación de PWV es pequeña comparada con las observadas en las primeras capas de la troposfera.

4.2.3 La región del norte de Chile y Argentina

En esta región, de máximo interés astronómico, aparece el trabajo de Giovanelli et al. (2001). Estos autores presentan las características óptico/infrarrojo de una serie de lugares en el entorno del desierto de Atacama, en el norte de Chile. Se consideran medidas radiométricas en superficie y obtenidas a través de radiosondeos. Atendiendo a sus resultados, conviene resaltar como el llano Chajnantor, a 5000 metros de altura, es un lugar adecuado para la observación astronómica, con un PWV de mediana anual de solo 1.2 mm. La escala de altura encontrada en el área de Chajnantor es de 1.13 Km. Por ello el PWV decae alrededor de 0.5 mm. en el vecino cerro del mismo nombre, ya a 5650 metros de altura. Se encontró que los valores diurnos son ligeramente más altos que los nocturnos.

El llano Chajnantor (Figura 45) resultó finalmente elegido para albergar las futuras instalaciones de radioastronomía de ALMA, y otras instituciones interesadas en el infrarrojo lejano y radio submilimétrico.

Figura 45. Una perspectiva del llano Chajnantor de 5000 m. de altitud, con el complejo de antenas radio ALMA en el centro. Justo detrás, en la parte central, se observa el cerro Chajnantor a 5650 m. de altitud, donde se están haciendo las primeras pruebas de un observatorio infrarrojo de extrema altitud. Se estima que las cantidades de PWV son muy parecidas a las de la alta meseta Antártica



Fuente: Google Earth.

Otárola et al. (2010) presentan las características de la columna de agua precipitable (PWV) sobre varios lugares candidatos para albergar el gran telescopio de estadounidense TMT en Chile. La preselección de estos lugares se hizo en base a criterios climatológicos, a partir de análisis de imágenes del satélite meteorológico GOES, considerando aquellas zonas intertropicales con menor nubosidad y dado el dominio de los centros de altas presiones subtropicales permanentes.

De entre los lugares estudiados, destacan por su idoneidad, el cerro Armazones, en el desierto de Atacama, el cerro Tolonchar, ambos en Chile, y Mauna Kea, en Hawái. Todos ellos con bajas cantidades de agua precipitable.

Como ejemplo de trabajo geográfico-climático conviene citar a Schulz et al. (2011). Estos autores analizan largas series de datos de precipitación en la parte norte de Chile, en concreto la región situada entre los paralelos -18 y -30 de latitud sur. También presentan resultados de nubosidad para la misma región, a fin de evaluar una posible evolución climática, en esta área de especial interés en astronomía. Señalan la incidencia del fenómeno ENSO, pues tiende a aumentar las precipitaciones en la región cuando se presenta en su fase cálida. Las precipitaciones parecen mostrar una tendencia negativa a lo largo del siglo XX. Se observa también una abrupta subida

de temperaturas en los años 70 del mismo siglo, con una posterior disminución de las mismas. Esta tendencia se manifiesta también un aumento de la sequedad del aire, al menos en la región costera del norte de Chile. Para las últimas décadas se detecta una disminución de la nubosidad y de la cobertura nubosa total (Cloud Cover). Tanto la menor precipitación como la disminución de la nubosidad debe de traducirse en un menor contenido total del PWV.

Se ha observado también un descenso de la altura de la base de las nubes en la zona de la inversión relacionada con los vientos alisios. El nivel de condensación ha pasado de 1030 m. a 930 m. desde 1960 a 2010. Este fenómeno tiene que ver con un reforzamiento paulatino de las altas presiones subtropicales de la región y, posiblemente, con las tendencias plurianuales del fenómeno ENSO y los patrones de teleconexión como el Interdecadal Pacific Oscillation (IPO), con el que guarda un cierto grado de correlación.

Sarazin et al. (2013) utilizan medidores de alta precisión del PWV en los observatorios de ESO en Chile (Paranal y Chajnantor), con registros continuos del agua precipitable en ambos lugares.

El PWV puede ser altamente cambiante, y aunque los modelos atmosféricos pueden predecirlo con cierta anticipación, las condiciones locales influyen de manera notable. Esto dificulta la asignación óptima de programas de observación con requerimientos de muy baja cantidad de agua precipitable (PWV). No obstante, los autores avanzan que con los modelos actuales y las medidas locales de PWV es posible derivar de manera fiable el PWV de forma suficientemente anticipada. En concreto, las medianas para el sitio de Chajnantor de ALMA y APEX se situaron entre 0.5 y 1.5 mm. de PWV, para el 50% del tiempo.

El observatorio Paranal, a una cota más baja de 2,600 metros, está dedicado, principalmente, al óptico, con el Very Largue Telescope (VLT); mientras que las instalaciones del Chajnantor, a 5,080 metros, están enfocadas casi en exclusiva a radio interferometría y radio submilimétrico.

Paranal significó una mejora notable respecto al observatorio La Silla, pues ya a primeros de los 80 del siglo XX se vio que su PWV era netamente inferior, con el 40% de las noches despejadas, con menos de 2 mm. de PWV, y enteramente comparable a Mauna Kea, en Hawai.

Marin et al. (2015) desarrollan un método de estimación del PWV a partir de los datos e imágenes de los satélites meteorológicos GOES. En particular, se centran en el cerro Toco, a 5500 m., en el llano de Chajnantor. Estos autores encuentran que los

errores en la determinación del PWV por este método pueden ser notables, cifrándolos entre un 30% y un 50%. Recomiendan usar el modelo GFS (Global Forecasting System) para estimar el vapor de agua a partir del GOES. Pues la relación de estas medidas, en periodo nocturno, muestran un relativo buen acuerdo. Aun así, en los valores diurnos aparecen desencuentros relativamente importantes. Los valores medianos para el grupo de medidas oscilan entre 0-1.2 mm. de PWV. Con todo, la mediana es de aproximadamente 1.5 mm. de PWV en el lugar del APEX, a 5080 m. de altitud, en Chajnantor. En nuestra opinión este valor puede ser el más realista, si pretendemos compararlo con otros lugares del mundo, objeto de este trabajo.

4.2.4 Los observatorios de radio submilimétrico

Las características de transmisión, en el canal submilimétrico, de la estación del Polo Sur, a 2800 metros de altitud, fueron expuestas por Chamberlin (2001), con medidas efectuadas desde 1992.

Los cambios en el contenido de vapor de agua PWV están relacionados con las opacidades en las ventanas submilimétricas. Las condiciones invernales se mostraron particularmente favorables en las ventanas que van desde 0.3 a 1.3 mm. Las cantidades deducibles de PWV se situarían en el entorno de 0.5 mm; para el caso del periodo invernal son aún más bajas, con un valor medio de 0.3 mm. Estos datos están entre los más bajos del mundo. La altura de la Troposfera se encontró mediante radiosondas en torno a los 10000 metros de altitud.

Tremblin et al. (2012), en una comparación mundial de lugares óptimos, para radio submilimetrico, señalan como principal problema de estos sitios el hecho de que presenten cantidades apreciables de PWV. Ello debilita, sobremanera, la señal de radio de las estrellas. El estudio partió de un amplio conjunto de medidas. Consideraron datos de los observatorios e imágenes o datos proporcionados por satélites meteorológicos. En especial emplearon el satélite METOP-A, para derivar perfiles atmosféricos de vapor de agua, sobre cada lugar, de los que destacamos los considerados para la Antártida, Chile, Mauna Kea, Groenlandia y el Tíbet (11 casos de estudio en total). El periodo analizado cubre los años 2008-2010. Se presentan tablas con el porcentaje anual del número de casos agrupados en los percentiles 10, 25, 50 y 75. La ventana radiométrica se extendió desde 350 micras a 3mm. de longitud de onda. Adicionalmente, como comparativa, se presentaron valores típicos medidos en PWV para el observatorio estratosférico SOFIA, que volaba hasta 2022 a bordo de un

avión modificado, portando un gran telescopio infrarrojo, y que durante horas permanece a una altura de 12 a 14 km., normalmente sobre EE. UU. En cuanto a los observatorios en tierra, los lugares más prometedores se encuentran en la Antártida; concretamente en el Dome A y Dome C. Señalan otros lugares de alto potencial, como son los altos Andes, en torno al Llano Chajnantor (Chile), el cerro Macon (Argentina) y en la estación de investigación de Summit (Groenlandia).

La extrema sequedad del Polo Sur es señalada por Chamberlin y Grossman (2012); aunque ya había sido objeto de atención, dado su bajo contenido de agua precipitable (PWV). El objetivo de estudiar la Antártica se relaciona con el desarrollado de la astronomía infrarroja y submilimétrica, inabordable en los lugares templados de la Tierra. El análisis parte de una base de datos de 50 años, particularmente de radiosondeos, realizados desde la estación del Polo Sur de EE. UU., situada a -90º latitud y a 2800 metros de elevación, en el casquete de hielo antártico.

Las radiosondas de las primeras décadas adolecen de cierta imprecisión, debido a la perdida de respuesta de los detectores de humedad a muy baja temperatura, y bajo contenido de vapor de agua. Con todo, si consideramos que la atmósfera polar está casi siempre cerca de la saturación, es posible derivar los valores de PWV, con bastante aproximación, a partir de los valores de la humedad absoluta, dado que esta variable si puede medirse con fiabilidad. Los datos se complementan también con el estudio de opacidad de la atmósfera en el submilimétrico, determinando los valores del parámetro Tau (τ) en la ventana de 860 GHz. Ambas series de datos parecen tender a un promedio anual de PWV del entorno de 0.88 mm. para la base estadounidense de Scott. No se ha encontrado una tendencia significativa entre 1961-2010, excepto quizá entre 1990-2010, ya que aquí el PWV fue algo inferior.

Ricaud et al. (2012) también miden el contenido de humedad absoluta, así como su evolución, entre enero y junio de 2010, sobre la base Concordia de Dome C, a 3232 m., sobre el casquete de hielo antártico.

La intención fue establecer la altura y potencia de la turbulencia en las capas más bajas de la estratosfera polar, en un rango de 10 a 200 metros de altura sobre las bases científicas. Se utilizó un instrumental compuesto por radiómetros centrados en la banda de 183 GHz, así como en la línea del oxígeno, a 60 GHz. Se tuvieron en cuentan la humedad absoluta y la temperatura, para caracterizar las inversiones observadas a lo largo de estos meses, mostrando su evolución diurna y estacional.

El complicado balance radiativo entre el hielo y la atmósfera inmediatamente encima de él dan cuenta de las variaciones observadas en condiciones de estabilidad atmosférica. Ésta se mostró más constante durante la noche polar, con una altura máxima de inversión en torno a 30-50 metros de altura. Durante el ciclo de luz solar son más marcados los ascensos de capas turbulentas que, ocasionalmente, pueden llegar a los 350 metros de altitud sobre la base.

Suen et al. (2013) consideraron lugares en los que ya existen observatorios astronómicos de primer nivel, presentando resultados sobre PMV y nubosidad.

Los datos e imágenes proceden del análisis de las bases de satélites TERRA y AQUA/MODIS, sobre 7 observatorios situados a gran altitud. Al ser picos o mesetas, con poca extensión superficial, se requirió extraer la información del satélite con la máxima resolución espacial posible (1 Km. por píxel), a fin de discriminar los puntos elevados sobre terreno adyacente, situado a menor altitud. Los datos considerados se extienden desde 2001 a 2012, aunque no en todos los casos.

Se dedujeron los siguientes valores del PWV mediano:

- Dome A. 0.14-0.22 mm. PWV.
- Dome C. 0.24-0.28 mm. PWV.
- Polo Sur. 0.32- mm. PWV.
- Chajnantor. 1.1 mm. PWV
- Mauna Kea. 1.5 mm. PWV
- Barcroft. 1.7 mm. PWV.

Los autores señalan también que en la meseta del Tíbet podrían darse condiciones aún más bajas de PWV que el Llano Chajnantor. Además, advierten que la logística es más favorable en los lugares templados que en la Antártida. En nuestra opinión, los datos presentados arriba sobre contenidos de PWV es lo más ajustado a la realidad que hemos encontrado hasta ahora.

Bustos et al. (2014) y Cortes et al. (2016) describen como el llano Chajnantor y sus cimas volcánicas vecinas (Chile) son los lugares más idóneos para astronomía infrarroja y radio interferómetro y submilimétrico. Aquí el valor mediano anual del PWV es de solo 1.1 mm. Estos valores están muy próximos a los del de Dome C (Base Concordia), y las estaciones remotas en Dome A y F (meseta antártica). Lugares que parecen mostrar medianas anuales de PWV entre 0.1 y 0.3 mm. Al respecto, hay que considerar que son valores cercanos a los atribuidos para la Estratosfera.

Desde un punto de vista logístico y climatológico, en general, no cabe duda de que las zonas elevadas alrededor del desierto de Atacama son la mejor opción, frente un Ártico y Antártico con severas condiciones climatológicas y con extrema dificultad de accesos para las bases del interior del continente. Se ha estimado que el PWV en los cerros vecinos del Chajnantor (5650 M.) pueden ser la mitad a los considerados para el llano del mismo nombre, a unos 5050 m. de elevación.

Recientemente, el gobierno chileno ha declarado a esta zona como "Parque Astronómico de Atacama", para disponer de un espacio público para la observación astronómica con cualidades excepcionales. Ello indica que las observaciones más delicadas de radio submilimétrico e infrarrojo lejano deberían realizarse desde la máxima altitud posible.

Radford y Petersen (2016) realizan una evaluación sistemática sobre la ventana submilimétrica de 350 micras mediante un radiómetro del PWV. Una serie de estos radiómetros se instalaron en Mauna Kea, a 4200 m., el Polo Sur, a 2800 m., y en cerro Chajnantor, a 5650 m.

Experimentalmente encuentran que el mejor lugar de los tres, en cuanto a contenido de vapor de agua, es el Cerro Chajnantor. También deducen que las condiciones del cerro citado son mejores que las del llano Chajnantor, a unos 5050 metros de elevación, donde se halla el observatorio de radio ALMA.

La tabla de los lugares citados quedaría con estos valores para el percentil 50:

Mauna Kea	4205 m.	2.5 mm. PWV
Llano Chajnantor	5060 m.	1.7 mm. PWV
Cerro Chajnantor	5650 m.	1.1 mm. PWV
Polo Sur	2835 m.	1.3 mm. PWV

Aunque la comparativa entre estos tres lugares empieza a ser ya muy recurrente, no todos los aspectos de las características locales del PWV están bien entendidos. Así, estos autores encuentran condiciones algo mejores en el Cerro Chajnantor que en el Polo Sur; lo cual nos suscita algunas dudas, ya que las bajísimas temperaturas del Polo Sur no permiten una cantidad apreciable de PWV y, menos aún, de un ruido infrarrojo y submilimétrico como el de la zona templada tropical del Chajnantor, donde la troposfera es mucho más gruesa que sobre el Polo Sur.

Matsushita et al. (2017) estudian las condiciones del infrarrojo lejano y submilimétrico en la base Summit, en lo más elevado del casquete de Groenlandia, a 3200 m. elevación. Los autores utilizan un radiómetro de 225 GHz. Miden las opacidades (T) en dicha banda submilimétrica. Los datos relativos al T para los percentiles 25%, 50% y 75%, desde noviembre a abril, fueron de 0.046, 0.060 y 0.080, respectivamente. Para los cuartiles 25% y 50% los valores de Groenlandia son de un 10% a un 30% peores que aquellos encontrados en el desierto de Atacama, en el

"Atacama Large Millimeter/submillimeter Array" (ALMA), o el Polo Sur. Para frecuencias más bajas, de 450 GHz, las características invernales de ALMA y Summit parecen ser bastante coincidentes. Según su latitud y altitud y sus condicionantes logísticos, la base Summit, parece ser un lugar prometedor para observaciones en el infrarrojo lejano y radio submilimétrica, con condiciones de estabilidad, sobre periodos de varios días, con muy baja opacidad. Escenario similar a los determinados en el Polo Sur.

Nuevamente, Otarola et al. (2019) determinan como el vapor de agua atmosférico se ha mostrado como el principal limitante en las observaciones de radio submilimétricas y en el infrarrojo medio y lejano. Por ello, los lugares muy secos y de gran altitud son los lugares predilectos para los observatorios radioastronómicos actuales y previsibles, tal vez en las altas cumbres andinas.

Las bajas temperaturas y el viento también son factores limitantes que se han de considerar para elegir el emplazamiento de un observatorio astronómico, sobre todo, si las infraestructuras son muy grandes y presentan cargas térmicas, y gran superficie al viento. El trabajo considera no solo las condiciones del interior del desierto de Atacama y las mesetas que bordean los altos Andes por el W, como Chajnantor, sino también las cordilleras costeras, al oeste del propio desierto de Atacama. Además, la zona se ha convertido en una especie de "Meca" para la comunidad óptica internacional, con los grandes proyectos del VLT, Paranal, y ELT, en el cerro Armazones, ambos de la ESO, del Observatorio Sur Europeo (ESO); así como de las radioastronómicas de ALMA y Apex, en Llano Chajnantor. A ellas hay que sumar la iniciativa AtLAST de radioastronomía de muy larga base. Los valores finales presentados por los autores para los lugares citados, en cuanto a PWV mediano, fueron:

- 0.63 mm. Pico Chajnantor 5650 m.
- 0.90 mm. Llano Chajnantor 5080 m.
- 1.25 mm. Cerro Tolonchar 4480 m.
- 2.75 mm. Cerro armazones 3050 m.

Valores que nos han permitido ajustar la "escala de altura" para la zona de los Andes del norte de Chile, y que según nuestro estudio de casos sería del orden de 1790 m.

Las medidas radiométricas de Mlawer et al. (2019) se efectúan en regiones extremadamente secas del norte de Chile, utilizando radiometría superficial, con objeto de mejorar el conocimiento de la incidencia del vapor de agua en la espectroscopia del infrarrojo lejano. Para ello se utilizan espectrómetros infrarrojos y también interferómetros submilimétricos. Los resultados obtenidos son cotejados con los modelos teóricos de transmisión radiativa atmosférica. Los datos necesarios de temperatura y vapor de agua PWV son tomados de radiosondeos del área. Se utilizaron correcciones, tanto para la localización de las radiosondas, como para los terrenos montañosos cercanos. Cantidades tan bajas como 0.2 mm de PWV se pudieron medir, puntualmente, desde el cerro Toco, a 5600 m., cerca del llano Chajnantor. Algo que solo ocurre ocasionalmente aquí, es la norma en lugares del Antártico, como Dome A y C.

4.2.5 PWV en China y la meseta del Tibet

Ye et al. (2016) proponen el área de Ali, a 5045 metros de elevación, en la prefectura del Tíbet chino de Ngari, como una de las más idóneas para la nueva astronomía infrarroja y submilimétrica, pues pensaban que podía rivalizar con el desierto de Atacama en Chile. Para ello efectúan un reanálisis de 31 años de observaciones climáticas. Obtuvieron los siguientes resultados: un porcentaje de noches fotométricas del 57%; un seeing mediano anual de 0.8" arco; y unos valores del PWV de 2.5 mm; resultados, estos últimos, comparables a lugares situados en las inmediaciones de Atacama. Los autores sugieren, además, la posibilidad de acceder a lugares más elevados en la meseta tibetana, quizá hasta los 6000, o aún 6500 metros, donde las condiciones serían excelentes para el infrarrojo.

Este es, según nuestro criterio, uno de los lugares más exóticos propuestos hasta ahora. Ya existe alguna infraestructura de observación en la zona de Ali, y es posible que se pudiese extender a mucho mayor altura en territorio chino, hasta los 7500 metros, si bien con climatología más desfavorable y una logística inexistente.

La zona de la alta meseta del Tíbet ha sido también estudiada por Quian et al. (2018), en el sentido de determinar las características astroclimáticas en el lugar del observatorio Ali, a 32º N. y 5050 m. de elevación.

El uso de radiosondeos continuos ha permitido determinar que la casi totalidad del PWV está bajo el nivel de los 12 km. de elevación, y que muestra una tendencia estacional asociada al "monzón" local. La mediana de los valores de PWV se sitúa en torno a 2.0 mm., lo que es un valor notable, teniendo en cuenta, además, que, durante el invierno, puede descender por debajo de un 1 mm. durante largo tiempo. Esto permitiría observar en el infrarrojo lejano y en radio submilimétrico las dos zonas del

espectro más comprometidas, desde lugares templados del planeta. Este trabajo viene a completar a aquél de Ye et al., (2016), donde se presentaron, por primera vez, resultados para la zona de Ali.

4.2.6 Modelizaciones y PWV

Schoeberl et al. (2019) estudian el PWV sobre el límite de la Tropopausa, a unos 14-16 km. de altura, sobre latitudes tropicales, en la que encuentran la facilidad con que se forman cirros, debido a la alta humedad relativa, que con frecuencia supera el 80%. Durante el invierno boreal la máxima altura de esta tropopausa tropical se encuentra sobre el Pacifico occidental, presentándose unos máximos relativos sobre el norte de Sudamérica y África central. El máximo de formación de cirros se da en regiones donde la convección lleva al punto de saturación del aire cerca del nivel de la tropopausa o TTL (cercano a los 16 Km. de altitud).

Los autores presentan un modelo que reproduce la formación de cirros en esta región, y explican los mecanismos responsables de este fenómeno persistente. Para el estudio se utilizaron imágenes de satélite, vuelos de avión y radiosondeos.

Finalmente, Haslebacher et al. (2022) presentan distintas variables astroclimáticas sobre 8 observatorios importantes a nivel mundial. Estos autores encuentran, en base a modelos atmosféricos, datos climáticos "in situ" y proyecciones climáticas hasta el 2050. Según sus cálculos, se prevé un leve aumento del PWV promedio en estos observatorios. Con todo, admiten un notable margen de error en las extrapolaciones de los modelos utilizados, siendo siempre más fiable las series directas de los propios observatorios, pese a que estas series suelen ser cortas en la mayoría de los casos.

5. ESTUDIO DE CASOS (PWV)

5.1 NUESTROS RESULTADOS

Nuestro trabajo es de extensión universal, en primera aproximación. Por ello iniciamos, este apartado de resultados, con los mapas correspondientes a los promedios absolutos de PWV, y a los diferenciales entre 1950 y 2020, según la base de datos de reanálisis ERA 5, del ECMWF.

El grueso de los observatorios tiende a concentrarse desde las latitudes tropicales a las templadas, y también en las cercanías de ambos polos. Las cantidades de vapor de agua cerca del ecuador, y el mal tiempo en latitudes entre los 45° y 70°, en ambos hemisferios, determinan un vacío considerable de observatorios astronómicos. Existen 4 polos de bajo contenido de PWV en el contexto planetario. Aparte de los lugares cercanos al Polo Norte y Polo Sur, tenemos un extenso polo en la zona de la alta meseta del Tíbet y un polo, más pequeño, que situamos en la cadena de los volcanes entre Chile y Argentina.

De acuerdo con la figura 46, donde se muestra el PWV a escala planetaria y se señalan los lugares con observatorios importantes y algunos sitios propuestos en este trabajo, es apreciable como las regiones ecuatoriales y tropicales suelen exceder los 30 mm. Existen excepciones, como el SW de EE. UU., el Sáhara y el Mediterráneo, prolongándose hasta la meseta del Tíbet, en el hemisferio norte, y, también, en las regiones del norte de Chile Argentina y Sudáfrica. Todas ellas muestran valores de 2 a 15 mm. En las regiones polares los contenidos de vapor de agua se muestran casi indetectables, al ser francamente inferiores al 1mm: constituyen, pues, casos aparte por su situación geográfica.





Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

Las regiones ecuatoriales y tropicales (Figura 47), especialmente en el hemisferio sur, han experimentado notables incrementos de PWV. Por el contrario,

algunas regiones muy específicas, como el norte de Argentina y una amplia región en el cuerno de África, han experimentado una fuerte bajada. La región de la península lbérica y mediterránea no ha experimentado grandes cambios en 70 años. Las regiones polares tampoco presentan evoluciones apreciables, aunque su determinación está sujeta a errores por ausencia de medidas directas, toda vez que los mapas aquí presentados son resultado de un modelo de reanálisis de datos de superficie y radiosondeo, llevados a cabo por ERA5 (ECMWF).

Figura 47. PWV ERA5 presentado los valores diferenciales de la década 2010-2019 frente a la década de 1950-1959. Se observan varias regiones con anomalías importantes. Los grandes observatorios están señalados con círculos rojos y los propuestos en este trabajo con círculos en blanco





Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

5.2 LA DEPENDENCIA DEL PWV CON LA LATITUD DEL OBSERVATORIO

Los datos son de MODIS/TERRA reducidos para el año 2020 sobre diferentes observatorios astronómicos se muestran en la figura 48. Se ha hecho hincapié en aquellos centrados en el infrarrojo lejano y radio submilimétrico. Se han incorporado lugares de alto potencial citados en este mismo capítulo, y que son propuestas a futuro. Se comprueba como en latitudes bajas, típicamente inferiores a 40°, el incremento del contenido de agua precipitable crece de manera vertiginosa, aún en lugares de gran altitud. Esto califica a las áreas polares como los de mayor potencial en infrarrojo y submilimétrico.



Figura 48. La dependencia de la cantidad de vapor de agua PWV con la latitud geográfica

Fuente: NASA Earth Observations (NEO) (NASA). Elaboración propia.

5.3 LOS LUGARES PARA OBSERVAION SUMILIMETRICA

En la tabla 5 aparecen observatorios con valores de PWV verdaderamente bajos, aptos para la observación a partir de la banda submilimétrica. Aquí las cantidades de PWV han sido estimadas con MODIS/TERRA, y donde aparecen también datos obtenidos de la revisión bibliográfica. Con asterisco (*) se muestran las cantidades estimadas por nosotros, en un escenario muy favorable, y con corrección de altura (ver figuras 53, 65, 69 y 70).

LUGAR	LATITUD	PWV	ALTITUD
		mm	
DOME A	76 S	0.11	4080
DOME C	77 S	0.14	3250
GROENLANDIA	76 N	0.625	3200
TAKAE	76 S	0.53	3450
MUZTAG ATA	38 N	1.85	7500
(TÍBET)		(0.7)*	
ALI (TÍBET)	32 N	1.89	5000

Tabla 5. Lugares de observatorios construidos o propuestos

	22 S	45	5080
, ,_,,,,	22.0	1.0	0000
(CHAJNANTOR)		(1.25)*	
CHAJNANTOR	22 S	4.1 (1.1)*	5600
TRES CRUCES	27 S	1.8 (0.4)*	6750
LAG. REJAS	28 S	1.2 (0.5)*	6500
POLO SUR	90 S	0.32	2880

Fuente: NASA Earth Observations (NEO) (NASA). Elaboración propia.

Para su elaboración se han tenido en cuenta sus características, de elevada altitud y bajísimo contenido de vapor de agua (PWV), considerando promedios anuales. Debemos señalar que las cantidades encontradas para Alma y Chajnantor estarían sobreestimadas, de acuerdo con los radiosondeos y las medidas de PWV dadas por estaciones AERONET para latitudes y altitudes similares; así como la señalada por la escala de altura deducida para la región *(valor probable corregido de altura).

De acuerdo con la tabla 5, destacan, aparte de los sitios polares, los lugares chinos del Tíbet, de Muztag Ata y Ali, así como las altas cumbres de los volcanes andinos, apropiados por su morfología para futuros observatorios infrarrojos extremos. Este hecho resulta explicable por la exagerada altitud de dichos edificios volcánicos, cercanos a los 7,000 m. No existen medidas directas de PWV de Tres Cruces, ni de Laguna Rejas, pero la extrapolación por la curva de escala de altura (Figura 65), señala valores semejantes, que son enteramente polares, al menos durante una buena parte del año.

5.4 EL CASO DE SIERRA NEVADA (ESPAÑA)

Nosotros efectuamos mediciones radiométricas del contenido de vapor de agua precipitable (PWV) sobre el Pico Veleta, a 3400 m de altitud, en Sierra Nevada, España. El estudio incluye mediciones realizadas en 180 días y 118 noches, durante los años 1984 a 1987. Se obtuvieron valores medios anuales de PWV diurnos y nocturnos de 3.7 mm y 2.1 mm, respectivamente; el PWV medio anual fue de 2.9 mm. Estos resultados son similares a los reportados para Mauna Kea, y califican al pico Veleta como un buen lugar potencial para observaciones astronómicas infrarrojas y submilimétricas (Quesada, 1989).

Un estudio posterior del PMV, efectuado en Sierra Nevada, a lo largo del año 2006 (Perez et al. 2011; Gardini et al. 2012), usando métodos fotométricos y

espectroscópicos, devolvieron valores similares a los nuestros. Con ello queda demostrado la consistencia de nuestros resultados, obtenidos con mediciones "in situ" y aplicando técnicas diferentes. Los instrumentos fueron calibrados a partir de datos de radiosondeos efectuados en Tenerife (Islas Canarias) por el antiguo Instituto Nacional de Meteorología español.

Dentro de la parte sur de Europa continental, este es el lugar más prominente y con más bajo contenido de PWV disponible, con un clima seco y accesos relativamente fáciles, incluso en invierno.

La caracterización espectroscópica del sitio mostró que el valor medio era de solo 2.3 mm. (PWV). Datos que reflejan que las condiciones para la observación en el lejano infrarrojo y en radio submilimétrico son comparables a lugares tan emblemáticos como el observatorio de Mauna Kea (Hawái). Considérese que, para Mauna Kea, Merrill & Forbes (1987) estimaron promedios anuales del PWV del orden de 2.1 mm.

Cantidades de PWV inferiores a 1 mm. fueron medidos durante dos semanas en el entorno del pico Veleta (Sierra Nevada, España) en el invierno de 1985. Obsérvesen las figuras 48 y 49. Estos resultados corroboran las excepcionales condiciones para astronomía infrarroja que puede darse en Sierra Nevada a lo largo del invierno. Semejante situación se observó en inviernos sucesivos, en lo que parece ser una tónica habitual invernal, con contenidos extremadamente bajos de PWV.



Figura 48. Medidas de PWV sobre Sierra Nevada en enero de 1985

El PWV es muy dependiente de la hora del día y de la noche, mostrando, en general, cantidades más bajas durante la noche, como aparece en la figura 49. Durante los meses de verano este efecto es aún más acusado

Figura 49. Dependencia horaria del PWV sobre el pico Veleta durante los meses de enero-febrero, años 1984 y 1987.



Fuente: Quesada (1989).

La cantidad de agua precipitable, PWV, es también enteramente dependiente de la altitud desde la cual se hace la estimación o la medición radiométrica. En la figura 50 se ofrece también una estimación de la escala de altura de la variación del PWV.





Fuente: Quesada (1989).

De acuerdo con la tabla 6, donde se reflejan las diferencias entre las medidas diurnas y nocturnas, los valores nocturnos fueron significativamente más bajos. Incluso en verano raramente excedieron los 3 mm. Enero presentó alrededor de 0.7 mm. de

PWV durante las noches claras; lo cual es un valor que rivaliza con los mejores del mundo, si exceptuamos los lugares polares.

Month I	Days	Nights	PWV (mm)		Average
	(1984	-1987)	(6-18 UT)	(18-6 UT)	
January	14	9	1.6±0.6	0.7±0.3	1.2
February	6	3	2.3±1.1	0.9±0.8	1.6
March	17	6	3.1±0.8	2.1±0.9	2.6
April	12	9	3.0±0.8	2.2±0.7	2.6
May	7	5	4.1±1.6	2.7±0.9	3.4
June	15	13	4.2±1.1	3.3±1.1	3.1
July	27	14	6.4±1.5	2.1±0.9	4.3
August	34	23	5.6.±1.9	2.4±1.0	4.0
September	9	9.	5.2±0.8	3.0±1.4	4.1
October	15	8	3.8±1.0	1.9±0.7	2.9
November	13	8	2.9+0.9	1.8±0.8	2.4
December	11	11	2.1 <u>+</u> 0.6	1.6±0.6	1.9
Total	avera	ges	3.7±0.4	2.1±0.2	2.9

Tabla 6. Estadística de los valores de PWV hallados para el pico Veleta en la
campaña 1984-1987

Fuente: Quesada (1989).

5.5 COMPARATIVA DEL PWV ENTRE SIERRA NEVADA Y CALAR ALTO

En la Figura 51 aparece una comparativa de valores de PWV para dos observatorios del SE de la península Ibérica (Sierra Nevada, Granada, y Calar Alto, Almería). Los datos que aparecen son los siguientes: en rojo, valores medianos mensuales del PWV según nuestras medidas radiométricas para el observatorio de Calar Alto (1984-1987); en azul, los datos obtenidos para la base de datos Uncertainties in Ensembles of Regional ReAnalyses (UERRA), durante el año 2000, para una altitud de unos 2000 metros, según los valores de reanálisis para píxel orográfico medio; y, en verde, los datos radiométricos para el pico Veleta (Sierra Nevada), durante los años 1984-1987.



Figura 51. PWV sobre los observatorios de Sierra Nevada y Calar Alto

Fuente: Greve (1978); Quesada (1989) y datos de UERRA HARMONIE/V1 (ECMWF).

Los datos deducidos de UERRA están expresados en mm. de vapor de agua. Para una altitud equivalente al pico Veleta (3400 m.), habríamos de considerar que estos valores de UERRA serían aproximadamente la mitad. Esta conclusión es nuestra y obedece a los datos obtenidos por nosotros, según lo mostrado en la figura 49. De acuerdo con estos supuestos, sobre Sierra Nevada tendríamos al menos 6 meses al año con valores de PWM inferiores a 2 mm. Por tanto, estos son valores excelentes de cara a las observaciones de infrarrojo y de submilimétrico. Compárese con la tabla 5 los valores para el pico Veleta, mostrados más arriba, con los obtenidos a través de medidas radiométricas directas entre 1984 y 1987.

La consistencia de nuestros datos en Calar Alto y Sierra Nevada reproducen en buena parte lo deducido a partir de la base reanálisis de UERRA, para una altitud de unos 2000 metros, y para un pixel orográfico medio (aproximadamente la de Calar Alto), que tiene 2167 m de altitud. De manera comparativa, el valor mediano anual de PWV de Sierra Nevada es del orden del 40% al de Calar Alto.

5.6 EL PWV PROMEDIO SOBRE EL SE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA: PROMEDIOS DE ENERO Y JULIO (1960-2019)

En la figura 52 aparecen los datos para el sector SE de la península Ibérica, con tratamiento del PWV idealizado, usando el percentil 50 de los días con menor PWV, durante los meses de enero y julio, promediados a lo largo de 60 años (19602019). Este resultado se ajustaría a lo mostrado también en las figuras 50 y 59 y la tabla 5. Se indican las posiciones de los observatorios astronómicos en la región, y su adecuada situación, para encontrar los valores más bajos posibles de PWV, en todo el ámbito mostrado.



Figura 52. Isolíneas de cantidades promedio de PWV. mm. SE de España

Fuente: Quesada (1989) y datos de UERRA HARMONIE/V1 (ECMWF).

5.7 COMPARATIVA DE PWV EN MM. ENTRE PICO VELETA (SIERRA NEVADA, ESPAÑA) Y LOS MEJORES LUGARES POSIBLES DEL NORTE DE CHILE Y ARGENTINA

En la figura 53 ofrecemos una comparativa para el PWV obtenido por nosotros para el pico Veleta, en Sierra Nevada, España, respecto a 4 de los mejores lugares posibles en la cordillera de los Andes. Los datos se ofrecen para las noches despejadas del periodo 1984-1987. Los lugares de menor agua precipitable a nivel mundial (excepto los de la meseta Antártica) son los que se muestran en el citado gráfico como: 1) Chajnantor (en rojo), sede del mayor complejo infrarrojo y submilimétrico de todo el mundo; 2) el cerro Chajnantor (en naranja), sitio de pruebas del observatorio más alto del mundo, a 5640 m; y 3), un lugar hipotético, propuesto en este trabajo, en el sector argentino de los altos volcanes, Laguna Rejas, a 6.500 m. de altura (en azul). En este último no existe infraestructura ni proyecto alguno de tipo astronómico. Probablemente sea el mejor lugar infrarrojo del planeta en la zona

templada, y accesible logísticamente. En esta misma zona de la Rioja argentina se hallan Cerro Pissis, a 6800 m de altitud, y Bonete Chico, a 6650 m de altitud, los cuales podrían presentar algún problema de acceso, pero con cantidades de PWV similares a Laguna Rejas.



Figura 53. PWV (en mm) en Sierra Nevada y 3 de los mejores emplazamientos posibles fuera de la meseta antártica

Fuente: Quesada (1989) y Worldview Earth Data (NASA). Elaboración propia.

Los datos para el pico Veleta están extraídos de nuestro trabajo (Quesada, 1989), y son de tipo radiométrico y registrados "in situ". Por ello su fiabilidad debe considerarse alta, con error del orden del 10 al 20%.

Para los lugares de los altos volcanes en Chile y Argentina hemos deducido las cantidades de PWV columnar a partir de los datos e imágenes de TERRA/MODIS, AQUA/MODIS (Nocturnos) y SUOMI (temperatura de brillo nocturna). El año analizado ha sido 2022.

El número de noches promedio anual observables es muy alto en esta región, situándose entre un mínimo de 275 y un máximo de 300.

El hecho de que el pico Veleta pueda acercarse tanto a los mejores sitios del mundo, es lo que nos permite recomendar Sierra Nevada como lugar preferente de observación infrarroja y submilimétrica dentro del continente europeo. Frente a los lugares chileno-argentinos solo podemos aportar 215 noches anuales, lo cual es, no obstante, razonablemente competitivo.

5.8 ESTIMACIONES PROMEDIO ANUALES DEL PWV ENTRE DIVERSOS LUGARES DEL SE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

Los datos de la figura 54 se han extraído de MODIS TERRA/AQUA para 2021. Los valores son diurnos, por lo que los valores nocturnos deben ser notablemente inferiores.



Figura 54. PWV sobre lugares seleccionados con potencial astronómico del SE de la península Ibérica

Fuente: MODIS TERRA/AQUA (NASA). Elaboración propia.

5.9. PWV TÍPICO DE LA ZONA DE SIERRA NEVADA Y FILABRES (SE DE LA PENINSULA IBÉRICA)

En la figura 55 aparece el promedio del PWV sobre los sistemas montañosos más elevados del SE de la península Ibérica. El PMV viene expresado en cm. de espesor de agua precipitable. Es notable la diferencia entre las cantidades registradas en Sierra Nevada, con solo 0.3 cm. de PWV, frente a los demás sistemas de montaña,

donde las cantidades se sitúan en torno a 0.6 - 0.7 cm. El día mostrado corresponde al 28 septiembre de 2022, y está extraído de la capa de Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC), concretamente de su producto Columnar Water Vapor.



Figura 55. Detalle de las condiciones de concentración de PWV en cm. sobre el macizo de Sierra Nevada

Fuente: Worldview Earth Data (NASA). Elaboración propia.

En la figura 55 se combinan datos de Terra y Aqua MODIS. La resolución del sensor es de 1 Km., y la resolución temporal es de 1 día. El error sobre tierra se estima sea menor del 10-15%.

Los valores de PWV derivados de la base UERRA y nuestros datos radiométricos para Sierra Nevada están casi totalmente de acuerdo. Sólo difieren unas décimas para los valores del pico Veleta. De la figura 55 se infiere que solo los lugares por encima de los 3000 metros de altitud son adecuados para observación infrarroja, restringiendo el área a las máximas cumbres de Sierra Nevada, con valores permanentemente bajos, incluso en verano.

El método de análisis en este caso ha sido la selección de los días con nula cobertura nubosa en todos los observatorios. Se han analizado el 33% de los días del año. La resolución de las imágenes es de 1 Km por píxel. A los puntos fijos de interés de los observatorios se les ha extraído el valor numérico del PWV, con posterior tratamiento estadístico.

5.10 LA ALTITUD DEL OBSERVATORIO DETERMINA SU CONTENIDO DE PWV

En la figura 56 aparece la relación entre el PWV y la altitud, para los observatorios de la península Ibérica en su sector SE. Los datos recogen el ejemplo del año 2021. Los ajustes son aplicables a los datos diurnos, y los resultados se ofrecen considerando un rango de altitud de 2700 m. El ajuste es bastante representativo (R²=0.9637), y muestra la dependencia del PWV respecto de la altitud. Se estima que las cantidades nocturnas sean netamente inferiores, por ausencia de convección térmica, la cual tiende a elevar las masas húmedas de capas inferiores hasta los límites de la inversión térmica planetaria.



Figura 56. PWV frente a altitud en observatorios en la península Ibérica

Fuente: MODIS TERRA/AQUA (NASA).

Los valores anuales promedio de PWV para la base ERA5, corregidos con los datos de AERONET, se muestran en la figura 57. Estos valores son aplicables a una altura equivalente a la de los observatorios óptico y de radio de Sierra Nevada (2900 m.). Para la serie temporal analizada, últimos 70 años, se observa una tendencia creciente del contenido del PWV de unos 0.3 mm. Ello puede relacionarse con el calentamiento global planetario.



Figura 57. Datos de PWV (mm.) de ERA5 y AERONET para Sierra Nevada (OSN-

Fuente: ERA5 (ECMWF) y AERONET (NASA). Elaboración propia.

5.11 EL PWV EN SUPERFICIE DE LA REGIÓN DE LA PENÍNSULA IBÉRICA, LOS ALPES, NORTE DE ÁFRICA Y CANARIAS

Esta región mostrada en la figura 58 es notable, desde el punto de vista astronómico, pues existen un buen número de observatorios astronómicos y radioastronómicos. Las condiciones de nubosidad, PWV y facilidades logísticas son las principales variables que justifican dicha catalogación. El hecho de disponer de cadenas orográficas alpinas, que ofrecen multitud de picos de montaña de entre 2000-4000 m. de altitud, ha propiciado el establecimiento de varios observatorios; además de la promoción de diversos proyectos de localización no ejecutados. Podemos diferenciar varios núcleos de interés dentro de la región: 1) los más cercanos al trópico y las Islas Canarias y el Atlas marroquí; 2) los sistemas montañosos de la mitad sur de la península Ibérica, y la bética interna y externa y el sistema Ibérico; 3) el norte de España y sur de España, con los Pirineos; y 4), las elevaciones de los Alpes.



Figura 58. PWV (mm.) sobre la región de la península Ibérica, Canarias, norte de África y la región de los Alpes

Fuente: UERRA (ECMWF). Elaboración propia.

Las isolíneas dibujan cantidades medias del PWV, deducidas por medio de los datos de la base de UERRA. El píxel tiene un 0. 1º de lado, y están referidos a una escala de altura, que se corresponde con la orografía media de cada uno de ellos. Por ello los valores reales son solo fiables a nivel del mar. Los lugares a gran altitud y escasa superficie, como Sierra Nevada, necesitan de ulteriores correcciones, por escala de altura, para deducir el verdadero valor de PWV. No obstante, la figura 58 da una idea aproximada de los lugares de la región con condiciones favorables para la observación astronómica en infrarrojo (en la figura 58 aparecen en tonos azules). Estos lugares van desde Tenerife, pasando por el Atlas, Sierra Nevada, Pirineos y Alpes.

La composición de la figura 59 se refiere al mes de enero. Se muestra un incremento entre 1 y 2 mm. en latitudes europeas, por encima de la latitud de 42° N., incluyendo los Pirineos, los Alpes, los Cárpatos y llanuras del este de Europa. Por el contrario, la península Ibérica, Canarias y el norte de África parecen haber experimentado una ligera disminución del agua precipitable (alrededor de 0.5 a 2 mm.). Por consiguiente, esto mantiene las condiciones excelentes de la península Ibérica y, particularmente, en su sector sur. Este sector aparece como lugar idóneo para la observación astronómica en el infrarrojo, con una tendencia al decrecimiento del agua precipitable en invierno.



Figura 59. PWV diferencial de enero (mm.) entre la década de 1960 del siglo XX y la década de 2010-2019

Fuente: UERRA (ECMWF). Elaboración propia.

La composición de la figura 60 se refiere al mes de Julio. Sobre gran parte de la península Ibérica apenas ha habido variaciones significativas, siendo el incremento máximo de 1 mm. en el SE y la zona N. Por el contrario, grandes áreas de la costa norte africana, Italia, valle del Po y zonas poco elevadas de Francia y Europa del este han experimentado un notable aumento de agua precipitable, en el entorno de 1 a 4 mm. Esto podría interpretarse como consecuencia de la subida de las temperaturas medias, que provoca una mayor capacidad de retención del vapor de agua en estas regiones, máxime bajo la capa de inversión planetaria, que tiende a concentrar la mayor cantidad del vapor de agua.



Figura 60. PWV diferencial de julio (mm.) entre la década de 1960 del siglo XX y la década de 2010-2019

Fuente: UERRA (ECMWF). Elaboración propia.

La relación entre la concentración del vapor y la altitud muestra una función de carácter logarítmico como mejor ajuste (Figura 61). En la figura 61 se ha partido de datos suministrados por la base ERA 5, y corresponde con la sección atmosférica presente en la costa atlántica del Atlas marroquí.

Figura 61. Ajuste logarítmico para la escala de altura del PWV. Costa atlántica de Marruecos



Fuente: ERA 5 (ECMWF). Elaboración propia.

En la figura 62 aparece la relación entre los datos del ERA 5 y AERONET, para la zona de Canarias y el Atlas marroquí. La utilidad del ajuste mostrado se relaciona con el ajuste de los valores proporcionados por ERA 5 considerando los más precisos de la red de AERONET.



Figura 62. Ajuste lineal entre los datos de ERA 5 y los referidos a los de estaciones fijas de AERONET

Fuente: ERA 5 (ECMWF) y AERONET (NASA). Elaboración propia.

Los datos de la figura 63 han sido modificados de acuerdo con la escala de altura para la región, para mostrar el valor aproximado de PWV a la altura de cada observatorio. Se estudian los casos de Izaña en (Canarias); Oukaimeden (Marruecos); OSN-IRAM (Sierra Nevada) y Javalambre (península Ibérica). Izaña presenta la menor discrepancia invierno-verano, dada su situación oceánica, en posición favorable para observaciones infrarrojas todo el año. El caso de Oukaimeden, en el Atlas marroquí, presenta una fuerte estacionalidad, debido a factores continentales. OSN-IRAM presenta los valores más bajos de la serie de los lugares aquí considerados. Por tanto, se muestra como el candidato propicio para nuevas instalaciones infrarrojas o submilimétricas. El nuevo observatorio de Javalambre en Aragón muestra una aptitud notable en invierno; en cambio en verano aparece el influjo mediterrráneo y los procesos convectivos del área, que provocan un fuerte aumento de su PWV.



Figura 63. PWV (TIMELINE) 1961-2019: (a) Izaña; (b) Oukaimeden; (c) OSN IRAM; y (d) Javalambre



Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

5.12 LA REGIÓN ASTRONÓMICA DEL NORTE DE CHILE-ARGENTINA Y EL PWV.

Los valores de la figura 64 están referidos a una altitud media orográfica del pixel sobre cada punto. Por tanto, la altitud es ligeramente inferior a la de los picos volcánicos más elevados. Por ello el PWV está expresado con cantidades superiores a las reales. El píxel tiene 0.25º de lado. Es destacable la detención de cantidades medias de PWV inferiores a 2 mm, en la parte central de la cordillera, entre el paralelo 20ºS. y 30º S. De hecho, y una vez aplicadas las correcciones de altura, serían posibles valores inferiores a 0.7 mm. en el Monte Pissis, el Bonete y Tres cruces. Todos ellos con alturas próximas a los 6800 m. Estos valores medios son inferiores a los de los mejores observatorios actuales de la región, como son Paranal, Armazones, Llano Chajnantor y Cerro Chajnantor. Para obtener un mayor detalle sobre el potencial astroclimático de estos lugares se recomienda consultar el capítulo de "Propuestas a futuro" de esta misma tesis.
Figura 64. PWV (1950-2020) sobre la región de interés astronómico de la cordillera de los volcanes entre Chile y Argentina



Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

Mediante el ajuste de la figura 65 es posible inferir cantidades del orden de 0.35 mm. de PWV, en mediana anual, en la cordillera de los volcanes.



Figura 65. Extrapolación del PWV en la cordillera de los volcanes hasta cerca de 7000 m. de altura

Fuente: Otarola et al. (2019). Elaboración propia.

Estos valores se han deducido de los datos de Otarola et al. (2019) para estaciones por encima de los 3000 m. de altitud. Estos datos podemos considerarlos bastante fidedignos, dado que proceden de largas campañas de medición y

evaluación. En principio, muestran una gran superioridad sobre el resto del mundo. Sin embargo, no logran desbancar a los sitios antárticos de Dome A y Dome C., donde no se prevé que ningún lugar de la zona templada pueda superarlos, ni siquiera estacionalmente, en cuanto a contenido de PWV atmosférico.

En la figura 66 se muestra la cordillera de Laguna Rejas. Con casi 6500 m de altitud, podemos indicar que, posiblemente, presente el PWV más bajo a lo largo del año de entre todos los lugares de la alta cordillera de los Volcanes. De acuerdo con MODIS/TERRA la media PWV no superaría 1.1 mm; durante bastantes meses este valor se situaría en torno a 0.5 mm.



Figura 66. Imagen de Laguna Rejas, en La Rioja argentina

Fuente: Google Earth.

Desde las extrapolaciones de la escala de altura, para esta región de los altos volcanes de los Andes, y de acuerdo con las imágenes generadas desde ERA5, se puede inferir que, la media anual real estaría en torno a 0.7 mm., en las mayores elevaciones, considerando datos promedio de todos los días. Estas condiciones solo se hallan en el Ártico extremo y en el continente Antártico. Además, por su topografía, clima y accesos, es posible acceder a lugares cercanos a la cima. Este lugar es similar, por sus características, a Tres Cruces, en el borde chileno argentino, del que damos más detalles en el capítulo "Propuestas a Futuro". Este núcleo de grandes picos se sitúa a unos 500 km. al sur del Llano Chajnantor. Estos lugares parecen reunir condiciones óptimas para infrarrojo lejano y radio submilimétrico. Probablemente sea

la región astronómica del futuro más prometedora y viable, logísticamente hablando, de todo el mundo.

5.13. LA REGIÓN DEL TÍBET

Los valores de PWV mostrados en la figura 67 están referidos a una altura media del píxel, de 0.25º de lado. Aparecen cantidades medias muy inferiores a 2 mm. en las zonas altas de la Meseta del Tíbet, a más de 5000 m. de altitud.





Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

En este sentido, esta región puede ser equiparable a la de los altos volcanes, en la zona del norte de Chile y Argentina. Aun así, aquí la estacionalidad es mayor y, por tanto, las variaciones anuales son más pronunciadas. Además, existe una influencia del potente monzón asiático, de mayo a septiembre. No se conoce bien cual pueda ser el valor promedio invernal en los lugares más elevados, de los que existen buenos candidatos, como el Muztag Ata, de 7500 m., en China, de accesos relativamente fáciles para su elevada altitud. Aplicando las correspondientes correcciones de altitud, las cantidades medias del PMV. podrían estar en torno a 0.7 mm. En invierno, y en esta zona, el tiempo es estable, debido al potente anticiclón siberiano. En esta región, tanto en la India (observatorio Hanle) como en China (Ali), están llevando la observación astronómica a niveles solo alcanzables desde el Norte de Chile y los lugares antárticos.

5.14. LAS REGIONES POLARES Y EL PWV

Las bases antárticas del Polo Sur, Dome A y Dome C (Figura 68) son el mejor exponente de lugares prácticamente ideales para la observación astronómica infrarroja y submilimétrica. Las cantidades reales de PWV son del orden de 0.1 a 0.3 mm.; es decir, valores de PWV marcadamente inferiores a los observados en los mejores sitios de las latitudes templadas, pues aquí habitualmente se sitúan entre 1 y 3 mm. El carácter latitudinal de la distribución del PWV es manifiesto en la figura 68, pues se puede observar un fuerte incremento del PWV conforme avanzamos hacia el ecuador.

Figura 68. La región Antártica donde se sitúan las principales bases científicas con instalaciones astronómicas



Fuente: ERA5 (ECMWF). Elaboración propia.

La realidad es que es muy difícil operar con instrumentación compleja en un entorno tan hostil como este, donde aparecen enormes complicaciones logísticas, en los que las averías graves pueden tardar un mínimo de seis meses en solucionarse, hasta la llegada de técnicos humanos. Por ello, a pesar de llevar en funcionamiento varias décadas apenas se han podido establecer telescopios y radiotelescopios del tamaño de los pequeños observatorios de zonas templadas.

5.14.1 Dependencia del PWV con la altitud en las regiones polares

La mayoría de los lugares, por encima de los 1,500 metros de altitud, mostrados en la figura 69, pueden considerarse verdaderamente de clase submilimétrica. De hecho, las cantidades medias anuales de PVW están por debajo de 1 mm. Esto incluye todas las estaciones en el interior del continente, de las que, desafortunadamente, no disponemos de datos de superficie, en algunos casos. Téngase presente que los valores se han deducido a partir de los anotados en la Red AERONET, durante el periodo 2002-2021, para el caso de un número de estaciones fijas, muy próximas a ambos polos.



Figura 69. Mejor ajuste de tipo logarítmica para el PWV frente a la altitud en regiones polares

Fuente: ERA5 (ECMWF) y AERONET (NASA). Elaboración propia.

5.15 EL CASO DE MAUNA KEA Y MAUNA LOA (HAWAI) PARA EL PWV

En la figura 70 aparece el mejor ajuste encontrado para los datos de las estaciones de la Red AERONET en el archipiélago de Hawái. Los valores de la estación de Mauna Kea son extrapolados para el resto de las estaciones que disponen de datos reales de tipo radiométrico.



Figura 70. PWV en las islas Hawa1 y su variación altitudinal

Fuente: AERONET (NASA). Elaboración propia.

Al disponer en Mauna Loa (en negro) de una serie de 27 años de datos radiométricos para PWV, gracias a la base de datos de AERONET, ha sido posible inferir, por escala de altura, el PWV en la vecina cima de Mauna Kea (en rojo) (Figura 71).

Figura 71. La evolución temporal del PWV (mm.), en promedio anual, sobre las cumbres de Mauna Loa (3402 m) y Mauna Kea (4205 m)



Fuente: AERONET (NASA). Elaboración propia.

Se ha aplicado un factor multiplicador de 0.6 a los datos de Mauna Loa (sobre la base de la expresión en la figura 70). Así se han obtenido los valores, en promedio, de la línea temporal en Mauna Kea (Figura 71).

6 DISCUSIÓN

En nuestro estudio hemos recurrido a las bases de datos (ERA5, UERRA, MERRA2 y MODIS). Muchos de los datos los hemos calibrado con ajustes de tipo logarítmico o lineal, considerando como fuente primaria los datos de la red AERONET. También se han determinado "escalas de altura" (véase Apéndice), a partir de los datos de las citadas fuentes, frente a su altura de píxel orográfico (el suministrado por los satélites), encontrando algunos ajustes fiables hasta las altitudes reales, donde suelen hallarse los observatorios astronómicos.

Siguiendo los hallazgos de Schoeberl et al. (2019), y considerando nuestros resultados, parece concluirse que las latitudes tropicales y zonas adyacentes presentarían algunas limitaciones para las observaciones de radio submilimétrico e infrarrojo lejano; tanto en actuales como en futuros emplazamientos astronómicos. Ello explicaría, en parte, como al norte del desierto de Atacama las condiciones de observación del infrarrojo y radio submilimétrico se degradan con rapidez al avanzar hacia el ecuador. De hecho, según nuestro estudio, para la región Andina, las menores concentraciones totales de PWV se hallan entre los 22º y 28º de latitud Sur. Aquí hemos detectado los mejores lugares de la Tierra para la observación astronómica (de acuerdo con su PMV). Claro, a excepción de los observatorios polares.

De acuerdo con Townes & Melnick (1990), Lawrence (2004) y Walden et al. (2005), los mejores lugares para astronomía infrarroja y submilimétrica son aquellos situados en la alta meseta Antártica, a unos 4000 metros de altitud, donde la alta trasparencia atmosférica, y muy baja temperatura (~-70° C), garantizan el máximo de trasmisión y el mínimo ruido atmosférico.

La determinación del PWV sobre regiones polares, y otras áreas remotas, es particularmente difícil, dada la escasez de observaciones realistas en superficie, las bajas concentraciones intrínsecas de vapor de agua y otros efectos derivados de las dificultades del uso de instrumental en estas regiones. Esto provoca que los modelos de estimación aplicados a los datos de satélite puedan presentar un error del 30% o más, tal y como Chen y Liu (2016) destacan en su trabajo.

Las regiones polares del norte, a pesar de sus bajos contenidos de PWV, no ofrecen tantas ventajas climatológicas como para poder compararse con la meseta Antártica.

En nuestra apreciación, Isla de la Palma, así como Izaña, en Tenerife, pueden ser unos lugares excelentes, con PWV relativamente bajo (PWV de 3-6 mm.). Aquí ya

existen observatorios de primer nivel en el óptico y el infrarrojo próximo. Sin embargo, sus valores de PWV no son en modo alguno comparables a los hallados para el caso de Chajnantor, en los Andes, y las bases de gran altitud en el continente Antártico. Aquí las cantidades de PWV suelen ser muy inferiores a 1 mm. Ello permite intuir que los futuros desarrollos de astronomía en el lejano infrarrojo, radio milimétrico y submilimétrico buscarán los sitios más propicios para ello, que, ciertamente, son pocos. Nuestros resultados también avalan esta hipótesis. Así, en nuestro entorno de península Ibérica y zonas adyacentes, solo Sierra Nevada presenta características notables en cuanto a PWV (Quesada, 1989). Las elevaciones mayores de los Pirineos y Alpes también comparten un bajo contenido de vapor de agua, pero sus condiciones climáticas generales y su logística aparecen menos favorables que en Sierra Nevada. En el caso del alto Atlas marroquí es posible encontrar lugares comparables a Sierra Nevada, pero la logística y la frecuencia de invasiones de polvo sahariano representan condiciones de observación, en general, y en infrarrojo, en particular, algo menos favorables.

En la casuística de observatorios analizados en la península Ibérica, Atlas marroquí, Canarias, cordilleras de los Pirineos y los Alpes, hemos estimado, que es necesario estar situado al menos a 3000 m. de altitud para disponer de condiciones de PWV comparables a los excelentes lugares que sabemos existen en América del sur, América del norte y el Tíbet. Esto limita, sobremanera, el número de lugares verdaderamente competitivos en la región. Todo ello ha sido expuesto por Quesada (1989), Greve (1988), Bensammar (1979) o Barreto et al. (2013).

En la región de la cordillera de los volcanes en el norte de Chile y Argentina, Bustos et al. (2014) y Cortes et al. (2016) nos muestran otra región con extraordinarias características para la observación en infrarrojo lejano y submilimétrico. Por encima de los 5500 metros de altitud las cantidades de PWV presentan una alta frecuencia con valores inferiores a 1mm. De hecho, no hay actualmente ninguna región a nivel mundial que presente más y mejores instalaciones astronómicas. Para la astronomía submilimétrica, la cadena de los volcanes tal vez sea solo un escalón inferior al Antártico. No obstante, su logística podría ser más favorable. De hecho, a semejantes altitudes y latitudes es lo más "recomendable", aunque sea la segunda región mundial de máximo interés por su contenido de PWV.

Tal como desarrollamos en nuestro estudio de casos en este capítulo, es probable que en la cadena de los altos volcanes de la cordillera andina, entre los 6000 y 7000 m de altitud, se puedan obtener cantidades anuales del orden de 0.3-0.7 mm.

PWV, considerando el 50% percentil. Estos valores únicamente son solo un poco más elevados que en Dome C. Por tanto, constituyen lugares difícilmente superables por ningún otro sitio en astronomía submilimétrica e infrarroja lejana.

El Tíbet chino, a una altitud de más de 5000 m. de altitud, ha sido estudiado en las dos últimas décadas por investigadores chinos, como Quian et al. (2018) o Ye et al., (2016). Estos autores han hallado un valor promedio del PWV de unos 2 mm. Ello cualifica a esta región como de muy alto interés en astronomía infrarroja, rivalizando con las instalaciones del norte de Chile.

En el NE de la meseta del Tíbet se haya la meseta del Pamir, perteneciente a varios países, Rusia y China. Con elevaciones comprendidas entre 5000 y 6000 metros, constituye un sistema montañoso de difícil acceso, pero que sin duda debe tener lugares soberbios, con muy bajo contenido promedio de PWV. No hemos encontrado estudios específicos de esta región, ni disponemos más que un par de estaciones de la red de AERONET. Por tanto, en una primera aproximación, las condiciones, según el PWV, deben ser iguales o mejores que en la propia meseta del Tíbet. Con todo, aquí parece que la nubosidad y otras variables importantes, en observación astronómica, ofrecerían una aptitud inferior. El macizo de Muztag Ata, de 7500 m de elevación, seria quizá uno de los mejores lugares de observación para esta región.

Mana Kea, a 4200 m., en Hawái, constituye un referente mundial en observación infrarroja. Gran parte de su desarrollo provino de las dos últimas décadas del siglo pasado, cuando se inicia, verdaderamente, la época de la astronomía infrarroja y submilimétrica. Sus condiciones climáticas, notablemente estables a lo largo de año, con 1.5-3 mm. de PWV, y las facilidades logísticas, también pesaron en su desarrollo. No obstante, el nivel de exigencia de las actuales técnicas de observación infrarroja-submilimétrica parecen haber frenado el desarrollo de nuevas instalaciones en su cima, quedando también en el limbo la instalación de telescopios extremadamente grandes allí, como el telescopio de 30 m del CALTECH llamado "TMT".

El resto de los lugares del mundo, Cáucaso, Turquía, Oriente Medio, Mongolia, Australia, Sudáfrica y el territorio continental de EE. UU., no llegan a posicionarse según su PWV; ni tan siquiera, en una primera aproximación, ofrecen un clima óptimo. A pesar de ello, existen muchas elevaciones, entre 3000-5000 m. En ellos es posible esperar cantidades de PWV entre 1-3 mm. durante unos seis meses al año. Es cierto que, exceptuando el territorio continental de EE. UU., hay pocos estudios que

202

muestren la situación real del clima de las instalaciones astronómicas de segundo nivel presentes allí.

Definitivamente, la Antártida, con su alta meseta, a más de 3000 m. de altitud, es el mejor lugar del mundo para infrarrojo y submilimétrico, con cantidades de PWV inferiores a los mejores lugares de observación de la zona templada. Adicionalmente, la alta frecuencia de cielo despejado y la casi total ausencia de aerosoles refuerzan, aún más, las extraordinarias características observacionales del continente. Como alternativa, en la zona templada, habría que considerar las altas cumbres de los Andes o el Tíbet, próximas a los 7000 m de altura.

7 CONCLUSIONES

Los diferentes estudios existentes, desde la perspectiva astronómica, sobre el PWV, y los resultados alcanzados por nosotros, presentan limitaciones espaciotemporales. Bien es cierto que, conforme avanzaron las técnicas de medida y han aparecido bases de datos de diversa tipología, tanto en superficie, como a bordo de globos o de satélites, esta información ha manifestado una mejora muy significativa en tan sólo unas pocas décadas.

Las aspiraciones de esta tesis, vinculadas con toda la superficie terrestre, no nos permiten incidir con profundidad sobre cada aspecto limitante del PWV. Por ello, se ha prestado especial atención a una selección de lugares de interés astronómico mundial. A escala regional nos hemos centrado en la región del Mediterráneo occidental. A pesar de ello, se ofrece una visión integradora y universal del problema de estudio del PWV, promoviendo incluso donde seguir investigando. También, dependiendo del problema astronómico a resolver, se exigen unos mínimos respecto al valor del PWV, lo cual suele condicionar el enfoque de los trabajos que nosotros hemos referido.

Se ha obviado la discusión teórica de los fundamentos de las técnicas indicadas, ya que esto corresponde a la física atmosférica, más que a la geolocalización práctica de los observatorios astronómicos.

Se ha podido observar la modestia con que comenzaron los primeros investigadores, habitualmente en su entorno inmediato de trabajo. Poco a poco los estudios se fueron expandiendo por el mundo, hasta los entornos geográficos y climáticos más complejos. Los proyectos de la astronomía infrarroja y submilimétrica también se fueron volviendo más ambiciosos. Actualmente, la investigación del agua

precipitable está centrada en tres grandes zonas geográficas-astronómicas: 1) las inmediaciones del desierto de Atacama (Chile); 2) el Tíbet Chino; y 3), la alta meseta Antártica. Todos ellos con cantidades ínfimas de vapor de agua en su atmósfera. Estos observatorios están invariablemente a gran altitud (3000-6000) m., y pueden presentar temperaturas medias muy bajas, con frecuencia de -30 a -70° C.

Las técnicas de medición del PWV se han vuelto muy sofisticadas, como las que obtienen los demás parámetros y variables relevantes en astronomía. De esta forma, se hace un uso intensivo de las grandes bases de datos históricas, series climáticas y de los datos e imágenes proporcionadas por los satélites meteorológicos, procesadas con algoritmos complejos, apoyándose, con frecuencia, en modelos muy elaborados, a fin de ofrecer las condiciones probables actuales y futuras, en casi cualquier lugar de la Tierra.

Nosotros apreciamos que, prácticamente, la totalidad del continente Antártico presenta buenas o excelentes condiciones para la astronomía infrarroja y submilimétrica. Los lugares costeros, a baja altitud, deberían excluirse de los lugares más prometedores, habida cuenta de su mayor concentración de PWV, aunque sus ventajas logísticas sean muy evidentes.

También cabe subrayar que persisten algunas lagunas o dudas. En este sentido, cabe preguntarse hasta donde se podrá llegar físicamente con los observatorios futuros planteados para entornos de máxima complejidad logística, por la elevada altitud y las bajísimas temperaturas. En el futuro se prevé la progresiva implantación de observatorios de gran eficiencia con poca o nula atención humana, y operados de manera remota, cuando no autónoma. En este sentido, en el futuro inmediato se ira desdibujando la diferencia en la forma de operar de estos observatorios remotos en tierra respecto de los situados en el espacio. Estos observatorios son con los que necesariamente habrá que contar en los programas de investigación actuales, de los que citaremos, como más significativos, aquellos relacionados con la búsqueda de "exoplanetas" y el estudio de sus condiciones ambientales, superficiales y atmosféricas. Ello deriva del anhelo de encontrar signos de vida creíbles e indiscutibles, frente a la ignorancia total en este campo de hace solo dos o tres décadas. Se abre así un periodo que podríamos calificar de realmente emocionante.

En España, Sierra Nevada aparece como una isla de interés, dentro del contexto de Europa continental, para astronomía infrarroja, debido a su excelente logística, y los valores nocturnos alcanzados por su PWV, del orden de los 2 mm. Esto

cualifica a la misma como un lugar posible de futuros emplazamientos para observación en estas longitudes de onda. De hecho, actualmente está presente el observatorio milimétrico de IRAM, en las cercanías de pico Veleta. Este hecho corrobora las excelentes condiciones en esta localización. Adicionalmente, no hemos detectado variaciones significativas o tendenciales en esta región de la península lbérica, si bien en otras zonas se han observado incrementos del PWV, cuando se consideran varias décadas seguidas.

Nosotros, modestamente, revindicaríamos una figura parecida al "Parque Astronómico de Atacama" de Chile (Bustos et al. 2014) para zonas muy concretas del SE de la península Ibérica, coincidiendo, tal vez, con la declaración del Geoparque de Granada. Considérese que en este último ámbito también disponemos de los mejores lugares de Europa para la observación astronómica. El hecho de que algunos espacios naturales de la zona referida ya tengan una figura de protección, en forma de Parque Natural o Parque Nacional no garantiza, en absoluto, que las actividades humanas no degraden las características de calidad astronómica de estos lugares, especialmente, en lo que a contaminación lumínica e industrial se refiere. Esta es una cuestión que nosotros queremos revindicar desde aquí como Parque Astronómico del SE de Andalucía.

BIBLIOGRAFÍA

AERONET (Aerosol Robotic Network). (n.d.). Recupeado de https://aeronet.gsfc.nasa.gov/

Ardeberg, A. (1983). Workshop on ESO's Very Large Telescope, Cargese, Corse, France, May 16-19, 1983, Proceedings (A84-48051 23-89). Garching, West Germany. Bibliographic Code: 1983ESOC...17.217A.

Barreto, A., Cuevas, E., Damiri, B., Romero, P. M., & Almansa, F. (2013). Column water vapor determination in night period with a lunar photometer prototype. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 6(1), 767-793. doi: 10.5194/amt-6-767-2013

Beckers, J., et al. (1979). The night sky conditions at the Sacramento Peak Observatory II. Cloud Cover, Seeing and Precipitable Water. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 91(857), 857-860. doi: 10.4067/PSP.91.857

Bensammar, S. (1979). Atmospheric transparency and infrared astronomy at the Gornergrat. *Astronomy and Astrophysics*, 72, 186. Recuperado de https://adsabs.harvard.edu/full/1979A%26A....72..186B

Bock, O., Willis, P., Wang, J., & Mears, C. (2014). A high-quality, homogenized, global, long-term (1993–2008) DORIS precipitable water data set for climate monitoring and model verification. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(7209-7230). doi:10.1175/JCLI-D-15-0158.1

Boisier, J. P., & Aceituno, P. (2011). Climate change along the arid coast of northern Chile. *International Journal of Climatology*, 32(1803-1814). doi: 10.1002/joc.2395

Bustos, R., Rubio, M., Otarola, A., & Nagar, N. (2014). Parque Astronomico de Atacama: An Ideal Site for Millimeter, Submillimeter, and Mid-Infrared Astronomy. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 126(1126-1132). doi: 10.1086/679330

Cortés, F., Reeves, R., & Bustos, R. (2016). Analysis of the distribution of precipitable water vapor in the Chajnantor area. *Radio Science*, *51*(1166-1175). doi: 10.1002/2015RS005929

Chamberlin, R. A. (2001). South Pole submillimeter sky opacity and correlations with radiosonde observations. *Journal of Geophysical Research*, 106(D17), 20,101-20,113. doi: 10.1029/2001JD900103

Chamberlin, R. A., & Grossman, E. N. (2012). The wintertime South Pole tropospheric water vapor column: Comparisons of radiosonde and recent terahertz radiometry, use of the saturated column as a proxy measurement, and inference of decadal trends. *Journal of Geophysical Research*, 117, D13111. doi: 10.1029/2012JD017792

Chen, B., & Liu, Z. (2016). Global water vapor variability and trend from the latest 36year (1979 to 2014) data of ECMWF and NCEP reanalyses, radiosonde, GPS, and microwave satellite. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(11,442-11,462). doi: 10.1002/2016JD024917

Dunham T. (1939). Knowledge of the Planets in 1938, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 51(303). doi: 10.40711045

Durre, I., Williams Jr., C. N., Yin, X., & Vose, R. S. (2009). Radiosonde-based trends in precipitable water over the Northern Hemisphere: An update. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114, D05112. doi: 10.1029/2008JD010989

Copernicus Climate Data Store. (n.d.). ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. Recuperado de https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=download

Gao, B.-C., & Kaufman, Y. J. (2003). Water vapor retrievals using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D13), 4389. doi: 10.1029/2002JD003023

Gardini, A., Maíz Apellániz, J., Pérez, E., Quesada, J. A., & Funke, B. (2012). Using radiative transfer models to study the atmospheric water vapor content and to eliminate telluric lines from high-resolution optical spectra. *Highlights of Spanish Astrophysics VII, Proceedings of the X Scientific Meeting of the Spanish Astronomical Society (SEA)*, 947-947. doi: 10.48550/arXiv.1209.2266

Grasdalen, G. L., Gehrz, R. D., Hackwell, J. A., & Freeman, R. (1985). 20-Micron transparency and atmospheric water vapor at the Wyoming Infrared Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 97, 1013-1019. doi: 10.1086/131657

Giovanelli, R., Darling, J., Henderson, C., Hoffman, W., Barry, D., Cordes, J., Eikenberry, S., Gull, G., Keller, L., Smith, J. D., & Stacey, G. (2001). The Optical/Infrared Astronomical Quality of High Atacama Sites. II. Infrared Characteristics. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 113*, 803-813. doi: 10.1086/322136

Greve, A. (1978). The water vapour content in the western European atmosphere obtained from infrared measurements. *Infrared Physics*, 18(2), 127-132. doi: 10.1016/0020-0891(78)90021-0

Greve, A. (1983). Research note: Correlation of surface humidity and integrated atmospheric water vapour determined from infrared measurements. *Infrared Physics, 23*(1), 59-62. doi: 10.1016/0020-0891(83)90067-2

Hansen, O. L., & Caimanque, L. (1975). Precipitable water above Cerro Tololo between 1971 and 1975. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 87*(935-939). doi: 10.40029488

Haslebacher, C., Demory, M.-E., Demory, B.-O., Sarazin, M., & Vidale, P. L. (2022). Impact of climate change on site characteristics of eight major astronomical observatories. *Astronomy & Astrophysics*, 665, A149. doi: 10.1051/0004-6361/202142493

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., & Thépaut, J.-N. (2023). ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). doi: 10.24381/cds.f17050d7

Landau, R. (1982). A portable water vapor monitor for the day or the night use. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 94*(600-604). doi: 10.40678001

Lawrence, J. S. (2004). Infrared and Submillimeter Atmospheric Characteristics of High Antarctic Plateau Sites. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 116(482-492). <u>doi:</u> 10.1086/420757

Li, D., Blake, C. H., Nidever, D., & Halverson, S. P. (2018). Temporal Variations of Telluric Water Vapor Absorption at Apache Point Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 130(014501). <u>doi</u>: 10.1088/1538-3873/aa97ca

Marín, J. C., Pozo, D., & Curé, M. (2015). Estimating and forecasting the precipitable water vapor from GOES satellite data at high altitude sites. *Astronomy & Astrophysics*, 573, A41. doi: 10.1051/0004-6361/201424460

Ortíz de Galisteo, J. P. (2013). Caracterización del contenido de vapor de agua atmosférico con receptores GPS. *AME Boletín*, 39, 28-33. Recuperado de file:///C:/Users/Pc/Downloads/jsanchezlaulheo,+37-146-1-CE-1.pdf

Matsushita, S., Asada, K., Martin-Cocher, P. L., Chen, M.-T., Ho, P. T. P., Inoue, M., Koch, P. M., Paine, S. N., & Turner, D. D. (2017). 3.5 Year Monitoring of 225 GHz Opacity at the

Summit of Greenland. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 129(025001). doi: 10.1088/1538-3873/129/972/025001

Merrill, K. M., & Forbes, F. F. (1987). Comparison study of astronomical site quality of Mount Graham and Mauna Kea (No. 10). Advanced Development Program, National Optical Astronomy Observatories. (Final Report NASA Grant NGR 05-002-184 "Infrared Sky Noise Study" to California Institute of Technology Pasadena, California).

Millis, R. L., et al. (Eds.). (1987). International Conference on Identification, Optimization, and Protection of Optical Telescope Sites. Lowell Observatory.

Mlawer, E. J., Turner, D. D., Paine, S. N., Palchetti, L., Bianchini, G., Payne, V. H., Cady-Pereira, K. E., Pernak, R. L., Alvarado, M. J., Gombos, D., Delamere, J. S., Mlynczak, M. G., & Mast, J. C. (2019). Analysis of water vapor absorption in the far infrared and submillimeter regions using surface radiometric measurements from extremely dry locations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(8134-8160). doi: 10.1029/2018JD029508

Morrison, et al. (1973). Evaluation of Mauna Kea, Hawaii as an observatory site. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 85(505). doi: 10.1086/129449

Murcray, D. G., Murcray, F. H., Williams, W. J., & Leslie, F. E. (1960). Water vapor distribution above 90,000 feet. *Journal of Geophysical Research*, 65(11), 3641. <u>doi</u>: 10.1029/JZ065i011p03641

NASA. (n.d.). Worlview Earth Data. Recuperado de https://worldview.earthdata.nasa.gov/

Otárola, A., Travouillon, T., Schöck, M., Els, S., Riddle, R., Skidmore, W., Dahl, R., Naylor, D., & Querel, R. (2010). Thirty Meter Telescope Site Testing X: Precipitable Water Vapor. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 122(470-484). doi: 10.1086/651582

Otárola, A., De Breuck, C., Travouillon, T., Matsushita, S., Nyman, L.-Å., Wootten, A., Radford, S. J. E., Sarazin, M., Kerber, F., & Pérez-Beaupuits, J. P. (2019). Precipitable Water Vapor, Temperature, and Wind Statistics at Sites Suitable for mm and Submm Wavelength Astronomy in Northern Chile. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 131(045001). doi: 10.1088/1538-3873/aafb78

Özdemir, S., Yeşilyaprak, C., Aktuğ, B., et al. (2018). *Experimental Astronomy*, 46(323). doi: 10.1007/s10686-018-9605-2

Peixoto, J. P., Oort, A. H., Covey, C., & Taylor, K. (1992). *Physics Today, 45*(8). New York: American Institute of Physics.

Pérez-Ramírez, D., Navas-Guzmán, F., Lyamani, H., Fernández-Gálvez, J., Olmo, F. J., & Alados-Arboledas, L. (2011). Retrievals of precipitable water vapor using star photometry: Assessment with Raman lidar and link to sun photometry. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117, D05202. doi: 10.1029/2011JD016450

Pérez, E., Quesada, J. A., Moles, M., John, D., Leon, S., Ortíz, J. L., & Peñalver, J. (2010). A dry high-altitude observatory in continental Europe. *EAS Publications Series*, 40(119-122). doi: 10.1051/eas/1040017

Pérez-Jordán, G., Castro-Almazán, J. A., Muñoz-Tuñón, C., Codina, B., & Vernin, J. (2015). Forecasting the precipitable water vapour content: validation for astronomical observatories using radiosoundings. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452(2), 1992-2003. doi: 10.1093/mnras/stv1394

Quesada, J. A. (1989). Precipitable water vapor content above Pico Veleta. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 101, 441. doi: 10.1086/132454

Qian, Y., Yao, H., Wang, Y., Bai, Z., & Yin, J. (2018). The Characteristics at the Ali Observatory Based on Radiosonde Observations. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 130, 125002. doi: 10.26660693

Radford, S. J. E., & Peterson, J. B. (2016). Submillimeter Atmospheric Transparency at Mauna Kea, at the South Pole, and at Chajnantor. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 128*, 075001. doi: 10.26659970

Revuelta, A., Rodríguez, C., Mateas, J., & Garmendia, J. (1985). Breve análisis de métodos para la medida del vapor de agua precipitable. *Revista Tiempo y Clima*, 3(5), 43-47. Recuperado de https://pub.ame-web.org/index.php/TyC/article/view/856/872

Ricaud, P., Genthon, C., Durand, P., Attié, J.-L., Carminati, F., Canut, G., Vanacker, J.-F., Moggio, L., Courcoux, Y., Pellegrini, A., & Rose, T. (2012). Summer to Winter Diurnal Variabilities of Temperature and Water Vapour in the Lowermost Troposphere as Observed by HAMSTRAD over Dome C, Antarctica. *Boundary-Layer Meteorology*. doi: 10.1007/s10546-011-9673-6

Roosen, R. G., & Angione, R. J. (1977). Variations in the atmospheric water vapor: Baseline results from Smithsonian observations. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 89(814-822). doi: 10.1086/130233

Sarazin, M., Kerber, F., & de Breuck, C. (2013). Precipitable Water Vapour at the ESO Observatories: The Skill of the Forecasts. *The Messenger*, 152, 17-21. Recuperado de https://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.152-jun13/messenger-no152-17-21.pdf

Schwerdtfeger, W. (1970). The climate of the Antarctic. In S. Orvig (Ed.), *Climates of the Polar Regions* (vol. 14, pp. 253-355). Elsevier.

Sherwood, W. A., Schultz, G. V., & Greve, A. (1983). Atmospheric water vapour measurements at Zelenchukskaya (U.S.S.R.) and La Silla (Chile). *Infrared Physics*, 23(1), 59-62. doi: 10.1016/0020-0891(83)90020-9

Schoeberl, M. R., Jensen, E. J., Pfister, L., Ueyama, R., Wang, T., Selkirk, H., et al. (2019). Water vapor, clouds, and saturation in the tropical tropopause layer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 3984-4003. doi: 10.1029/2018JD029849

Stevens, B. (2005). Atmospheric moist convection. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33, 605-643. doi: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122658

Suen, J. Y., Fang, M. T., & Lubin, P. M. (2013). Global Distribution of Water Vapor and Cloud Cover—Sites for High Performance THz Applications. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 4(1), 86-100. doi: 10.1109/TTHZ.2013.2294018

Tietäväinen, H., & Vihma, T. (2008). Atmospheric moisture budget over Antarctica and the Southern Ocean based on the ERA-40 reanalysis. *International Journal of Climatology*, 28(15), 1977-1995. doi: 10.1002/joc.1684

Townes, C. H., & Melnick, G. (1990). Atmospheric transmission in the far-infrared at the South Pole and astronomical applications. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 102, 357-367. doi: 10.40679498

Chen, T.-C., Pfaendtner, J., Chen, J.-M., & Wikle, C. K. (1996). Variability of the global precipitable water with a timescale of 90-150 days. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D5), 9323-9332. doi:10.1029/95JD02369

Tremblin, P., Schneider, N., Minier, V., Durand, G. A., & Urban, J. (2012). Worldwide site comparison for submillimetre astronomy. *Astronomy & Astrophysics, 548*, A65. doi: 10.1051/0004-6361/201220420

UERRA (n.d.). Data sets. Recuperado de https://uerra.eu/

Weatphal, J. A. (1974). Infrared Sky Noise Survey. *Final Report NASA Grant NGR 05-002-185.* doi.org/10.19740011319

Walden, V. P., Town, M. S., Halter, B., & Storey, J. W. V. (2005). First Measurements of the Infrared Sky Brightness at Dome C, Antarctica. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 117, 300-308. doi: 10.1086/427988

Wallace, L., Livingston, W., & Hinkle, K. (1984). Characteristics of water vapor over Kitt-Peak as determined from FTS data. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 96(584), 836-838. doi: 10.40678412

Warner, J. W. (1977). Comparative water vapor measurements for infrared sites. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 89, 724-727. doi: 10.40677099

Weaver, D., Strong, K., Walker, K. A., Sioris, C., Schneider, M., McElroy, C. T., et al. (2018). Comparison of ground-based and satellite measurements of water vapour vertical profiles over Ellesmere Island, Nunavut. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*. doi: 10.5194/amt-2018-267

Yang, H., Allen, G., Ashley, M. C. B., Bonner, C. S., Bradley, S., Cui, X., et al. (2009). The PLATO dome a site-testing observatory: Instrumentation and first results. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 121*(876), 174-184. doi: 10.1086/597547

Ye, Q.-Z., Su, M., Li, H., & Zhang, X. (2016). Tibet's Ali: Asia's Atacama? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 000*, 1-5. doi: 10.1093/mnrasl/slv188 https://doi.org/10.1093/mnrasl/slv188

<u>APÉNDICE A</u>

Glosario de términos

CAPA LÍMITE PLANETARIA

La capa baja de la atmosfera inmediatamente próxima al suelo constituye la capa de rozamiento, siendo su altura muy variable, pues depende de la orografía. Convencionalmente se considera que tiene unos 1000 metros de espesor, aunque en la práctica suele ser algo menor. En esta capa la fuerza de rozamiento del aire va disminuyendo con la altura hasta alcanzar la atmosfera libre, donde domina el viento geostrófico.

ESCALA DE ALTURA

La escala de altura es la altura a la que hay que elevarse en una atmósfera para que la presión atmosférica disminuya en un factor e = 2.718182. Es decir, la disminución de presión es 1-1/ e = 0.632; (= 63.2 %). Para calcularla basta con conocer la Ley barométrica. Ello significa que una variación de la presión del 50%, para el aire a 5500 m. Siendo su escala de altura de 6950 m. para una variación = e.

La escala de altura para el vapor de agua, dadas sus características de concentración molecular, respecto a la temperatura, resulta ser de un PWV ~1800 m. en latitudes templadas. Por ello varía mucho más rápidamente con la altura que el propio aire.

PWV

El agua precipitable también expresado como W, expresado en cm. se puede calcular mediante la integral entre dos niveles h₁, h2 del radiosondeo atmosférico.

$$W = 10^{-4} \int_{h_1}^{h_2} \varrho_e dh$$

Donde Qe es la humedad absoluta en gramos/m³

El PWV es la cantidad de vapor de agua en la atmósfera integrada en una columna unitaria desde la superficie hasta la parte superior de la atmósfera. Para el PWV, integramos hasta la tropopausa, porque la mayoría de los fenómenos meteorológicos ocurren en la troposfera y la mayor parte del agua está contenida dentro de la troposfera. Dicho de otro modo, el PWV es la masa de agua líquida si se

condensara todo el vapor de agua de una columna unitaria de la atmósfera (Peixoto et al. 1992). Viene dada por

$$W(\theta, \phi, t) = \int_0^{P_0} Q(\frac{Dp}{g})$$
(1)

Donde Q es la humedad específica, g es la aceleración gravitatoria, p es la presión y P0 es la presión superficial. El PWV depende de la longitud θ , la latitud ϕ y el tiempo t en el que se observa.

El PWV se calcula directamente a partir de la ecuación (1) sustituyendo la integral por la suma

$$PWV = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^{N} q_i \cdot \Delta p_i$$
(2)

Aquí pi es la presión (en hPa) y qi es la humedad específica (en kg kg-1) en el nivel de presión i.

"Trade Winds"

Los vientos del este (Trade Winds) son permanentes en bajas latitudes hasta cerca del Ecuador. Su dirección predominante es del NE en el hemisferio norte y del SE en el hemisferio sur. Tienden a reforzarse durante el invierno del hemisferio correspondiente. Estos vientos tuvieron mucha importancia durante la larga época de la navegación a vela. Respecto a su papel en el PWV se puede decir que tienden a mantener una amplia zona de los continentes y océanos bajo un régimen de estabilidad atmosférica en la cual se da una fuerte inversión atmosférica de tipo térmico en latitudes subtropicales.

Esta inversión tiende a atrapar el vapor de agua bajo las nubes que se forman en capas estratiformes a menos de 1500 m. de altitud. Es por ello por lo que los lugares más secos en altitudes montañosas se sitúan entre los 20° y 30° de latitud en ambos hemisferios.

OPACIDAD (T)

Principio de medición: El principio de medición, por el cual se determina la opacidad de un material, es la transmitancia (T), que se define como el proceso físico por el cual la energía radiante que incide sobre una superficie es parcialmente transmitida, sin cambio en la frecuencia; es expresada como una relación del cociente de la energía

radiante incidente y la energía radiante transmitida. (CIE 17.4. 1987) según lo indica la siguiente expresión:

$$\mathbf{T} = \mathbf{\theta}_{1}/\mathbf{\theta}_{0}$$

donde:

 θ_1 = Energía radiante transmitida; θ_0 = Energía radiante incidente.

FACTOR DE ALTITUD PÍXEL. (Orografía del píxel)

El píxel de una imagen satelital reanalizada presenta una trama de formato ráster con distintos valores de PWV en cada uno de ellos, gobernado fundamentalmente por su altitud promedio. (orografía del píxel). Como la altitud de un observatorio en esas coordenadas, puede estar a mucha más altitud, que dicha altura media, es por lo que se impone una deducción del PWV, aproximado, aplicando una escala de alturas hallada empíricamente para la región considerada. En el caso de la región entre las islas Canarias, el Atlas y la Península Ibérica se pudo comprobar como la escala de altura era de ~2400 m. (ver Figura 56 con una resolución de píxel de 0. 25º para series promediadas de la base de datos de PWV de ERA5.

APÉNDICE B

TABLA DE PWV EN OBSERVATORIOS ANTERIOR A 1990

OBSERVATORIO	ALTITUD	PWV mm.	REFERENCIAS
Chacaltaya, Bolivia	5200	2.31	Warner, 1977
White Mountain, USA	4340	1.85	Beckers et al, 1979
Mauna Kea, Hawaii	4205	0.9	Morrison et al
u	"	2.04	Warner, 1977
u	"	2.3	Greve, 1981
"	"	1.8	Beckers et al, 1979
u	"	3.0	Wallace et al,1984
Wheeler Peak, USA	3980	3.0	Wallace et al,1984
Wyoming, USA	3600	1.5	Warner, 1977
Jounfraujoh, Switzerland	3580	2.7	Greve, 1978
Pico Veleta, Spain	3400	2.1	Greve, 1978
u	u	2.9	Quesada, 1989
Mount Graham, USA	3250	5.1	Wallace et al, 1984
Gornegrat, Switzerland	3150	2.7	Bensammar, 1979
S.Pedro Martir, Mexico	2800	3.6	Beckers et al, 1979
Sacramento Peak, USA	2810	3.15	Beckers et al, 1979
Mount Lemon, USA	2510	1.4	Beckers et al, 1979
u	u	2.2	Warner, 1977
u	u	5.0	Greve 1983
Monte Montezuma, Chile	2711	4.5	Roosen et al, 1977
Bure, France	2550	1.7	Greve, 1983
St. Catherine, Egypt	2600	2.1	Roosen et al, 1977
Burro Mountain, USA	2440	3.8	Roosen et al, 1977
Padrille, France	2300	7.5	Greve, 1978
Table Mountain, USA	2286	5.0	Roosen et al, 1977
Cerro Tololo, Chile	2280	3.6	Hansen et al, 1975
u	u	3.8	Beckers et al, 1979
Calar Alto, Spain	2168	7.7	Millis, R.L., 1987
McDonald, USA	2080	5.3	Beckers et a, 1979
ű	"	9.0	Wallace, 1984

"	"	3.5	Beckers et al, 1979
Monte Wilson, USA	1737	5.5	Roosen et al, 1977
Monte Harquahala, USA	1721	4.8	Roosen et al, 1977
Monte Palomar, USA	1710	4.4	Beckers et al, 1979
Mount Brukkaros, SWA	1581	8.1	Roosen et al, 1977
Mount Humprey, USA	1500	6.9	Roosen et a, 1977
Motbell, France	1300	14.0	Greve, 1978
Paranal, Chile	2700	3.0	Ardeberg, 1983
Calama, Chile	2250	6.8	Roosen et al, 1977
Zelenchukskaya, URSS	2100	5.8	Sherwood y Greve, 1983
South Pole	2880	<0.5	Schwerdtfeger, W., 1970

CAPITULO IV

CONTAMINACIÓN LUMÍNICA

1 OBJETIVOS

El objetivo general fijado para este apartado es mostrar la situación a escala universal del problema de la contaminación lumínica nocturna, especialmente la generada por el hombre. Partiendo de la literatura consultada se visualiza la situación actual de la contaminación lumínica artificial en la generalidad de los observatorios astronómicos existentes, y se estudia como incide en las observaciones.

Como objetivos específicos aparecen los siguientes:

Utilizar diversos métodos y aproximaciones con medidas reales del brillo de fondo de cielo sobre los observatorios astronómicos del SE de la península Ibérica, para, en algunos casos, mostrar con perspectiva histórica la evolución de la contaminación lumínica.

Estudiar la contaminación lumínica en observatorios específicos del sureste de la península Ibérica: Calar Alto, Sierra Nevada, La Sagra y emplazamientos cercanos.

Evaluar si la creciente iluminación a base de diodos LED's determina nuevos problemas en la percepción del brillo del fondo de cielo nocturno y como la legislación, nacional y autonómica de Andalucía afronta el problema de la contaminación lumínica.

2 INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la contaminación lumínica es uno de los problemas más acuciantes de la astronomía observacional. Además, es uno de los obstáculos que está costando más trabajo resolver, siquiera en parte, y que ocupa buena parte del tiempo de las discusiones en las reuniones astronómicas a cualquier nivel, sea nacional o internacional.

La contaminación lumínica nocturna del cielo, desde el punto de vista formal, se podría expresar de la siguiente forma: "Se entiende por contaminación lumínica la introducción de luz de manera artificial que produce efectos adversos. La contaminación lumínica ha pasado en los últimos años de ser "un problema de astrónomos" a ser objeto de estudio para diversas disciplinas debido a la evidencia cada vez más clara de que la contaminación lumínica afecta negativamente a la economía, al patrimonio cultural, al ecosistema nocturno y a los ritmos biológicos de los humanos y su salud (ritmos circadianos) y los demás seres vivos" (Sánchez, 2015).

"Los astrónomos fueron los pioneros en la caracterización de este fenómeno, no astronómico en su origen, pero cuyo efecto muy negativo en la observación impulsó la construcción de observatorios astronómicos en lugares apartados para evitar en lo posible la contaminación" (Sánchez, 2015).

"Actualmente los observatorios astronómicos clásicos, construidos en el interior de las ciudades, son museos e incluso otros situados en zonas de montaña se han visto tan afectados por el aumento de la contaminación lumínica resultado del crecimiento desmesurado de núcleos urbanos próximos que no pueden cumplir las funciones para las que fueron construidos. Como ejemplo el observatorio de Monte Wilson en California, u otros seriamente contaminados como Monte Palomar. Uno de los criterios de calidad de los observatorios astronómicos profesionales es el brillo de cielo nocturno y por eso este parámetro se mide cuidadosamente antes de seleccionar un lugar idóneo para instalar uno nuevo mediante campañas de caracterización del sitio. En los observatorios que se encuentran en funcionamiento también se mide el brillo de cielo para detectar si la evolución de la contaminación lumínica degrada la calidad astronómica del sitio" (Sánchez, 2015).

Recientemente, las autoridades regionales han aprobado algunas leyes de protección para evitar que el desarrollo de actividades cercanas a los observatorios degrade su cielo nocturno. La mayoría de estas leyes tienen una aplicación laxa, y siempre son insuficientes para contener el desbordado crecimiento del fenómeno sobre las ciudades, denominado "hongo lumínico", que todos podemos observar desde cierta distancia.

"La contaminación lumínica surge con la civilización, desde la invención del fuego por el hombre. El dominio de la naturaleza por medios artificiales ha sido una constante en la historia de la humanidad" (Sánchez, 2015). El verdadero detonante de la contaminación lumínica quizá hemos de situarlo en la explosión demográfica y el acceso a la energía eléctrica, que lleva la luz a las calles de los núcleos de población. En la actualidad la población mundial se ha doblado respecto a los años 50. El crecimiento de la población urbana y, por ello, la cantidad de luz inyectada en la atmósfera ha aumentado dramáticamente, en un factor mucho mayor que el asociado al crecimiento demográfico.

"El gasto en energía también se ha disparado y de manera constante, siendo ahora mismo su consumo más del doble que en los años 70 (ENCY, 2014). En los últimos años, se ha producido una serie de avances en tecnología de iluminación que han multiplicado por varios órdenes de magnitud las posibilidades de emitir más luz desde las nuevas lámparas de LED. En conjunto, esto supone más de siglo y medio de evolución tecnológica. Esta escalada ha sido provocada por el ancestral miedo a la oscuridad, que está profundamente enraizado en la psicología humana (Schaller et al., 2003). Sin embargo, los datos objetivos indican que la efectividad de la iluminación en detener el crimen es cuanto menos cuestionable (Marchant, 2010). Nos encontramos, actualmente, en que una parte importante de la iluminación produce contaminación lumínica, bien por su deficiente diseño o por su exceso de potencia. Algunas de las consecuencias de esta iluminación masiva no se consideran importantes, a pesar de que implican la imposibilidad de observar las estrellas o la Vía Láctea. A ello se une el hecho de que los efectos de la contaminación lumínica no han sido conocidos hasta épocas recientes: por ejemplo, el peligro de destrucción del hábitat de muchas especies (Holker et al., 2010) o su efecto negativo en la salud humana (Stevens et al., 2013)" (Sánchez, 2015).

3 FUENTES Y METODOLOGÍA

En la figura 72 aparece el flujo de trabajo ligado al presente capítulo. Primero se ha realizado una revision bibliográfica. Se ha prestado atención a los trabajos que estudian los efectos de la contaminación natural en el cielo nocturno, y a los que se centran en los efectos debidos a la iluminación exterior de las ciudades y otros focos de contaminación lumínica.

Al respecto, conviene traer a colación el trabajo de Falchi et al. (2016). En el mismo se ha desarrollado cartografía del cielo en diferentes regiones del mundo de interés astronómico. Además, se han analizado una serie de casos particulares de la península Ibérica. Para algunos de estos lugares nosotros disponemos de medidas de contaminación lumínica propias, tanto fotométricas como espectroscópicas. Ello nos ha permitido constrastar el fenómeno con diferentes técnicas de medida. Finalmente, se dispuso de una documentación final en la que aparecen una serie de conclusiones según los casos estudiados y nuestros resultados.

Figura 72. Diagrama de flujo de la información en la elaboracion del capitulo de "contaminación lumínica"



4 PERSPECTIVA HISTÓRICO DOCUMENTAL

4.1 CONCEPTOS BÁSICOS

El brillo de fondo del cielo nocturno está influido por la iluminación artificial, pero también, en mayor o menor medida, por la iluminación natural. Respecto a esto último, conviene traer a colación, en primer lugar, a la dispersión de la luz de las estrellas por el aire (la conocida en inglés como molecular "rayleigh scattering"). De hecho, y de acuerdo con Allen (1973), el brillo del conjunto de todo el cielo, en una noche sin Luna, y en un lugar sin contaminación artificial alguna, posee un brillo equivalente a 1160 estrellas de magnitud 1 (las más brillantes del cielo); tanto es así que, si en estas condiciones tapamos con la mano un papel o tejido blanco podemos discernir la sombra de nuestra mano, a pesar de la aparente obscuridad. También contribuye al brillo de cielo la presencia de polvo, aerosoles u otros contaminantes, como son la luz zodiacal o reflejo del polvo interplanetario, las auroras boreales y el "airglow" o brillo del aire en determinadas frecuencias o colores de la luz. Asimismo tendríamos que considerar otros fenómenos en la alta atmósfera. Además, el albedo superficial de la superficie terrestre también contribuye indirectamente a reflejar la luz de diversas fuentes naturales o artificiales sobre los observatorios. Un albedo alto (nieve o hielo) puede incrementar el brillo del cielo por reflexión de las fuentes emisoras. En este sentido, el albedo de una

porción del terreno es un factor local, diferente en cada caso, y con un comportamiento similar al que pueden presentar los aerosoles y el polvo en suspensión.

Sobre estos componentes de la iluminación natural poco se puede hacer, aunque es factible buscar el mejor de los emplazamientos. Por ello está justificado que en nuestra tesis abordemos este problema, aunque no sea en profundidad. Ciertamente, este hecho puede ser relevante en los observatorios astronómicos importantes, así como el análisis de su previsible evolución futura.

4.1.1 El brillo del cielo por causas naturales

Durante las primeras décadas del siglo XX los estudios sobre los efectos de la contaminación lumínica estuvieron capitaneados por el análisis del brillo natural del cielo nocturno sobre los observatorios astronómicos. No en vano, el alumbrado urbano exterior existente era nulo o despreciable.

Uno de los primeros en señalar la posible naturaleza de la aurora boreal fue Lewis en 1924. Según el autor el origen de la aurora terrestre es un misterio, dado que las rayas espectrales encontradas no se correspondían exactamente con la emisión del plasma de los elementos en la alta atmósfera terrestre. Se dedujo, no obstante, que las partículas cargadas emitidas por el Sol, particularmente en periodos de alta actividad, y que las líneas del campo magnético terrestre, tendrían mucho que ver con este fenómeno. Se observó, por ejemplo, que la línea verde más prominente correspondería al nitrógeno, y que de alguna manera ilumina el cielo de cualquier latitud terrestre, en especial en el orto y ocaso del Sol y en latitudes altas. El problema fue resolviéndose con el uso de espectrógrafos de alta resolución y placas fotográficas, acopladas a los telescopios, y que eran expuestas a veces, durante varias noches, para estudiar el fenómeno de brillo natural de la aurora, para determinar qué elementos los producían.

Kaplan, en 1935, señala al oxígeno como el responsable del brillo intenso en el verde (the green line). Además, encuentra que este brillo es de naturaleza diferente al de la aurora polar. En cualquier caso, en esta época las atribuciones de emisión espectral al cielo nocturno fueron muy controvertidas, habida cuenta de la complejidad del fenómeno de emisión iónica, que domina en los átomos de los elementos del aire, a grandes altitudes y altas temperaturas de excitación.

Continuando con los estudios de emisión del cielo y de las emisiones de la aurora, Swings (1948) introduce identificaciones de nuevas líneas que emiten en la atmósfera, de manera natural. Concretamente, nos estamos refiriendo al oxígeno O₁ (que se ven reforzadas en el amanecer y el anochecer), así como al sodio ionosférico (NaID) y nitrógeno N₂. El autor se extiende en las formas y mecanismos en que estas

emisiones se producen, quedando ya bastante más identificado el problema y sus múltiples componentes. Se emplean los espectros dejados por los meteoritos en su caída, o el estudio de las nubes noctilucentes a gran altitud. Además, en esta época se empezaron a realizar las primeras medidas directas de la alta atmósfera, con cohetes V2, requisados en 1945 a los alemanes, tras el final de la II Guerra Mundial.

Landolt (1958) explica los experimentos americanos llevados a cabo en la estación Amundsen-Scott del Polo Sur, en el marco del programa de investigación del Año Geofísico Internacional (IGY) de 1957. El Polo Sur ofrecía una oportunidad única para estudiar lo más cerca posible el fenómeno de las auroras y del brillo del cielo.

Se utilizaron varias técnicas desarrolladas en esta época. Se contó con un sistema fotográfico de "time-lapse" (toma a intervalos), que fotografiaba el cielo de forma regular. Se usó también un sistema espectrográfico de alta velocidad, con una cámara de foco muy corto. Se contó con la medición fotométrica de la línea del oxígeno a 5577 Armstrong, a través de los fotomultiplicadores 1P21, recientemente desarrollados. Finalmente, se anotaron, para cada hora, las posiciones y colores de la aurora, con el concurso de observadores visuales, especialmente entrenados.

Blackwell e Ingham (1961) presentan las medidas de brillo superficial de la llamada luz zodiacal. Estas mediciones se realizaron desde una estación a gran altitud, en Bolivia (Chacaltaya), a más de 5000 metros de elevación. Este lugar es particularmente útil, a causa de que el tiempo meteorológico suele ser bueno, y dada su gran altitud, que hace que la cantidad de aerosoles y polvo atmosférico sea mínima, garantizando que la atenuación y dispersión de la luz solo esté afectada por el "scattering" de "rayleigh", o la dispersión propia del aire limpio. Se encontró que el color de este brillo es próximo al del Sol, o algo más rojo.

La luz zodiacal fue objeto de controversia entre los astrónomos en los últimos 300 años. No fue hasta recientemente en que se pudo determinar su origen y los mecanismos de su formación. Esto es, el brillo provocado por el polvo interplanetario y otras partículas, como electrones libres, cercanas al plano del sistema Solar. El hecho de que este plano coincide con el zodiaco es lo que le da su nombre. Es más prominente en los ortos y ocasos del Sol, y con atmósfera muy clara, extendiéndose a ambos lados de la eclíptica, con intensidad decreciente conforme nos alejamos de dicho plano y con la distancia al Sol. En general, es de brillo débil y solo es dado observarla a simple vista cuando las condiciones atmosféricas son de una gran transparencia y sin Luna; además, se requiere que el Sol este bajo en el horizonte, pues su brillo directo o indirecto en la atmósfera terrestre dificulta su observación. Como es un brillo de cielo natural, no hay forma o manera de esquivarlo. Incluso seria visible fuera de la atmósfera de la Tierra, dado que las partículas que lo provocan están en el Sistema Solar en un plano igual al de los planetas.

Kalinowsky et al. (1975) encuentran variaciones del fondo de cielo en noches consecutivas o próximas de invierno. Las magnitudes de estas variaciones son del orden de 0.3 o 0.4 mag /seg² de arco, tanto en los filtros V como B, del sistema Johnson. Las medidas datan de 1960, y fueron realizadas desde el observatorio McDonald (Texas). Los registros efectuados en 1972-1973 mostraron el mismo comportamiento. Esto lo atribuyen los autores a las variaciones del "airglow" atmosférico, en especial al brillo asociado a la actividad solar y emitida en la zona verde del espectro. La latitud geomagnética de los observatorios parece tener un papel importante en estas variaciones de brillo del fondo de cielo.

Patat (2008) muestra los resultados de brillo de fondo de cielo sobre el Cerro Paranal (Chile), sede del Observatorio Sur Europeo (ESO). El estudio fue llevado a cabo tras estudiar unas diez mil imágenes espectroscópicas, tomadas en el foco del instrumento VLT-FORS 1, considerando la emisión dentro de las bandas U,B,V,R e I, del sistema estándar de banda ancha. Las observaciones cubren 6 años, 1999-2005, cubriendo ½ ciclo solar, concretamente el nº 23.

Este largo set de medidas cubre un dilatado periodo de tiempo y muestran, en efecto, una pronunciada variación estacional de cambios de brillo cielo, en las emisiones de "airglow" o brillo del aire, principalmente en las bandas V, R e I, mostrándose también la muy conocida variación de la línea doble del NaID. Lo mismo ocurrió con otras muchas líneas espectroscópicas de tipo natural.

En los valores de "airglow" registrados se detecta una clara influencia del ciclo solar, más pronunciado en la banda ultravioleta del espectro (U), con una oscilación de 0,6 mag. /seg.² de arco, entre el máximo y el mínimo de actividad solar del ciclo 23. No se encontró correlación entre la emisión del doblete del NaID y el OH. Sí existe una fuerte dependencia entre la intensidad del N1 (5200 A) y la línea del O1 (6300 A).

Todo parece sugerir que la emisión de partículas cargadas procedentes del Sol está detrás de estas variaciones del "airglow" de tipo natural. Su contribución en el máximo es solo de 0.3 mag/seg² arco en el zenit y en la banda V, pero tiene su importancia cuando se trata de cielos realmente obscuros, donde se sitúan los observatorios más vanguardistas de la actualidad. Este es el caso de VLT y el ELT de la ESO en Chile.

4.1.2 El brillo de fondo: cielo antropogénico

Respecto al brillo de fondo del cielo, procedente de actividades humanas, podemos señalar que las iluminaciones exteriores e industriales son las principales responsables. Entre la numerosa literatura sobre el brillo de fondo de cielo artificial conviene citar a Fletcher y Cramptom (1973). Estos autores estudian el espectro de emisión de las lámparas de sodio a alta presión frente a las de mercurio, las primeras habitualmente usadas en calles y autovías. Las emisiones de las líneas más fuertes del mercurio son aproximadamente 10 veces más potentes que las del sodio a alta presión.

Ante el dilema de moverse a lugares más alejados de las grandes ciudades de Arizona (Tucson), los astrónomos sugieren a las autoridades locales emitir ordenanzas que limiten el impacto de estas emisiones sobre el cielo cercano a los observatorios astronómicos del estado. En concreto, proponen reducir la emisión en ángulos superiores al plano horizontal de la luminaria, apantallando la misma o disponiendo de otros tipos más apropiados. También sugieren reducir la emisión de longitud de onda menor de 4000 Å (Ångström). Esto se puede lograr con adición de filtros en la luminaria, o cambiando el tipo de lámpara emisora. Estos fueron algunos de los primeros intentos reales de luchar contra la contaminación lumínica, que en lo que sabemos, alcanzó un éxito relativo para su época en Arizona y en Victoria, en la Columbia Británica (Canadá).

Walker (1973 y 1977) explora el efecto de la contaminación lumínica de las ciudades del SW de los Estados Unidos y Baja California (México). En su estudio muestra que, siempre que las ciudades tengan un nivel de renta equiparable, la contaminación lumínica que provocan es aproximadamente proporcional a su población y a la distancia respecto de la fuente elevada a un exponente:

$$I \propto D^{-2.5}$$
 (2)

Siendo I la intensidad, directamente relacionada con el total de población; y D la distancia en kilómetros al centro de la ciudad.

Se realizaron las estimaciones para una elevación de 45° y en dirección a la ciudad contaminante. Se considera que la intensidad encontrada en mag/seg² de arco se superpone al brillo de fondo natural, que en el V de Johnson corresponde a 21,9 mag/seg² de arco. Con ello se puede establecer también:

$$\mathsf{P} \propto \mathsf{D}^{2.5} \tag{3}$$

Donde P representa la población en habitantes y D la distancia en kilómetros al centro de la ciudad.

Las medidas y hallazgos experimentarles de Walker, en la década de los 70, en el SW Estados Unidos, fueron características de una zona y una época de rápido desarrollo y derroche creciente de energía. Las expresiones anteriores no se ajustaron tan bien en el caso de otras zonas del mundo, por la presencia de otros contextos socioeconómicos, y también por la distinta tipología de trazados urbanos y sistemas de iluminación. No obstante, fue el primer intento serio a nivel experimental de cartografiar los efectos perniciosos de la contaminación lumínica sobre los observatorios próximos.

Treanor (1973) y Pike (1976) consideran usar modelos matemáticos de iluminación de fondo de cielo, aplicables a las poblaciones cercanas. Para ello abogan por la aplicación de modelos lineales, según el número de habitantes y la distancia a los núcleos de población. Bien es cierto que, Pike señala que a distancias considerables de las ciudades un modelo cuadrático se ajusta mejor a lo observado, dejando los modelos lineales para el entorno y el centro de los focos de emisión.

Los estudios de Pike se realizaron en la zona de Ontario (Canadá). Fue uno de los primeros intentos en cuantificar los efectos del crecimiento de la población en el brillo de fondo de cielo. En sus modelizaciones se consideraron incrementos de 5 años, hasta el año 2000. Los autores concluyen que la escala de trabajo espacial (tamaño de píxel) es importante en estas modelizaciones, por lo que resulta recomendable usar pixeles pequeños de menos de 1 Km. de lado.

Turnrose (1974) calcula el brillo de fondo de cielo para dos importantes observatorios americanos de la costa W. En concreto se trata de Mount Wilson y Monte Palomar, ambos en California. El periodo considerado es de 1969/1973 y para 5400 Å de longitud de onda. La magnitud espectrofotométrica cenital encontrada estaba en torno a 22 mag/seg² arco en Monte Palomar. Demuestran que este observatorio es aún relativamente obscuro. Sin embargo, Mount Wilson muestra un cielo bastante más brillante (del orden de 2 magnitudes más que Palomar). Así, por ejemplo, las líneas más prominentes de las lámparas de mercurio son del orden de 30 veces más intensas en Monte Wilson que en Monte Palomar.

Hoag (1976) comunica el éxito de la ordenanza municipal sobre la iluminación exterior en la ciudad de Tucson, Arizona. Los autores muestran que ha tenido un efecto positivo, al detener la emisión en las luminarias en el entorno de 4400 Å. Ciertamente, el control realizado desde el observatorio de Kitt-Peak desde 1971-1975 mostró una estabilización a partir de 1973. Por tanto, de esta forma, prueban la eficacia de la normativa, en la que se prohíbe determinada forma y tipo de lámparas en iluminación exterior.

Osterbrock et al. (1976) presentan los espectros del cielo sobre Mount Hamilton (California). Los autores demuestran los efectos de la emisión de las principales luminarias de las ciudades del Valle de Santa Cruz. En el trabajo además se dedujo que el mínimo de emisión estaría relacionado con las lámparas de sodio de baja presión, respecto a las de mercurio y sodio de alta presión.

Nosotros podemos hacer la siguiente reflexión: las lámparas de sodio de baja presión, a pesar de su bajo consumo, han sido progresivamente abandonadas en iluminación exterior, por la imposibilidad de distinguir los colores de los objetos. Así se explica que las lámparas de sodio de alta presión hayan ganado la partida a las de mercurio y a las de sodio de baja presión.

Schneeberger et al. (1979) observaron durante nueve meses, en el año 1978, el brillo de fondo de cielo nocturno en el observatorio de Sacramento Peak, a 2800 m. de altitud (Nuevo México). El brillo observado en V de Johnson fue cercano al mínimo teórico, situándose en torno a 21.9 mag/seg arco², arco deducido al zenit local. No obstante, se observan cambios en intensidad, de hasta el 25 %, principalmente en los primeros meses de verano.

Los autores investigaron también el efecto de ciudades relativamente cercanas. Las mismas no mostraron un efecto importante, ya que son relativamente pequeñas frente a la ciudad de El Paso, que cuenta con 900000 habitantes y se sitúa a unos 130 Km. de distancia. Esta es la ciudad más importante de la región y afecta al Sacramento Peak Observatory.

Un modelo mejorado, y más complejo que el presentado por Walker (1973, 1977), es el presentado por Garstang (1986). Este modelo considera el brillo de fondo de cielo provocado por ciudades cercanas al lugar de observación. Su aplicación permite determinar el brillo en un amplio abanico de condiciones, desde el centro de la ciudad hasta zonas alejadas de ésta. El modelo asume que las ciudades emiten un brillo concéntrico y uniforme, asumiendo que éste es proporcional a volumen de población. La dispersión por las moléculas del aire y los aerosoles, a distintas escalas de altura, son también considerados en este modelo. Por otro lado, también tiene en cuenta el albedo del lugar de emisión de la luz, así como la fracción de la luz emitida por encima de un plano horizontal, respecto de la fuente emisora.

Las pruebas empíricas del modelo se realizaron en el espacio geográfico del W de Estados Unidos. El modelo no solo predice el brillo cenital de un lugar, sino también a 45° del zenit, en dirección a la ciudad contaminante. A efectos de obscuridad cenital del cielo, de los lugares investigados en el SW de Estados Unidos, Junípero Serra Peak resultó ser el de mejor comportamiento, con 21.9 mag/Seg arco² en V de Johnson.

El mismo Garstang (1989) introdujo modificaciones a su modelo de 1986. La nueva propuesta para el cálculo de la contaminación lumínica fue aplicada en distintos observatorios de Estados Unidos (Mount Wilson, Monte Palomar, Lick, Kitt-Peak, Sacramento Peak, Mauna Kea, MacDonald, Mount Hopkins, Lowell, Fick, Iowa, Van Vlek y David Dunlap; México (San Pedro Mártir), Chile (Cerro Tololo); Europa (Alta Provenza); y Australia (Anglo Australian Observatory).

Las medidas fueron realizadas al zenit y a distintas alturas sobre el horizonte, considerando diferente azimut en cada caso. Se consideró tanto el V y el B del sistema fotométrico estándar de banda ancha de Johnson.

El modelo considera también el efecto de la curvatura de la Tierra, lo cual es aplicable, en todo caso, a observatorios distantes de las grandes ciudades contaminantes. La propuesta también considera que existen tres factores que afectan a la verdadera iluminación del brillo de fondo cielo nocturno: 1) El scattering provocado por el aire; 2) La existencia de capas de aerosoles; 3) la luz directa de la fuente contaminante. De ellas la luz directa es la más importante, lo cual puede ser dramático en el caso de ciudades a similar altura que el observatorio, y en sectores del cielo que están en la dirección de las ciudades más contaminantes.

Garstang (1991), en un refinamiento final de su modelo de 1989, considera también otros factores, como la presencia de ozono en las capas altas atmosféricas y la variación de densidad del aire con la altitud. Además, se mejoran aspectos como el ángulo de dispersión provocado por los aerosoles. Considerando estos cambios, cada uno de ello lleva a una ligera reducción del brillo de fondo de cielo, respecto al modelo de 1989.

Se consideraron también por Garstang (1991) los efectos temporales de emisiones de polvo volcánico y polvo de desiertos próximos. Para ello se realizaron simulaciones desde el observatorio de Kitt-Peak (Arizona). Se desveló que, si el polvo está presente a menos de 10 Km. de altura se reducía el brillo de fondo de cielo; y que, en cambio, si el mismo está presente a mayor altura, hasta 20 Km., este efecto no aparecía. De hecho, se ha podido demostrar que para episodios de emisión de polvo volcánico, que suele estar a gran altura en la troposfera y en la estratosfera, el brillo de fondo de cielo en el visible (Banda V de Johnson) puede aumentar.

Krisciunas (1997) elabora una base de datos de brillo de fondo de cielo para los filtros V y B en el sistema Johnson. El mismo se elaboró durante un ciclo solar completo (1985-1996), a una altitud de 2800 metros, en la montaña de Mauna Kea (Hawaii). De este estudio se deduce que el brillo de fondo zenital en V varía entre 21.28 y 21.90 mag/seg² de arco a lo largo de un ciclo solar de once años. El color del cielo deducido del B-V se situa en 0.93 mag/seg² de arco, sin tendecias apreciables a lo largo del ciclo

solar. Sin embargo, el "airglow" medido al zenit si varió en un factor 4.5 a lo largo del ciclo de 11 años. Estas variaciones de airglow pueden ser muy rápidas, pues en tan solo unas decenas de minutos estos cambios pueden ser substanciales.

Cinzano et al. (2000) elaboran un potente modelo de cálculo de brillo de fondo de cielo para Europa y otras áreas del mundo. Este modelo tiene una resolución espacial de 1 Km. por píxel, y tiene la capacidad de poder determinar las ubicaciones idóneas para nuevos observatorios astronómicos, así como la probable evolución de su brillo de cielo. El modelo considera cualquier dirección en el cielo y tiene en cuenta la contribución de los pixeles vecinos al del observatorio investigado.

El flujo de luz para constatar el modelo es medido de forma experimental con los satélites militares de EE. UU de la serie "Defense Meteorological Satellite Program" (DMSP). Estos satélites tienen un sistema de barrido por líneas (OLS) conforme avanzan sobre el terreno en sus orbitas polares, a unos 600 Km. de altura.

El estudio sobre Europa se hizo sobre las bandas estándares del sistema Johnson V y B. La calibración con las imágenes del satélite no estuvo exenta de problemas, pues las imágenes de 1996-1997 de los satélites DMSP estaban saturadas en el centro de grandes ciudades.

Los mapas presentados por los autores representaron un enorme avance, para la época del 2000, ya que la contaminación lumínica de los observatorios se había vuelto un asunto preocupante para los astrónomos.

Los cielos realmente más obscuros sobre Europa no alcanzaron en ningún caso el umbral del brillo de fondo natural, pues resultó ser de 21.6 mag /seg² arco en V (cuando en las zonas más obscuras de la Tierra debemos de tener 21.9 mag/seg² arco en V) y de 22.7 mag /seg² arco en el filtro B (cuando deberíamos esperar 22.8 mag/seg² arco). En ambos casos el error probable estimado fue +/- 0.1 mag/seg² arco en el zenit.

Alberts y Duriscoe (2001) desarrollan un modelado de contaminación lumínica a partir de datos de población del censo de 1990 de EE. UU. Tratan de presentar un sistema clasificatorio, en forma tabular, de la calidad del cielo y otros parámetros visuales relativos a los parques naturales y nacionales del país.

El modelo asume que las condiciones quedarían marcadas por la ausencia de Luna, un bajo contenido de aerosoles o partículas industriales. Por tanto, mostraría las mejores condiciones posibles en cada caso. El brillo de fondo de cielo en los lugares más obscuros de estos parques está determinado por el producido cuando luz de las estrellas y el "airglow" atmosférico atraviesa las moléculas de aire, resultando, en gran medida, de la actividad variable durante el ciclo solar de 11 años.

Los autores elaboran tablas de clasificación de calidad general de los parques Naturales de Estados Unidos. Para ello parten de la escala de Schaaf. Ésta es una escala de 0-7, siendo 7 el valor más bajo de iluminación cenital posible en 1990; año en el que se realizaron las medidas. En general, el nivel de iluminación del cielo de los parques del centro y oeste de EE. UU. es bastante bajo. En algunos casos los valores pueden considerarse en el límite de obscuridad natural posible. Con todo, algunos parques de la zona este y noreste están bastante afectados por grandes ciudades próximas. Así sucede en el Parque Nacional de Everglades, en Florida.

Cinzano et al. (2001) presentan el primer atlas mundial de contaminación lumínica, en base al modelo que ellos mismos elaboraron en el año 2000. Dicho modelo está basado en las medidas derivadas de la radiación observada por los satélites DMSP. Estos registros hubieron de ser calibrados, habida cuenta de las variaciones de ganancia observadas entre distintos años de su funcionamiento.

Entre los distintos efectos causados por la contaminación lumínica, se observa una creciente dinámica de la humanidad a envolverse en una especie de niebla luminosa que se propaga a gran distancia. De acuerdo con el Atlas de densidad de población del Departamento de Energía de Estados Unidos, alrededor del 66% de la población mundial, y del 99% en el caso de la población de Estados Unidos, vive ya en cielos que podemos considerar contaminados por la luz artificial. Así, por ejemplo, un 20% de los habitantes de todo el mundo han perdido la visión habitual de la Vía Láctea desde sus residencias; este valor asciende a un 66% en Estados Unidos y a más del 50% en Europa. Además, muchos de estos habitantes, que viven en áreas polucionadas lumínicamente, no consiguen nunca una adaptación completa a la visión en la obscuridad (visión escotópica), debido al ambiente siempre altamente luminoso donde habitan. Entre los países que, curiosamente, están menos iluminados en todo el planeta, al menos por iluminación exterior de las ciudades, figura Corea del Norte, en claro contraste con Corea del Sur.

Slanger et al. (2003) encuentran que el cielo del Observatorio Lick, en California, está muy contaminado por el efecto de la combinación de fuentes emisoras de diverso tipo, especialmente de aquéllas que emanan desde la cercana ciudad de San José. Aparecen al menos 177 líneas identificadas con diversos gases y metales usados en distintos tipos de luminarias.

Taylor et al. (2004) presentan las medidas de contaminación lumínica de Mount Graham (Arizona). Las medidas fueron efectuadas desde el Telescopio Vaticano (VATT) durante los años 1999-2003. El cielo mostró ser significativamente obscuro durante los periodos considerados fotométricos. Las medidas fueron hechas cerca del zenit. Los promedios encontrados en mag/seg² arco fueron de 22.00, 22.53, 21.49 y 20.88 en U, B, V, y R. Las registros de mayor obscuridad se encontraron en febrero del 2000, con 22.38, 22.86, 21.72 y 21.19 mag/seg² arco en U, B, V, y R. Los valores más bajos se correspondieron con el mínimo de actividad solar. En este contexto se puede considerar a Mount Graham (Arizona, E.E.U.U.), un lugar bastante competitivo en cuanto a brillo de fondo de cielo, comparable a los sitios de Mauna Kea, en Hawaii, y la zona norte de Chile (desierto de Atacama).

Para Sánchez et al. (2007) el espectro del cielo sobre el observatorio astronómico de Calar Alto mostró también que la contaminación lumínica es notable, con incremento de brillo debido a lámparas de mercurio y otras, de la iluminación viaria de ciudades, con gran presencia de lámparas de sodio de alta presión. En concreto se encontraron incrementos de 0.09, 0.16 y 0.10 en los filtros estándar del B, V y R.

En cuanto a la potencia de la contaminación por sodio de alta presión, el observatorio no cumple con las recomendaciones de cielo obscuro propuesta por la International Astronómical Union (IAU), ya que es algo más brillante de lo ideal. Se pudo determinar, sin embargo, que, en general, el cielo es bastante obscuro hasta la banda infrarroja I, y que el brillo, reducido al zenit y sin Luna, fue del orden de 22.39, 22.86, 22.01 21.36 y 19.25 mag/seg² arco, en los filtros U, B, V, R e I.

Duriscoe et al. (2007) describen un sistema para evaluar rápidamente el brillo de fondo de cielo sobre toda la bóveda celeste. El sistema va montado sobre una montura astronómica robotizada, una óptica de gran campo y una cámara Charge Coupled Device (CCD) de gran formato.

El software desarrollado para este propósito junta todas las imágenes durante un barrido completo del cielo. A través de la evaluación del brillo de las estrellas estándares, en el campo de visión, reconstruye el brillo de fondo cielo en la V banda de Johnson, en mag/seg.²arco., en cualquier punto del mismo. Este sistema es de gran utilidad en lugares relativamente contaminados por la luz. Este sistema también está siendo útil para determinar el brillo de fondo de cielo para el Servicio de Parques Naturales y Nacionales de Estados Unidos. Adicionalmente, este procedimiento permite una primera caracterización espectroscópica de muchos de los observatorios astronómicos en uso, determinando la calidad intrínseca de su cielo, además, con rapidez y con poco esfuerzo.

Zhang et al. (2008) utilizan la contaminación lumínica para estudiar la distribución y el espesor óptico de los aerosoles durante la noche, efecto poco conocido. Se centraron en áreas de fuerte contaminación industrial, como el sureste asiático y la India. Para este fin se estudiaron las imágenes nocturnas de los satélites DMSP de defensa del Estados Unidos.

Aunque estos satélites no tienen los detectores OLS (de escaneado por líneas) verdaderamente calibrados y de manera absoluta, sí es posible estudiar el espesor de la capa de aerosoles sobre regiones muy contaminadas en un régimen nocturno. La
imagen del este de China se mostró particularmente dramática, debido a la alta contaminación industrial.

Holland (2009) ofrece una visión asequible para el gran público sobre el problema asociado a la contaminación lumínica. En su exposición trata los más diversos tópicos relacionados con este tipo de contaminación, y otros de similar gravedad, como son la contaminación industrial y la contaminación acústica, por citar los más llamativos.

Este autor además se hace eco de la dificultad para que la legislación medioambiental considere la contaminación lumínica. Algo similar ocurrió en décadas pasadas con respecto a la contaminación por pesticidas o gases de efecto invernadero.

Así, el problema de la contaminación lumínica no pareció adquirir relevancia hasta los años 50-60 del siglo XX, cuando se comprobó que los niveles de iluminación artificial empezaban a invadir los entornos naturales más valiosos y, por extensión, la de los observatorios astronómicos de mayor relevancia. En los países industrializados el problema ya no solo afecta al medio ambiente, sino también a la salud de las personas, con probada incidencia en los ritmos circadianos de los humanos y animales. Un efecto que produce inquietud y falta de sueño, entre otros efectos negativos.

Luginbuhl et al. (2009) realizaron un estudio panorámico del cielo en el Observatorio Naval de EE.UU (USNO), cerca de Flagstaff (Arizona). Se encontró un brillo de fondo de cielo algo menor que el previsto por los distintos modelos anteriores, de Luginbuhl y Garstang (1991). Los autores indican que esta discrepancia del modelo y la realidad pueden deberse a los efectos derivados del apantallado (por la vegetación, edificios u otras causas) de las iluminaciones exteriores de Flagstaff. Debido a esto los autores proponen una modificación de su modelo, con la finalidad de considerar la altura del ángulo de emisión de las fuentes de la ciudad contaminante.

El trabajo de Pun y Jo (2012) ilustra la magnitud de la contaminación lumínica sobre una gran urbe asiática, en este caso Hong-Kong. Las medidas fueron efectuadas para 197 puntos desde la ciudad y la zona suburbana de la misma. En total consideró 18 distritos distintos. La campaña duró 15 meses. El instrumento utilizado fue el versátil, sencillo y económico Sky Quality Meter (SQM), con el que se obtuvieron datos próximos al filtro V de Johnson.

El estudio mostró que el nivel de contaminación lumínica en la ciudad es muy importante, con ~15 mag/seg² de arco al cenit en el visible. Estos valores demuestran una intensidad de brillo 100 veces superior a las de los entornos rurales próximos. En los lugares más contaminados del centro de la ciudad el cielo mostró 13.2 mag/seg² de arco. Los factores humanos, y la alta industrialización, parecen ser los responsables de esta situación. Las dos horas de mayor brillo coinciden con las primeras horas de la noche, entre las 9:30 y 11:30. Se intuye que el alto nivel de aerosoles y contaminantes

en la atmósfera son una de las causas importantes para explicar los altos valores de contaminación. Con todo, en este estudio no se determinó en qué cuantía participan.

Además, este estudio pretende ser una base de datos a considerar en la elaboración de una normativa municipal en Hong-Kong.

Cinzano y Falchi (2013) discuten los pormenores de los modelos computacionales de cálculo de brillo de fondo de cielo a partir de distintas aproximaciones, partiendo de los modelos iniciales de Garstang (1989, 1991). Concluyen en que es suficiente un modelo de trasmisión radiativa de la luz a través de la atmósfera que contenga solo dos modos de dispersión.

Se utilizaron varias series de imágenes de satélites, con instrumental DMSP/OLS. El modelo también considera la reducción de brillo con la altitud y la presencia aerosoles a distintas alturas. El modelo permite calcular, para cualquier longitud, latitud y altitud, el brillo de fondo de cielo, en cualquier longitud de onda de la luz, y en cualquier momento. El modelo ha sido denominado EGM o modelo extendido de Garstang. Constituye la propuesta más completa, disponible hasta la fecha. En general, muestra un buen acuerdo con el modelo de atmósfera estándar de Estados Unidos (US62), que considera la emisión de luz hacia arriba en condiciones meteorológicas típicas.

Moore et al. (2013) realizaron un estudio sobre el estado del cielo nocturno en los parques naturales de Estados Unidos. Los autores tratan de determinar como esta cualidad afecta en el disfrute de estos espacios naturales. Consideran aspectos vinculados con la actividad astronómica, el estado de los animales y plantas, los valores estéticos y culturales, entre otros. Consideran parámetros como la iluminación horizontal, la máxima iluminación vertical, las características espectrales de dicha iluminación, el impacto en las especies autóctonas, etc. Los autores proponen una clasificación simple, en base a tres categorías, en función de la pérdida de valores intrínsecos del parque.

Nosotros entendemos que algo similar debiera considerarse en España para la red de Parques Nacionales, Parques Naturales y otras reservas importantes. En este sentido, si bien es cierto que cuentan con importantes medidas de protección, la contaminación por luz artificial del cielo nocturno de estos enclaves no está específicamente considerada, ni menos aún desarrollada.

Elvidge et al. (2013) describen las características del nuevo instrumento Visible infrared Imaging Radiometer (VIIRS), a bordo del satélite Suomi de la NASA y del NOAA de EE. UU. El instrumento ha significado un gran avance respecto a los anteriores sensores de escaneado de línea (OLS) del ejército de Estados Unidos. Entre otras características mejoradas están la resolución espacial, el umbral de detección mínimo y la no saturación de las fuentes intensas. A este respecto, cabe subrayar la mejora de la resolución espacial introducida por el VIIRS-SUOMI respecto de la visión nocturna del OLS, instalados en los satélites DMSP. De 5 Km/píxel del DMSP se pasó a los 742 metros en el VIIRS-SUOMI. Además, entre las mejoras introducidas conviene traer a colación las siguientes: 1) El nivel de saturación del VIIRS es más flexible (mayor rango dinámico); 2) Las características espectrales están muy extendidas en el caso del VIIRS; y 3), el nivel de detección mínimo es mejor en el caso de VIIRS. Estas mejoras se produjeron a pesar de continuar con una órbita polar de 870 Km altura y un escaneo de la superficie con líneas de 3000 km. de longitud. Además, la hora de paso nocturna es más adecuada, para estudios de contaminación lumínica, en el caso de VIIRS, ya que pasa poco después de medianoche (01:30), mientras que DMSP pasa a una hora temprana de la noche (19:30), con posible efecto, en algunos casos, de luz del atardecer.

La contribución neta de la contaminación lumínica de origen antropogénico es descrita por Duriscoe (2013). Según el autor es preciso conocer, aproximadamente, cual es la contribución del brillo de fondo de cielo natural, causada por el "airglow", la dispersión molecular del aire y los fenómenos de tipo fijo, como la luz zodiacal. Todo ello con objeto de poder restar la contribución natural de la artificial, especialmente cerca de observatorios astronómicos y parques naturales. El modelo contempla, además, el fenómeno de extinción atmosférica, la altura del lugar y la presencia de aerosoles.

Debido a que el carácter del airglow es muy variable, desde minutos a años, en sus distintos ciclos, es por lo que siempre hay que conceder al modelo de predicción de brillo de fondo de cielo propuesto por Duriscoe una indeterminación de un 25% (0.1 mag/seg² arco). Este margen de error puede considerarse moderadamente aceptable, teniendo en cuenta de que trata de determinar, para un fenómeno en el que concurren muchas variables al mismo tiempo, la cantidad de brillo a través de un modelo matemático.

Un año después, Duriscoe et al. (2014) seleccionan 5 ciudades del SW de Estados Unidos para analizar las prácticas de iluminación exterior, y su impacto en el brillo de fondo de cielo, en un radio de 8 a 67 Km. Los datos e imágenes, para la noche, provienen del satélite SUOMI-NPP, operativo desde 2011. Las mediciones del brillo se obtuvieron tanto a partir del satélite, a través del modelo de igualación, como también a partir de la iluminación del cielo desde el suelo.

Los resultados permiten avanzar que, a partir de un óptimo apantallado de las luminarias de las ciudades se podría reducir la intensidad de brillo del cielo entre un 4288%. En tal caso, las ordenanzas municipales, en este aspecto, deben ser más restrictivas.

Cao y Bai (2014) presentaron un extenso trabajo a modo de "calibración del Sistema" para el sensor VIIRS-DNB del satélite SUOMI. Tratando cuantitativamente los puntos de luz vistos por el sensor, en su vuelo orbital nocturno, alrededor de la Tierra. El objetivo fue determinar la potencia de las luminarias que conforman cada punto de luz y su seguimiento temporal.

El sistema VIIRS-DNB permite la detección de niveles muy bajos de luz de los puntos investigados, así como una excelente resolución espacial (750 m), respecto a lo disponible en años anteriores a 2011. Estos umbrales deben permitir monitorizar, con bastante precisión, el nivel y la evolución la luz exterior emitida hacia el cielo por las actividades humanas. Se estima que la indeterminación de los valores de brillo puede ser del 15%, y su estabilidad a largo plazo es aún desconocida.

Este trabajo se vale de una serie de experimentos novedosos, relativos a la consideración de la potencia de las instalaciones de alumbrado, a partir de medidas en tierra. También se consideraron las condiciones meteorológicas y los aerosoles presentes en cada experimento. Este sistema basado en VIIRS-DNB es sin duda una potente herramienta para monitorizar la luz parásita del cielo, y una oportunidad para avanzar en la protección medioambiental de los espacios naturales y de los lugares reservados a importantes instalaciones científicas.

La iluminación LEDS es otra nueva fuente de contaminación lumínica. Luginbuhl et al. (2014) se hacen eco de la creciente presencia de la luz que proviene de la nueva fuente de iluminación exterior a base de LED´S de distintos tipos, algunas muy perjudiciales en el visible y en el azul.

Bajo condiciones de visión escotópica (adaptada a la obscuridad), las emisiones de color blanco, que tienen un alto porcentaje de energía en la parte azul del espectro, tienden a producir una sensación de claridad enorme, respecto a iluminaciones basadas en el sodio de alta presión, común en autovías, carreteras y avenidas.

Aunque con la distancia a la fuente emisora el brillo de fondo de cielo decrece más rápidamente en el azul que en el amarillo, el efecto contaminante sigue siendo grave aún a grandes distancias (300Km.). Por ello, el brillo de los LED´S blancos supera al amarillo del sodio a esas distancias. Mucho más aún en las cercanías de las grandes ciudades, considerando que ambos emisores tienen los mismos lúmenes de potencia emisora (Lumen/Lumen).

Bará (2016) describe la red de sensores de calidad del cielo nocturno, tipo SQM, y desplegada en Galicia (España). Estas estaciones están operadas conjuntamente con la del Servicio Regional de Meteorología de Galicia. Los sensores SQM toman un

registro del brillo de cielo cenital cada 60 segundos, y están integrados en red, y disponibles para los investigadores que deseen hacer uso de los datos.

Las medidas permiten evaluar hasta qué punto el incremento del brillo del cielo nocturno está afectando a la comunidad de Galicia. Se dedujo que en las principales ciudades gallegas el incremento del brillo cielo es del 14-23 veces respecto a los lugares más obscuros de la comunidad. Aún en sitios denominados "periurbanos" el brillo es del orden de 0.8-1.6 veces mayor que en entornos naturales no perturbados. Además, se observó que la presencia de nubes tiende a reforzar el brillo de fondo del cielo, sobre todo cerca de las ciudades.

Se detectó en este estudio que Cabeza de Manzaneda (1758 m.) es el sitio de montaña menos afectado por la contaminación lumínica. El brillo zenital en V detectado aquí fue de 21.7 mag./seg.² arco, cerca de los limites naturales.

Una interesante exposición de este trabajo son sus "densitogramas" de brillo de fondo de cielo cenital. Los mismos aparecen para cada una de las estaciones de registro, a modo de nube de puntos, indicando de forma visual la calidad relativa del cielo para las horas nocturnas.

Netzel & Netzel (2016) estudian el brillo de fondo de cielo sobre Polonia. Para ello mejoraron el modelo de Berry (1976). Ciertamente, la actualización del mismo permitía considerar tanto a las ciudades como a cualquier otra parte de la superficie terrestre como emisores de luz. Las mejoras se relacionan también con el uso de una matriz de datos de alta resolución (píxeles de 100 metros de lado); y la adopción de un modelo simple, que permite, junto con la alta resolución de sus datos, su fácil y útil aplicación en planificación urbana y evaluación medioambiental.

En 2016 Duriscoe nos muestra cómo usar cámaras CCD, equipadas con lentes de "ojo de pez". Con las mismas podemos obtener imágenes de brillo de fondo de cielo, para medir la incidencia de luz parasita provocada por el hombre.

El análisis de estas imágenes nos ofrece indicadores importantes de la gravedad o estado del fenómeno, siendo posible derivar imágenes gráficas y mapas de las siguientes características:

- Brillo Cenital
- Brillo promedio del cielo
- Mediana del brillo cielo
- El cielo más obscuro y el más brillante.

En el trabajo se utilizaron 406 conjuntos de imagen, calibrándose en la banda V de Johnson (estándar fotométrico astronómico).

El autor considera que el brillo de fondo de cielo promedio de un lugar constituye la mejor indicación de su calidad de cielo. Entiende que esta medida es la menos proclive a malas interpretaciones y ambigüedades. Se refiere a la problemática que ofrecen, por ejemplo, los estudios que consideran los brillos cenitales. Mills y Miller (2016) encuentran que la toma de imagines del VIIRS-NDB está afectada por algunos problemas de calibración, que afectan al nivel de las líneas de barrido del instrumento, y que aparecen como un bandeado, causado, quizá, por luz directa, el desplazamiento de carga en el detector, u otras causas mecánicas del espejo de barrido, que hacen perder la linealidad instrumental. El efecto es más pronunciado en presencia de luz del amanecer o anochecer en las correspondientes escenas.

Para corregir este efecto los autores desarrollan un software específico, que no solo trata de resolver este problema sino otros debidos a anomalías derivadas del albedo polar y ondas de gravedad detectadas en la atmósfera (oscilaciones rápidas de brillo, a modo de ondas, sobre la escena). Fenómeno éste poco entendido, que está recibiendo bastante atención por parte de físicos de la atmósfera.

Un trabajo revolucionario es el de Falchi et al. (2016), titulado "Nuevo Atlas mundial de Contaminación Lumínica". En la figura 73 podemos ver una perspectiva universal del material contenido en el artículo.



Figura 73. El fenómeno de la contaminación lumínica a escala planetaria según "The new world atlas of artificial night sky brightness"

Fuente: Falchi et al. (2016).

En la figura 74 se muestra el ejemplo de la imagen anterior para el caso de Europa, para la banda V (Visible). Los cielos muy obscuros, con valores de polución luminosa inferiores al 1% del brillo de fondo natural aparecen en negro. Entre el 1% y el 8% el cielo solo estaría degradado en el horizonte (color azul). Desde el 8% al 50% cielo algo degradado, incluso en el zenit (tonos verdes). Valores superiores al 50%, representan cielos con pérdida de visión grave sobre la Vía Láctea (tonos amarillos);

aparecen cielos con una pérdida muy importante de la visión de las estrellas (rojo) y también el deslumbramiento casi total para ver alguna estrella (blanco). Someramente, podemos traducir, del citado trabajo, que un habitante de Centroeuropa tendría que viajar hasta la periferia más septentrional u oriental del continente Europeo o el Norte de África para ver aceptablemente la Vía Láctea; esto es, miles de kilómetros. Este hecho parece que inhabilita a la Europa continental en los nuevos retos de la exigente observación astronómica.



Figura 74. Region de Europa según "The new world atlas of artificial night sky brightness"

Fuente: Falchi et al. (2016).

4.2 El modelo de Falchi

El gráfico polar (Figura 75) muestra como generar el brillo de fondo de la iluminación urbana a partir de tres distribuciones de luz: esto es, atendiendo al modelo de Falchi et al. (2016). En azul se muestra una distribución puramente lambertiana o ideal de un difusor (no especular). Aparece una función a bajos ángulos de emisión, máxima sobre el horizonte (en color verde), y una función con ángulos máximos de emisión en torno a los 30º elevación (en color amarillo). Las tres funciones integradas (aparecen en rojo) generan el cómputo de valores de intensidad o radiancia al Zenit del Mapa Universal de brillo de fondo de Cielo.

Figura 75. Función del modelo de emisión de iluminación exterior urbana, dirigida hacia el cielo, usada para generar el mapa de brillo de fondo de cielo para 2015. Esta figura es en realidad una abstracción planimétrica de un corte del modelo tridimensional



Fuente: Falchi et al. (2016).

Elvidge et al. (2017) trabajan con una amplia muestra de datos e imágenes del VIIRS-NDB. Su modelo para medir la luz artificial de origen antrópico es muy ventajoso frente a los anteriores.

Los datos e imágenes procesados de VIIRS-DNB pueden rendir resúmenes diarios, semanales o mensuales sobre la situación de la luz artificial para la medianoche. Esta información se ofrece con niveles de detección muy bajos, con alta resolución espacial y con un amplio espectro radiométrico. Además, ofrecen la posibilidad de proporcionar cantidades cuantitativas del fenómeno merced a los esfuerzos de calibración y filtrado post-proceso del sensor utilizado (embarcado en satélites de defensa norteamericanos, concretamente los que responden al acrónimo DNSP). Se

hace una verdadera criba de todos los ruidos perturbadores del fenómeno neto de la emisión humana de luz al espacio. En esencia, se trata de determinar aquellas fuentes que son permanentes o estables frente de las esporádicas y de las meramente naturales.

Este tipo de imágenes y datos son de un alto valor para planificadores del territorio, ambientalistas, biólogos, astrónomos y autoridades competentes en la elaboración de leyes y aplicación de normas referentes. Incluso pueden ser útiles para científicos sociales.

Hänel et al. (2018), en un artículo bastante didáctico, nos muestran como medir el brillo de fondo de cielo desde los observatorios astronómicos se ha convertido en una tarea rutinaria, ante el continuo incremento de la emisión de luz hacia la atmósfera.

Los autores describen brevemente las técnicas de medición más usuales, señalando sus virtudes y sus debilidades. Discuten los resultados obtenidos y proponen sistematizar los sistemas de medición, calibración e interpretación de los datos. Con las actuales cámaras de video y cámaras CCD, con amplio campo, es posible estudiar todo el cielo en minutos, en las bandas usuales de sistema Johnson: B, V y R. Es importante, señalan, que el estudio contemple estos componentes espectrales, a fin de determinar la creciente emisión de luz blanca procedente de las lámparas LED´s.

También señalan la utilidad de usar, sobre vehículos motorizados, sistemas basados en el clásico SQM. De esta forma se puede cubrir un gran trayecto longitudinal o espacial en una sola noche. No obstante, estos SQM móviles han de ser calibrados periódicamente a partir de medidas realizadas con luxómetros calibrados, instrumental muy usado en la industria de la iluminación.

Duriscoe et al. (2018) nos presentan un modelo simplificado para el cálculo de brillo de cielo nocturno. El mismo se realiza a partir de las observaciones del satélite Suomi, concretamente a partir de la información recopilada por la plataforma VIIRS-NDB. Para el análisis espacial se utilizan programas de información geográfica (GIS), como ARGIS y ESRI, trabajando con archivos en formato ráster.

El modelo analítico predice el brillo de cielo hemisférico, siempre en referencia a su brillo de fondo natural, suponiendo que no hay Luna y que no existe perturbación de luz solar u otras de tipo meteorológico (p.ej. aerosoles). El modelo consideró como referencia al de Garstang (1989-1991), que usa, como base, el cálculo de la transferencia radiativa de la luz a través de la Atmósfera. El modelo, además, fue calibrado en base a medidas reales realizadas sobre el terreno. Éstas se realizaron con fotómetros calibrados, en el sistema estándar de Johnson U, B, V y R., utilizando como referencia el brillo de la banda V, centrada en el visible de la visión humana. Finalmente,

se encontró una excelente correlación entre estos datos de calibración y los del modelo obtenido a partir de la plataforma VIIRS-NDB.

Consecuentemente, se pudieron generar mapas temáticos del fenómeno de la contaminación lumínica sobre amplias zonas de la Tierra; todo ello con medios de computación modestos. Aunque con sus limitaciones, se puede indicar que esta es una excelente herramienta para científicos y planificadores medioambientales, así como para los gestores de espacios naturales.

Siguiendo a Sánchez de Miguel et al. (2019), podemos ver como los sensores a bordo de satélites proveen de herramientas e imágenes muy útiles para la evaluación del impacto ambiental de la luz nocturna artificial. No obstante, estos sensores, debido a su carácter pancromático, presentan limitaciones, concretamente los datos de VIIRS-DNB y DMSP/OLS. Por ello, hasta que no se disponga de nuevas plataformas satelitales, quizá la mejor opción sea utilizar cámaras de tipo DSLR a bordo de la Estación Espacial Internacional (ISS), globos de gran altitud o aviones. Estas estaciones pueden aportar datos con verdaderas calibraciones de color, que permitan estimar las variaciones espacio temporales de la contaminación lumínica, con vistas a una planificación del territorio.

Los autores describen un método de análisis teórico basado en un diagrama de color para analizar las imágenes tomadas a bordo de la ISS. Para una completa prueba del modelo los autores utilizaron como laboratorio la ciudad de Milán, en el norte de Italia.

Esta información puede ser usada para determinar algunos efectos clave, como la visión fotópica, o adaptada a la luz diurna, el efecto sobre la melatonina y la supresión del sueño, el índice de producción de la fotosíntesis, la eficiencia energética y las emisiones de CO₂ y la temperatura de color correlacionada.

Un artículo que ha suscitado revuelo entre los responsables de grandes observatorios astronómicos ha sido el estudio de Fabio Falchi et al. (2023). En él se describe, mediante modelos las radiancias observables, el brillo de fondo de cielo cenital a 30° zenit, a 60° zenit y en el horizonte. Utilizaron como fuente de adquisición de dato obtenidos a partir de la plataforma satelital VIIRS, para un conjunto de 28 observatorios de gran entidad, repartidos por todo el mundo. Según sus resultados, los casos de los observatorios españoles de la Isla de la Palma y Calar Alto no resultan especialmente favorecidos, aunque, para condiciones ideales, mantienen unos niveles aceptables para observatorios y a sobrepasan el 10% de intensidad luminosa en el conjunto de características de contaminación lumínica, respecto a un cielo teóricamente

incontaminado. Por ello, urgen a tomar cuantas medidas técnicas y legislativas, para asegurar la viabilidad científica de estos observatorios durante las próximas décadas.

4.2.1. Aspectos sociológicos, económicos y legislativos sobre contaminación Lumínica

En cualquier tipo de contaminación es necesario conocer su magnitud. La misma empezó a ser llamativa a partir de la introducción masiva de fuentes de iluminación pública y el desarrollo industrial. Sin embargo, el verdadero detonante de la contaminación lumínica está seguramente relacionado con la explosión demográfica y el acceso a la energía eléctrica, que lleva la luz a las calles de los núcleos población.

"En la actualidad, la población mundial se ha doblado respecto a los años 50. El crecimiento de la población urbana y, por ello, la cantidad de luz inyectada en la atmósfera ha aumentado dramáticamente, en un factor mucho mayor que el mero crecimiento demográfico" (Sánchez, 2015).

"Al mismo tiempo, en los últimos años se ha producido una serie de saltos en tecnología de iluminación. Así, se han multiplicado, por varios órdenes de magnitud, las posibilidades de emitir luz desde las nuevas lámparas de LED. Más de siglo y medio de evolución tecnológica" (Sánchez, 2015).

"Recientemente, los mayores esfuerzos en reducción de la contaminación lumínica surgen del intento de paliar el tremendo gasto en alumbrado público. Éste asciende a más de 6.300 millones de euros anuales en Europa. Como consecuencia, las autoridades se están tomando en serio las medidas de control del gasto en alumbrado público" (Sánchez, 2015).

Por ello, en los últimos años se han tomado diversas iniciativas legislativas. Las primeras para prevenir el efecto de la contaminación lumínica sobre los observatorios astronómicos. Como la pionera ley del cielo de Canarias (BOE (Ley 31/1988) y el Real Decreto 243/1992 sobre protección de la calidad astronómica de los observatorios del Instituto Astrofísica de Canarias. Más recientemente se aprobó en Andalucía el Decreto 357/2010 sobre protección de la calidad de los cielos nocturnos y medidas de ahorro y eficiencia energética. Con todo, esta última ha sido derogada por la Junta de Andalucía.

"Sin embargo, hasta el momento la única ley de ámbito estatal española es el R.D. 1890/2008, de14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus instrucciones técnicas complementarias (EA-01 a EA-07)" (Sánchez, 2015).

"Por otro lado, la comisión 50, sección B, de la Unión Astronómica Internacional (IAU), se encarga de la protección de los observatorios existentes y potenciales. Sin

embargo, sin medidas prácticas es imposible garantizar la protección de los mismos. Además, el cielo no solo debe ser preservado para los astrónomos, sino como derecho de toda la humanidad, como marca la "Declaración Starlight" (Sánchez, 2015).

Zamorano et al. (2015), en una presentación en la XXIX Asamblea de la IAU, exponen el estado de las investigaciones llevadas a cabo por los investigadores de la Universidad Complutense de Madrid y otras instituciones españolas. Los autores muestran el estado de desarrollo de varias plataformas informáticas con programas dedicados al control y monitoreo de medidores de brillo cielo, tipo SQM y TESS. Es España, estos sensores están desplegados en una red de alcance nacional y, además, colaboran con otras estaciones a nivel internacional, en el seno del proyecto europeo STARS4ALL, donde se diseñaron y construyeron los fotómetros TESS-W. Éstos registran la intensidad del brillo de cielo nocturno. Los mismos fueron repartidos a asociaciones e investigadores, aunque también a personas preocupadas por el control de la contaminación lumínica. Los fotómetros se instalaron en estaciones de monitoreo, y comparten los datos en abierto (Open Data), a través de su sistema, denominado Internet of Things (IoT). Los datos de TESS-W incluyen una estimación de nubosidad deducidos de las diferencias de temperatura del cielo obtenida por un sensor IR y de la temperatura ambiente. Más información aparece en Zamorano et al. (2016).

La Fundación STARS4ALL, surgida al finalizar el proyecto, está fabricando y vendiendo fotómetros TESS-W, para aumentar la red de monitorización. Además desarrolla otros modelos para muestreos del brillo de cielo en medidas de campo y en medidas de todo el cielo.

Algunas organizaciones y proyectos están solicitando decenas de fotómetros para establecer redes de monitoreo, con vistas a la investigación y a la solicitud de certificación de cielo oscuro (Starlight e IDA). Los fotómetros son calibrados en el Laboratorio de Instrumentación Científica Astronómica (LICA) en la UCM, de forma que sus medidas pueden ser comparadas entre sí. Lo más importante es que, por primera vez, se dispone de un fotómetro con calibración absoluta: Absolute Radiometric Calibration of TESS-W y SQM Night Sky Brightness Sensors (Bará, Tapia y Zamorano, 2019).

En un estudio socioeconómico sobre la emisión de luz artificial, Falchi et al. (2019) relacionan el Producto Interior Bruto (PIB) y la Renta Per Cápita de diferentes regiones de Estados Unidos y Europa con la emisión en forma de luz parasitaria. Los autores encuentran enormes diferencias en su distribución espacial, a pesar de que existen indicadores socioeconómicos similares. Como ejemplo, no se entiende bien como EE. UU tiene una emisión tres veces superior de media respecto a Europa, si consideramos la renta per cápita como indicador.

241

En el caso europeo, según los valores de renta per cápita, Portugal emite una cantidad de energía cuatro veces superior a la de Alemania. España e Italia también presentan, proporcionalmente, mayores emisiones que Alemania. Por tanto, se puede deducir que Alemania está más pobremente iluminada o mantiene una racionalidad mayor.

Respecto a la racionalidad del gasto en iluminación exterior, el trabajo de Falchi podemos considerarlo como una base actualizada de cara a futuras planificaciones de tipo regional o estatal.

Finalmente, Falchi et al. (2023) señalan como la contaminación lumínica sobre los observatorios astronómicos es muy importante de cara a mantener su rendimiento científico. Los autores utilizan un modelo denominado Garstang-Cinzano. Éste considera los datos de radiancia del instrumento satelital VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite). Comparan las características de contaminación lumínica sobre todo el cielo en 28 observatorios de gran relevancia. Los resultados parecen mostrar que, al menos, dos tercios de estos observatorios ya tienen un incremento de luminosidad mayor a lo que recomienda la Unión Astronómica Internacional (IAU), cifrado en torno a un 10% superior. Adicionalmente, dicen que también debe mostrarse atención a los efectos nocivos de la contaminación lumínica en los animales y en los ciclos vitales de los seres humanos.

5 RESULTADOS

5.1 CONDICIONES ZONALES DE OBSERVATORIOS RELEVANTES: EL CASO DEL SW DE EE. UU.

En la figura 76 se muestran los observatorios más importantes del SW de Estados Unidos. Los números indican el valor de la isolínea de intensidad de la iluminación parásita sobre el fondo natural. El caso más desfavorable lo tenemos en Monte Palomar (California), donde la intensa iluminación de Los Ángeles, y otras grandes ciudades, afectan gravemente al cielo del observatorio. Kitt-Peak, en Arizona, está bastante afectado por las ciudades de Phoenix, al norte, y Tucson, al este. Monte Graham está relativamente lejos de grandes ciudades, lo mismo que Sunspot, en Nuevo México, con una gran ciudad al sur, El Paso. El caso más favorable es el del observatorio mexicano de S. Pedro Mártir, en Baja California, con un cielo cenital que apenas tiene una milésima de magnitud más que lo considerado como cielo natural en el modelo de Falchi et al. (2016).

Figura 76. Un recorte del mapa de Falchi et al (2016), retocado por nosotros con QGIs, mostrando la situación de contaminación lumínica cenital (el caso más favorable posible). La región considerada abarca buena parte del W de EE.UU y N de México



Fuente: Falchi et al. (2016). Elaboración propia.

5.2 EL NORTE DE CHILE-ARGENTINA

En la figura 77 se indican los incrementos de brillo, en magnitudes al zenit, en escala de color, para el caso del norte de Chile y Argentina. Los datos han sido derivados del "New World Atlas of Night Sky" de Falchi et al (2016). La escala de color no está igualada a la de los restantes mapas, pues, en este caso, se han forzado al máximo los niveles mínimos de contaminación lumínica.



Figura 77. Imagen de brillo de fondo de cielo sobre el norte de Chile y Argentina

Fuente: Falchi et al. (2016). Elaboración propia.

Los Observatorios de Paranal (VLT), Armazones (ELT) y Chajnantor (Alma) están bastante libres de contaminación lumínica. Solo algunas ciudades, al norte de los mismos y bastantes explotaciones mineras, podrían suponer un leve incremento del brillo de fondo natural. Más al sur, Las Campanas y La Silla, mantienen un cielo bastante aceptable, con incrementos menores de una centésima de magnitud/seg² arco. Más al sur, aún en el observatorio de Cerro Tololo, se aprecian peores perspectivas, por la cercanía de ciudades medias, aunque el cielo cenital se mantiene cercano a la centésima de magnitud de incremento. Aquí las observaciones en ángulos bajos, en dirección W, pueden mostrar ya signos preocupantes, de cara al próximo futuro, si la expansión lumínica continúa sin freno.

5.3 EL TIBET ENTRE INDIA Y CHINA

En la figura 78 se muestran los incrementos de brillo en magnitudes al cenit (ver escala color de la derecha) para el caso del Tíbet. Éstas han sido derivadas del "New World Atlas of Night Sky" de Falchi et al (2016). La escala de color no está igualada a la de los restantes mapas, pues en este caso se han forzado al máximo los niveles mínimos de contaminación lumínica.

Podemos observar que la contaminación lumínica en esta área es inexistente. Incluso el observatorio chino de Ali tendría un incremento inferior a 0.01 mag. /Seg²arco. Las grandes aglomeraciones del norte de la India están a más de 300 km. al SW de ambos observatorios. En esta área no es previsible un deterioro del cielo por contaminación lumínica al menos durante décadas.



Figura 78. Imagen de brillo de fondo de cielo sobre la meseta del Tíbet entre India y China

Fuente: Falchi et al. (2016). Elaboración propia.

5.4 LA PENÍNSULA IBÉRICA

En la figura 79 aparece el conjunto de la península Ibérica. Los mismos también han sido derivados del "New World Atlas of Night Sky" de Falchi et al (2016). Solo las regiones de la llamada España vaciada parecen librarse de este tipo de contaminación.



Figura 79. Imagen de brillo de fondo de cielo sobre la península Ibérica

Fuente: Falchi et al. (2016). Elaboración propia.

5.5 EL BRILLO DE CIELO NOCTURNO SOBRE ANDALUCÍA

Para visualizar en un mapa el brillo de cielo nocturno sobre Andalucía sobre la noche hemos realizado una composición modelizada a partir del New World Atlas of Night de Falchi et al. (2016).

Como puede observarse en la figura 80, la menor incidencia de la contaminación lumínica se aprecia en áreas de montaña; en amplias zonas del este y en el norte de la comunidad autónoma.

El rango de valores de la imagen de Andalucía se ha ajustado entre 0 y 4. Los umbrales del rango van desde un intervalo de incremento de brillo de fondo de cielo en el visible de 0.2 mag/seg² arco (en tonos azules) a niveles de brillo de 4 mag/seg² arco sobre el fondo natural (en tonos rojos). Estos últimos se corresponden a núcleos de grandes ciudades con elevada densidad de población. Es perfectamente visible la red de grandes ciudades de la comunidad, así como la extensa red de ciudades medias, sobre todo en el valle del Guadalquivir.



Figura 80. El brillo de fondo de cielo nocturno en Andalucía

Fuente: Falchi et al. (2016). Elaboración propia.

5.6 INCREMENTO MAGNITUDES DE BRILLO (ZENIT) EN EL SE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

En la figura 81 mostramos la situación de contaminación lumínica cenital más favorable. Las isolíneas están divididas en incrementos de brillo cenital para cada 0.2 mag/seg² arco, referido a la banda visible y respecto a un cielo sin contaminación lumínica alguna.

Se observa como Sierra Nevada, y sus observatorios, están en situación muy comprometida, por la cercanía del área metropolitana de Granada. Las condiciones presentes en el observatorio de Calar Alto mejoran respecto a Sierra Nevada. No obstante, aquí aparece la incidencia de la gran mancha luminosa del eje urbano Almería-El Ejido. Situación mucho más favorable presenta el observatorio de la Sagra, al NE de la provincia de Granada, donde apenas hay luz significativa en un radio de unos 70 Km. Su cielo es, por tanto, el mejor de esta muestra y, posiblemente, de los mejores cielos en la península Ibérica y, por extensión, de Europa.



Figura 81. Un recorte del mapa de Falchi et al (2016). La zona interesada corresponde al sector este de Andalucía.

Fuente: Falchi et al. (2016). Elaboración propia.

5.7 BRILLO DE FONDO DE CIELO TÍPICO SOBRE UNA ZONA SUBURBANA DE LA CIUDAD GRANADA

En la figura 82 se muestran los efectos de la contaminación lumínica del área metropolitana de Granada en el parque natural de la Sierra de Húetor, situado unos 9 Km. al norte de la ciudad de Granada. Las medidas fueron efectuadas a primera hora de la noche, con medidor Sky Quality Meter (SQM), desde el mirador de Viznar, y están expresadas en magnitudes visuales (banda visible). Las condiciones fueron de cielo despejado, sin Luna y transparencia buena. Para la representación gráfica se utilizó el método kriging, a partir del Golden Software.

El área metropolitana de Granada se sitúa en torno a los 180 grados de azimut, de ahí que se observen aquí sus efectos de contaminación de forma más evidente. Efectos que se extienden por todo el cielo, siendo la parte menos contaminada la dirección norte, en torno a 0º azimut y 45 º de elevación, donde se alcanzó la magnitud 20. Este dato es dos magnitudes más brillante que el fondo natural, dado que éste se sitúa en torno a una magnitud 22, según el filtro V del SQM.



Figura 82. Una muestra del aspecto del cielo muy contaminado en las inmediaciones del Parque Natural de la Sierra de Huétor (Granada)

Fuente: Elaboración propia.

5.8 ESPECTROSCOPIA DEL CIELO DESDE EL PARQUE NATURAL SIERRA HUÉTOR (VIZNAR)

En el mirador de Viznar también se realizaron medidas con un espectrógrafo EDMUND #58302 (BRC112); actualmente existen versiones similares, disponibles a través del Edmund Optics. Se dispuso de una rendija de 500 micras. Trabaja con corrección lineal entre 200 y 700 nanómetros de longitud de onda; y se dispuso de un campo de visión de 20º sobre el cielo. Las unidades son en intensidad relativa. De acuerdo con la apertura de la rendija de entrada del espectrógrafo y su campo útil, se determinó que un tiempo de integración de 300 segundos es suficiente para obtener una buena relación señal/ruido. Las integraciones fueron de 60 segundos, repetidas 5 veces y promediadas.

En la figura 83 aparece una muestra de espectro del cielo nocturno en dirección a Granada. Se aprecian las líneas del doblete del sodio de las lámparas de alumbrado público en 570 y 590 nm. Existen picos relativos intensos en el azul (450 nm.) y verde (540 nm), provocados por la nueva iluminación exterior a base de led blancos. Los Leds de tipo amarillo/dorado se superponen a la de las lámparas de sodio, y entran ambos en la misma región del espectro del cielo, mostrándose en torno a 550-600 nm. de longitud de onda. Una intensidad relativa de 1500 cuentas equivale, aproximadamente, a un brillo de fondo de cielo de 18 magnitud por segundo de arco cuadrado. Obsérvese el comparativo con el SQM que aparece en las figuras del apéndice. El espectro fue corregido de corriente de obscuridad.



Figura 83. Espectro del cielo sobre Viznar, en dirección a Granada, a una altitud del campo de visión de 20º sobre el horizonte

En la figura 84, con el mismo espectrógrafo de la figura 83, se muestra, en rojo, que la intensidad relativa de las líneas de emisión típicas de los leds blancos era bastante menor en 2017 que en 2021. Se pueden apreciar los máximos correspondientes al sodio de alta presión (en torno a 590 Nm.), al mercurio (546, 435 y 325 Nm.) y las cada vez más presentes lámparas de leds blancos (alrededor de 440 Nm.). Esto demostraría, en principio, el rápido incremento de la emisión en el azul de estos leds. Por tanto, se está afectando negativamente a esta zona del espectro, donde las observaciones astronómicas tienen especial importancia. En una consideración de conjunto, se aprecia que el cielo nocturno se ha vuelto más azul que hace un lustro, tendencia que parece continuar hacia el futuro, por la masiva adopción de este tipo de alumbrado (led blanco), aún en entornos de interés astronómico, como son los parques naturales próximos a la ciudad de Granada.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 84. Un espectro del cielo de la ciudad de Granada en el verano de 2017

Fuente: Elaboración propia.

5.9 EL BRILLO FONDO CIELO TÍPICO EN EL OBSERVATORIO DE LA SAGRA

Las medidas fueron efectuadas a primera hora de la noche con medidor SQM y expresadas en magnitudes visuales (banda visible). Las condiciones fueron de cielo despejado, sin Luna y buena transparencia. El aspecto general del cielo es bueno, con predominio de magnitud 21 en cualquier dirección y altura. Con todo, los grandes núcleos urbanos del levante español, entre Almería y Murcia, contribuyen con una significativa cantidad de luz parasita en alturas inferiores a 20º y en dirección Este.

Figura 85. Un aspecto típico del cielo nocturno a primeras horas de la noche sobre el observatorio de la Sagra, a 1530 m. de altitud



Fuente: Elaboración propia.

EL BRILLO FONDO CIELO TÍPICO EN EL OBSERVATORIO DE CALAR 5.10 ALTO

Las medidas fueron efectuadas a primera hora de la noche con medidor SQM y expresadas en magnitudes visuales (banda visible). Las condiciones fueron de cielo despejado, sin Luna y buena transparencia.

Las estimaciones de la figura 86 para Calar Alto fueron realizadas con medidor de brillo estándar SQM. Se aprecia un buen cielo con alguna afección hacia el sector W, donde el efecto de emisión luminosa del área metropolitana de Granada y otros municipios de importancia, en la misma dirección, hacen que el brillo aumente de manera significativa, con valores de fondo típicos de 21.5 magnitudes/segundo² arco. Aparece un cielo bastante obscuro, pero con un sector occidental más perjudicado.



Figura 86. Aspecto del brillo de fondo del cielo nocturno a primeras horas de la noche



EL BRILLO DE FONDO DE CIELO TÍPICO SOBRE SIERRA NEVADA 5.11

Se han realizado también mediciones con el SQM para el caso de zona de los observatorios astronómicos presentes en Sierra Nevada. Concretamente, para el caso de la zona de los observatorios de Mojón del Trigo, el observatorio de Sierra Nevada y el observatorio de radioastronomía (IRAM). Considerando nuestras mediciones, podemos indicar que se aprecia un dramático incremento del brillo del cielo en todas las

direcciones y, en particular, hacia el W (Figura 87). Las iluminaciones del Centro de Alto Rendimiento para el entrenamiento del Consejo Superior de Deportes en Sierra Nevada (CAR de Sierra Nevada), la propia urbanización de Pradollano y el área metropolitana de Granada han arruinado este cielo, antes prístino. Para unas condiciones de observación ideales, sin Luna, sin nubes y transparencia muy alta, aparece un cielo, en promedio, dos magnitudes más brillantes que el brillo de fondo natural, en dirección oeste y a 45° de altura. Compárese con la figura 82 para ver el efecto sobre una proyección en UTM del área de Granada y Sierra Nevada.

Figura 87. Aspecto del brillo de fondo del cielo nocturno a primeras horas de la noche del 8 noviembre de 2021 desde el IRAM de Sierra Nevada



Fuente: Datos fotométricos del autor mediante el medidor SQM.

5.12 FOTOGRAFÍAS NOCTURNAS DEL CIELO DE SIERRA NEVADA VISTAS HACIA GRANADA

Se han realizado, además, una serie de fotografías nocturnas desde Sierra Nevada con vistas hacia la ciudad de Granada y su entorno urbano, para distintos momentos "históricos" (Figuras 88 y 89). La imagen de septiembre de 1984 muestra ya una incipiente contaminación lumínica por la ciudad y sus núcleos aledaños (Figura 88), efecto que se ve muy intensificado 34 años más tarde (Figura 89). Por tanto, en la figura 89 se puede apreciar un intenso brillo "glow" sobre la ciudad, que se extiende a altitudes considerables, y a distancias horizontales de decenas de Km. Ello concuerda con nuestras medidas de SQM. El tono marrón del brillo sobre la ciudad viene causado por la retroreflexión de las partículas de humo y aerosoles a niveles inferiores a unos 2500 metros.



Figura 88. Retrospectiva nocturna de la aglomeración urbana de Granada desde el pico Veleta en Sierra Nevada. Ambas imágenes representan un espacio y escala aproximada

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 89 podemos observar en primer plano la urbanización DE la estación de esquí de Sierra Nevada: esto es, Pradollano. La imagen fue tomada sobre las 11 de la noche (hora local), del 17 agosto de 2017. Simultáneamente se obtuvieron mediciones del brillo cenital. El mismo alcanzó un valor de 21.05 mag/segundo² arco.



Figura 89. Imagen nocturna de la aglomeración urbana de Granada desde las inmediaciones del Albergue Universitario, a 2500 metros de altitud (agosto de 2017)

Fuente: Elaboración propia.

UN MAPA DE MEDIDAS REALES DE BRILLO DEL CIELO EFECTUADAS 5.13 CON FOTOMETRO SQM SOBRE GRANADA Y ALREDEDORES.

En la figura 90 aparecen las magnitudes obtenidas con nuestro sistema SQM para el entorno geográfico de la aglomeración urbana de Granada y los relieves circundantes. Los valores vienen expresadas en mag/segundo² de arco. Considérese que el fondo natural del cielo nocturno, en este caso, se sitúa en torno a 21.8 mag/segundo² de arco. Puede observarse que no llega a presentarse en ninguna zona cercana a la aglomeración metropolitana de Granada. De hecho, incluso en el OSN, que aparece en el mapa como un círculo, los valores del brillo cenital son aún inferiores a los que tendría el fondo natural nocturno.



Fuente: Quesada y Fischer (2010).

DISCUSIÓN 6

Hemos asistido a un cambio radical respecto de la concepción y percepción sobre la contaminación lumínica. La evolución ha resultado enorme desde las primeras conceptualizaciones del brillo de fondo de cielo de los años 20 del XX a los desarrollos actuales.

Hasta la II Guerra Mundial el problema parecía circunscribirse al ámbito de la perturbación del cielo nocturno por luz de origen casi exclusivamente natural. Nos estamos refiriendo, por ejemplo al "airglow" o brillo del aire, el fenómeno de las auroras en las altas latitudes de la Tierra, la luz zodiacal u otros fenómenos eléctricoatmosféricos.

Con el desarrollo industrial el problema de la contaminación lumínica ha alcanzado una dimensión diferente y mucho más grave que aquella de origen natural. En este caso aludimos a las problemáticas derivadas de la iluminación exterior de viales, autovías, fábricas y comercios. Incluso en el presente se está prestando atención a los efectos de la iluminación artificial elevada en los ecosistemas y en la salud humana.

Por otro lado, los periodos de recesión económica, como la crisis de 2008 y siguientes, parecen haber tenido algún pequeño efecto en la disminución de emisiones de luz parasita. Así parece ser observado en países muy afectados por la crisis como España, dado el cierre de numerosas industrias y otras actividades con iluminación exterior. También la reciente crisis derivada de la COVID 19 puede haber tenido un pequeño efecto en la iluminación exterior. En este caso la repercusión puede considerarse casi universal, por el cese de numerosas actividades.

No obstante, tras las crisis económicas o de otro tipo, con alcance universal, la contaminación lumínica no deja de crecer con el tiempo en casi todos los países.

La medida de esta variable, importantísima en observación astronómica, ha pasado de ser un ejercicio académico de análisis espectral de rayas de emisión emitidas por la atmósfera de la Tierra, a ser monitorizada de manera regular mediante satélites artificiales de última tecnología, que cubren toda la Tierra diariamente. Estas nuevas y potentes técnicas permiten ahora a los astrónomos caracterizar la contaminación lumínica antropogénica con un alto grado de estandarización; incluso para condiciones atmosféricas cambiantes, que dispersan la luz natural y artificial de forma aleatoria y compleja.

La potencia de cálculo de los ordenadores actuales ha permitido elaborar modelos predictivos del fenómeno, con un gran alcance, espacial y temporal.

El panorama legislativo existente, en algún que otro país, es exigua, y en casi todos es inexistente, a pesar de tener espacios naturales de alto valor e instalaciones astronómicas de trascendencia internacional. En este caso, la ley va muy por atrás de los modelos que han sido capaces de proponer y desarrollar los astrónomos y otros científicos del ámbito medioambiental.

En el caso de España, solo Canarias dispone de una ley plenamente desarrollada y con reglamentos efectivos de protección del cielo. Su aplicación ha sido especialmente escrupulosa en Isla de la Palma, y en menor medida en Tenerife, sedes de importantes observatorios astronómicos y meteorológicos. Además, en las islas Canarias buena parte de su territorio aparece protegido, contando con un número importante de parques nacionales.

Nosotros entendemos que la actuación canaria debería extrapolarse en el resto de España, para la red de Parques Nacionales, Parques Naturales y otras reservas importantes. Y es que, pese a contar estos espacios con importantes medidas de protección, la contaminación por luz artificial del cielo nocturno no está específicamente considerada, ni menos aún desarrollada.

El caso de Andalucía es bastante lamentable, ya que, aunque se aprobó en 2010 una Ley de Protección del Cielo Nocturno, y unos reglamentos para hacerla efectiva, la misma se encuentra paralizada, sine-die, sin que exista a día de 2024 un reglamento en vigor que controle el efecto de la iluminación sobre el cielo nocturno en Andalucía. Solo algunos de los aspectos contemplados en dicho reglamento siguen en vigor. En especial las competencias de normativa y las relacionadas con las especificaciones de zonas astronómicas, así como las definiciones y límites de emisión de las luminarias (exceptuando las de emergencias, seguridad etc.).

El incremento de instalaciones de diodos leds de tipo blanco parece estar perjudicando de manera especial la zona del espectro de la luz azul, con longitudes de onda entre los 400-500 nm. Lo que en un principio parecía un aumento de la eficiencia energética en alumbrado exterior ha resultado en detrimento de la calidad del cielo en áreas y zonas del espectro observacional muy sensibles.

7 CONCLUSIONES

Según lo expuesto en todo el capítulo y presentado en los apéndices del A al E, es indudable que hay un daño considerable sobre los cielos de los observatorios astronómicos de todo el mundo. Ciertamente, en 2/3 de los mismos se ha experimentado un incremento notable de brillo de fondo de cielo, en todo o en parte de su cielo abarcable, generalmente debido a la iluminación exterior descontrolada y otros efectos de origen antropogénico.

Aunque Sierra Nevada está seriamente afectada por la contaminación lumínica, al menos en su sector W, cabe destacar su potencial para observación en el infrarrojo, nada afectado por la contaminación lumínica. Por ello este emplazamiento mantiene un alto interés de cara a futuros desarrollos, para estas longitudes de onda de radio e infrarrojo.

Casi toda la Sierra Segura, Cazorla y la Sagra muestran un bajo impacto por contaminación lumínica. De hecho, aquí se presentan una de las mejores condiciones de la península Ibérica. Considérese al respecto que las alturas aquí son considerables para astronomía óptica, por lo que es, más necesario que nunca, preservar su calidad de cielo nocturno, con medidas o extensión de los reglamentos existentes para proteger sus cielos. Idénticas medidas deberían considerarse en otras comunidades españolas, aparte de Canarias y Andalucía, sobre esta problemática.

La necesidad de restringir el uso de LEDs azules y blancos y marcar limites en áreas sensibles y con potencial para futuros observatorios astronómicos y científicos en general, y la necesidad de unificar una legislación autonómica, favoreciendo la convergencia entre las leyes de rango nacional y regional, debe ser una evolución ineludible.

El régimen sancionador de cada reglamento suele incumplirse, eso cuando es explícito. La ignorancia, la dejadez y la variedad de agentes infractores, así como las ineludibles excepciones, hacen de las actuales leyes y reglamentos unos instrumentos útiles pero muy limitados en su capacidad de aplicación.

La principal conclusión que se extrae de la lucha de los astrónomos contra la contaminación lumínica es que es una tarea larga, con muy pocas batallas ganadas, y donde cuesta mucho que las autoridades competentes lleven a la práctica leyes y reglamentos verdaderamente útiles, que no solo protejan al cielo actual sino también el futuro. Es un bien que no podemos dilapidar.

BIBLIOGRAFÍA

Albers S., Duriscoe, D. (2001). Modeling light pollution from population data and implications for National Park Service lands. *The George Wright Forum*, 18(4), 56-68. doi: 10.2307/43597774.

Bará, S. (2016). Anthropogenic disruption of the night sky darkness in urban and rural areas. *Royal Society Open Science*, 3(1). <u>doi</u>: 10.1098/rsos.160541

Bará S., Tapia & Zamorano (2019). Absolute Radiometric Calibration of TESS-W and SQM Night Sky Brightness Sensors. *Sensors*, 19 (6), 1336. doi: 10.3390/s19061336

Blackwell D. E., Ingham, M. F. (1961). Observations of the zodiacal light from a very high-altitude station: I. The average zodiacal light. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 122,113-127 doi: 10.1093/mnras/122.2.113

Cao, C., & Bai, Y. (2014). Quantitative analysis of VIIRS DNB nightlight point source for light power estimation and stability monitoring. *Remote Sensing*, 6(12), 11915-11935. doi: 10.3390/rs61211915

Cinzano, P., Falchi, F., Elvidge, C. D., Astronomia, K. E., Padova, Italy., Division, S. P., Center, N. N., Boulder, & Co. (2000). The artificial night sky brightness mapped from DMSP satellite Operational Linescan System measurements. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 318, 641-657. doi: 10.1046/j.1365-8711.2000.03702.x Cinzano, P., & Falchi, F. (2012). The propagation of light pollution in the atmosphere. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427(4), 3337-3357. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.21884.x

Cinzano, P., Falchi, F., Elvidge, C. D., Astronomia, K. E., Padova, Italy., Division, S. P., Center, N. N., Boulder, & Co. (2000). The artificial night sky brightness mapped from DMSP satellite Operational Linescan System measurements. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 318, 641-657. doi: 10.1046/j.1365-8711.2000.03702.x

Duriscoe, D. (2013). Measuring anthropogenic sky glow using a natural sky brightness model. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125, 1370-1382. <u>doi</u>: 10.1086/673888

Duriscoe, D., Luginbuhl, C., & Elvidge, C. (2014). The relation of outdoor lighting characteristics to sky glow from distant cities. *Lighting Research & Technology*, 46(1), 35-49. doi: 10.1177/1477153513506729

Duriscoe, D. M. (2016). Photometric indicators of visual night sky quality derived from all-sky brightness maps. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. doi: 10.1016/j.jqsrt.2016.02.022

Duriscoe, D. M., Luginbuhl, C. B., & Moore, C. A. (2007). Measuring night-sky brightness with a Wide-Field CCD Camera. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 119*(818), 192. doi: 10.1086/512069

Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Zhizhin, M., & Hsu, F.C. (2013). Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights. *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, 35, 62. doi: 10.7125/APAN.35.7

NCY I. (2014). Key world energy statistics. doi:10.1787/key_energ_stat-2014-en

Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D. M., Kyba, C. C. M., Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Portnov, B. A., Rybnikova, N., & Furgoni, R. (2016). El nuevo atlas mundial del brillo artificial del cielo nocturno. *Science Advances*, 2(6), e1600377. doi: 10.1126/sciadv.1600377

Cinzano, P., Falchi, F., & Elvidge, C. D. (2001). The first World Atlas of the artificial night sky brightness. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 328(3), 689-707. doi: 10.1046/j.1365-8711.2001.04882.x

Cinzano, P., Falchi, F., Elvidge, C.D. (2001). The first World Atlas of the artificial night sky brightness. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 328, 689-707. doi: 10.1046/j.1365-8711.2001.04882.x

Cinzano, P., Falchi, F. (2012). The propagation of light pollution in the atmosphere. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427(4), 3337-3357. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.21884.x

Falchi, F., Ramos, F., Bará, S., Sanhueza, P., Arancibia, M., Damke, G., & Cinzano, P. (2023). Light pollution indicators for all major astronomical observatories. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 519(1), 26-33. doi: 10.1093/mnras/stac3198

Flecher, J. M., & Crampton, D. (1973). An astronomical view of high-pressure sodium lamps. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 85. doi:10.1086/131768 Garstang, R. H. (1984). Model for artificial night-sky illumination. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 98, 364. doi: 10.1086/131768

Garstang, R. H. (1989). Night sky brightness at observatories and sites. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 101, 306-329. doi: 10.1086/132436

Garstang, R. H. (1991). Dust and light pollution. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 103, 1109-1116. doi:10.1086/132933

Hoag, A. A. (1976). Monitoring of city sky glow at Kitt-Peak II. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 88(522), 207-208. doi: 10.1086/129495

Hölker, F., Wolter, C., Perkin, E., & Tockner, K. (2010). Light Pollution as a Biodiversity Threat. *Trends in Ecology & Evolution*, 25(12), 681-682. doi: 10.1016/j.tree.2010.09.007

Hollan, J. (2009). What is light pollution, and how do we quantify it? In *Proceedings of the Work Pap Darksky Conference* (pp.1-12). Recuperado de http://amper.ped.muni.cz/light/lp_what_is.pdf

Kalinowsky, J. K., Roosen, R. G., & Brandt, J. C. (1975). The night sky brightness at McDonald Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 87, 869-876. doi: 10.1086/129862

Kaplan, J. (1935). Light from the night sky. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 47(279), 257-262. doi:10.40669362

Krisciunas, K. (1997). Optical Night-Sky Brightness at Mauna Kea over the Course of a Complete Sunspot Cycle. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 109(740), 1181-1188. doi: 10.40681017

Landolt, A. U. (1985). An aurora and aerial luminescence program at the South Pole. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 70(417), 581-584. <u>doi</u>: 10.1086/131612

Lewis, E. P. (1924). The spectrum of the aurora and of the night sky. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 36(213), 282-286. doi: 10.40693338

Luginbuhl, C. B., Duriscoe, D. M., Moore, C. W., Richman, A., Lockwood, G. W., & Davis, D. R. (2009). From the Ground Up II: Sky Glow and Near-Ground Artificial Light Propagation in Flagstaff, Arizona. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 121(876), 204-212. doi: 10.1086/597626

Luginbuhl, C. B., Boley, P., & Davis, D. R. (2014). The impact of light source spectral power distribution on sky glow. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 139*, 21-26. doi:10.1016/j.jqsrt.2013.12.004

Marchant, P. (2010). Have new street lighting schemes reduced crime in London? *Radical Statistics*, 104, 39-48. Recuperado de https://www.radstats.org.uk/no104/Marchant2_104.pdf

Moore, C. A., Turina, F., & White, J. (2013). *Recommended indicators and thresholds of night sky quality for NPS state of the park reports. Interim Guidance*. Recuperado de https://irma.nps.gov/DataStore/DownloadFile/476525

Netzel, H., & Netzel, P. (2016). High resolution map of light pollution over Poland. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 181, 67-73. doi: 10.1016/j.jqsrt.2016.03.014

Osterbrock, D. E., Walker, M. F., & Koski, A. T. (1976). The spectrum of light pollution at Mount Hamilton. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 88, 349-352. doi: 10.1086/376391

Patat, F. (2008). The dancing sky: 6 years of night-sky observations at Cerro Paranal. *Astronomy & Astrophysics*, 481, 575-591. <u>doi</u>: 10.1051/0004-6361:20079279

Pike, R. (1976). A simple computer model for the growth of light pollution. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 70(540), 116-126. Recuperado de https://www.rasc.ca/sites/default/files/pike.pdf

Pun, C. S. J., & So, C. W. (2012). Night-sky brightness monitoring in Hong Kong: a citywide light pollution assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184, 2537-2557. doi: 10.1007/s10661-011-2136-1

Quesada, J. A., & Fischer, J. (2010). Elaboración de una cartografía de la contaminación lumínica de la provincia de Granada. En *Caminando hacia un compromiso por el territorio*. Actas del IV Congreso Internacional de Ordenación del Territorio. Pamplona, 27, 28 y 29 de octubre de 2010. Recuperado de https://www.fundicot.org/vi-ciot

Quesada, J. A. (2017). Cobertura nubosa, contaminación lumínica y contenido en aerosoles, como parámetros limitantes de las observaciones astronómicas (Tesis de Maestría). Universidad de Granada, Granada.

Sánchez de Miguel, A. (2015). Variación espacial, temporal y espectral de la contaminación lumínica y sus fuentes: Metodología y resultados (Tesis). Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

Sánchez, S. F., Thiele, U., Aceituno, J., Cristóbal, D., Perea, J., & Alves, J. (2007). El cielo nocturno en el observatorio de Calar Alto II: El cielo en el infrarrojo cercano. *Publicaciones de la Sociedad Astronómica del Pacífico*, 120, 1244-1254. <u>doi</u>: 10.1086/593981

Sánchez, S. F., Aceituno, J., Thiele, U., Pérez-Ramírez, D., & Alves, J. (2007). The Night Sky at the Calar Alto Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 119, 1186-1200. <u>doi</u>: 10.1086/522378

Schaller, M., Park, J. H., & Mueller, A. (2003). Fear of the Dark: Interactive Effects of Beliefs about Danger and Ambient Darkness on Ethnic Stereotypes. *Boletín de Personalidad y Psicología Social*, 29, 637-649. doi:10.1177/0146167203029005008

Schneeberger, T., et al. (1979). The night sky conditions at the Sacramento Peak Observatory I. Sky brightness. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 91(542), 530-532. doi: 10.40677372

Slanger, T. G., Cosby, P. C., Osterbrock, D. E., Stone, R. P. S., & Misch, A. A. (2003). The High-Resolution Light-polluted Night-Sky Spectrum at Mount Hamilton, California. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 115, 869-878. doi: 10.1086/376391

Stevens, R. G., Brainard, G. C., Blask, D. E., Lockley, S. W., & Motta, M. E. (2013). Breast cancer and circadian disruption from electric lighting in the modern world. *American Journal of Preventive Medicine*, 45(3), 343-350. <u>doi:</u> 10.1016/j.amepre.2013.04.011

Swings, P. (1948). The spectra of the night sky and of the aurorae. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 60, 18-26. doi: 10.40672079

Taylor, V. A., Jansen, R. A., & Windhorst, R. A. (2004). Observando las condiciones en el Monte Graham: Telescopio de Tecnología Avanzada del Vaticano UBVR Sky Surface Brightness and Seeing Measurements from 1999 through 2003. *Publicaciones de la Sociedad Astronómica del Pacífico*, 116(822), 762-777. doi: 10.1086/422929

Treanor, P. J. (1973). A simple propagation law for artificial night-sky illumination. *Observatory*, 93, 117-120.

Turnrose, B. E. (1974). Absolute spectral energy distribution of the night sky at Palomar and Mount Wilson Observatories. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 86(512), 545-551. Recuperado de https://iopscience.iop.org/article/10.1086/129642/pdf

Walker, M. F. (1973). Light pollution in California and Arizona. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 85(507), 508-519. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40675430

Walker, M. F. (1977). The effects of urban lighting on the brightness of the night sky. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 89(529), 405-409. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40677041

Zamorano, J., Nievas, M., Tapia, C., García, C., Sánchez de Miguel, A., Pascual, S., et al. (2015). "Low-cost photometers and open-source software for light pollution research". En *IAU General Assembly XXIX*.

Zamorano, J., et al. (2016). *The International Journal of Sustainable Lighting*, 35, 49-54. doi: 10.22644/ijsl.2016.35.1.049

Zhang, J. S., Reid, S. D., Miller, S. D., & Turk, F. J. (2008). Strategy for studying nocturnal aerosol optical depth using artificial lights. *International Journal of Remote Sensing*, 29(16), 4599-4613. doi: 10.1080/01431160802020528

APÉNDICE A

Correlación entre SQM 2008 y los datos del mapa de Falchi et al. (2016)

Observamos una excelente correlación entre ambas series independientes, aunque la no linealidad se explica por un sinnúmero de motivos que no han sido tenidos en cuenta, bien en el modelo generador del Atlas, o bien en las limitaciones de nuestro instrumental en las medidas de 2008. En cualquier caso, es un ajuste perfectamente válido y extrapolable de forma cruzada entre ambas formas de obtener la información sobre el brillo de fondo de cielo.



Correlación SQM 2008 frente al mapa de Falchi et al. (2016).

Fuente: Elaboración con datos SQM del autor.

El análisis residual entre el modelo de Falchi et al (2016) y nuestras propias medidas con el SQM (Figura 92) parecen indicar claramente la forma no lineal aplicada en el modelo de los citados autores y que alcanza un máximo de discrepancia en el entorno de la magnitud 21 lo que significa que el modelo considera efectos no lineales de emisión de luz parasita por focos extensos, cuestión que por otro lado ha sido comprobada, si bien consideramos que el modelo trata con mucha dureza este aspecto de la emisión luminosa por parte de fuentes relativamente cercanas, (10 a 20 Km. de distancia), siendo nuestras medidas en tal caso, moderadamente discrepantes con el modelo. Esta discrepancia está en revisión y podría ser aclarada en futuras investigaciones en nuestra área de estudio de Andalucía Oriental y sus observatorios y más concretamente en la gran aglomeración urbana de Granada y su cinturón metropolitano.

Análisis residual entre el modelo de Falchi et al. (2016) en eje X y nuestras propias medidas con el SQM en eje Y.



Fuente: Elaboración con datos SQM del autor.

Correlación entre SQM 2008 y SQM 2017

Se deduce que el Sistema SQM-2008 tiende a sobrevalorar el grado de contaminación lumínica alrededor de 0.3 mg./seg.² arco, al cenit respecto al modelo de Falchi, según se desprende del análisis de residuales y que cerca de las grandes ciudades este valor se dispara a cerca de 1.7 mag/seg.² arco. Lo que nos indica que nuestro sistema es más proclive a captar fuentes de luz no consideradas en el modelo o quizá, la forma del modelo que no se adecua bien a la situación real en las cercanías de las ciudades (sus extrarradios) tendiendo a dar valores relativamente bajos de contaminación respecto a lo que realmente se mide in situ con el medidor SQM en condiciones idóneas, es decir sin Luna, en periodo de obscuridad astronómica, fuera de la parte central de la Vía Láctea etc. Ver también Quesada y Fischer (2010) para tener una mejor comprensión de la toma y análisis de datos de la época de 2008.

Plot de calibración para el mismo instrumento SQM con medidas realizadas en 2008 (eje x), y 2017 (eje y) en los mismos puntos de control.



Fuente: Elaboración con datos SQM del autor.

Ante la consistencia del ajuste no cabe sino considerar que en estos últimos nueve años ha disminuido el brillo de fondo de cielo en las proximidades de la aglomeración urbana de Granada en torno a 0.3 mag/seg² de arco. (A mayor magnitud positiva menor brillo). Estimamos que nuestro error no es mayor del +/- 15 % sobre dicho diferencial, lo que supone en la práctica, admitir que el brillo neto del cielo ha disminuido, bien por los efectos del desarrollo económico sobre el gasto en iluminación exterior. Una posible explicación es que es que la profunda crisis económica iniciada en 2008 haya repercutido de esta manera en la emisión de luz parasita por el cierre de numerosas actividades industriales y lúdicas. Tanto en 2008 como en 2017 nos encontrábamos en una fase del ciclo solar de 11 años con muy poca actividad por lo que su efecto debe ser mínimo en nuestras medidas. Adicionalmente sería interesante comprobar si la irrupción de la iluminación a base de leds en muchos municipios ya tiene una influencia en el comportamiento observado al medir con el mismo instrumento en épocas bastante separadas, toda vez que en 2008 aun había poco porcentaje de iluminación leds.

Ligeras modificaciones en la geometría de entrada del medidor SQM en 2017 dan un valor de 4 a 5 centésimas de magnitud más obscuro que en 2008, lo cual no explica el valor diferencial de alrededor de 0.3 mag./seg² arco observado en la práctica y por ello nos inclinamos por la explicación propuesta de "aumento real del brillo de fondo de cielo" en el área estudiada (Área metropolitana de Granada). Todo ello con las debidas reservas y a la espera de refinar estos resultados con más medidas y calibraciones
sobre el área de estudio y sobre los instrumentos de medida, así como ver si es posible correlacionar este resultado con otros estudios independientes.

Los mapas nocturnos de contaminación lumínica (diarios de MODIS_TERRA y MODIS_AQUA VIIRS desde Nov de 2016) pueden ser una gran herramienta a la hora de discriminar hechos puntuales diarios en eventos luminosos y también nubosos. Los mismos se pueden consultar a partir de https://worldview.earthdata.nasa.gov/.

APÉNDICE B

ESPECTROS DE LAMPARAS DE ILUMINACION VIAL EN GRANADA Y MUNICIPIOS CERCANOS (TODAS LAS MEDIDAS SON DE TIPO RELATIVO PARA COMPARAR TIPOS)

Espectro tipo de una lámpara de sodio de alta presión moderna de luz amarilla que hasta hace poco tiempo era la única alternativa a la iluminación segura de viales y carreteras importantes. Aunque sustituyo a las lamparás de halogenuros metálicos en dichas vías, a su vez están siendo sustituidas por lamparás leds, sean blancas o doradas (Figuras anterior y tres siguientes) en áreas donde prima la seguridad. Aparte del intenso doblete del sodio en torno a 590 Nm. Se observan también líneas de emisión secundarias en la zona azul y ultravioleta del espectro.



Fuente: Elaboración datos espectrómetro visible de Edmund Optics

Espectro tipo de una lámpara de leds moderna de luz blanca que va sustituyendo a la lámpara de halogenuros metálicos usadas hasta recientemente en áreas donde prima la seguridad. Su uso se extiende en exteriores como viales, aparcamientos y zonas de acceso a centros comerciales. Su pico de emisión azul es dañino para los trabajos de observación astronómica.



Fuente: Elaboración datos espectrómetro visible de Edmund Optics

Otro tipo de lampara leds para viales muy usado en la actualidad con un pico de emisión muy pronunciado en torno a 500 Nm. Muy escasa emisión por debajo de los 480 Nm. En la zona azul del espectro.



Fuente: Elaboración datos espectrómetro visible de Edmund Optics

Espectro de una lámpara de tipo farola vial aparcamiento con luz blanca-dorada, que ha sustituido en muchos municipios a la clásica lámpara de Sodio de alta presión. Esta es una de las más recientes luminarias y su aceptación proviene de una razonable y agradable reproducción de los colores sin producir deslumbramientos por encima de la horizontal de la lámpara, como exigen los reglamentos de protección de calidad del cielo. Su emisión nociva en el azul es relativamente reducida.



Fuente: Elaboración datos espectrómetro visible de Edmund Optics.

Un tipo de leds dorado con un buen equilibrio de color y escasa emisión en el azul y violeta del espectro. Diversas consideraciones de tipo astronómico podrían hacer que este tipo de luminaria fuese de los menos dañinos, en cuanto a contaminación del cielo nocturno, pues concentra su emisión de manera casi continuo entre los 550 y 650 Nanómetros, en la zona amarillo-roja del espectro.



Fuente: Elaboración datos espectrómetro visible de Edmund Optics

APÉNDICE C

ESPECTROFOTOMETRÍA Y FOTOMETRÍA DEL CIELO NOCTURNO SOBRE DIVERSOS OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS CERCANOS A GRANADA.

Intento de calibración cruzada entre el medidor de brillo de fondo de cielo SQM frente a una media de las tres principales bandas de color mostradas en los espectros de los distintos observatorios a una altitud de 20 º sobre el horizonte y en dirección a la ciudad más contaminante. Las estimaciones espectroscópicas lo fueron al promedio de los máximos de las tres bandas principales centradas en 450 Nm. (Azul), 560 Nm. (Verde) y 590 Nm. (Amarillo).



Fuente: Elaboración datos espectrómetro visible de Edmund Optics

Comparativa de los espectros del cielo de los observatorios próximos a Granada. El brillo de cielo a 20º altura en dirección a la ciudad más contaminante muestra un cielo excesivamente brillante sobre Sierra Nevada entre 400-600 Nm. En el caso de Calar Alto y la Sagra el incremento en esa banda del espectro no llega al 25% del caso de Sierra Nevada. Aun asi es un cielo ya contaminado para las observaciones fotométricas y espectroscópicas más precisas. Las condiciones de observación fueron casi ideales a saber: Cielo sin Luna, absolutamente despejado, buena trasparencia, en obscuridad astronómica y en el comienzo del ciclo solar N.º 25. Las noches fueron consecutivas para tener condiciones climatológicas de transparencia muy similares. Las observaciones fueron efectuadas entre el 5 al 8 de noviembre de 2021 en torno a las 21 h. UT. El tiempo de exposición fue de 60 segundos.



Fuente: Elaboración datos espectrómetro visible de Edmund Optics

<u>APÉNDICE D</u>

<u>TÉRMINOS USUALES</u>

<u>Airglow</u>

El "airglow" es causado por diversos procesos en la atmósfera superior de la Tierra, como la recombinación de átomos que fueron foto ionizados por el Sol durante el día, la luminiscencia causada por rayos cósmicos que golpean la atmósfera superior y la quimioluminiscencia causada principalmente por el oxígeno y el nitrógeno que reaccionan con los radicales libres hidroxilos a alturas de unos pocos cientos de kilómetros. No se nota durante el día debido al resplandor y la dispersión de la luz solar.

<u>Ångström</u>

Abreviado Å, unidad de longitud igual a 10⁻¹⁰ metros (0.0000000001 metros); se utiliza para medir las longitudes de onda de la luz visible y de otras formas de radiación electromagnetica. Los científicos ahora prefieren usar el nanómetro (nm) equivalente a 10 angstrom. El Ångström se llama así en honor del físico sueco Anders J. Ångström.

Declaración Starlight

"Los participantes de la Conferencia Internacional en Defensa de la Calidad del Cielo Nocturno y el Derecho a Observar las Estrellas, conjuntamente con los representantes de la UNESCO, OMT, IAU, y otras agencias y organizaciones internacional citadas en la versión íntegra de la Declaración, así como miembros de la comunidad científica y académica, reunidos en La Palma, Islas Canarias, España, el 20 de Abril de 2007; siendo conscientes que la visión de la luz de las estrellas ha sido y es una inspiración para toda la Humanidad, y que su observación ha representado un elemento esencial en el desarrollo cultural y científico de todas las civilizaciones" (Cinzano et al., 2001).

<u>Iluminancia</u>

"Fís. La iluminancia es una medida para la densidad del flujo luminoso. Se ha definido como la relación del flujo luminoso que cae sobre una superficie y el área de la misma. La iluminancia no está sujeta a una superficie real, se puede determinar en cualquier lugar del espacio, y puede derivar de la intensidad luminosa. La iluminancia, además, disminuye con el cuadrado de la distancia desde la fuente de luz (ley fotométrica de distancia)", y cuya unidad en el sistema internacional es el lux.

<u>Luminancia</u>

Se llama luminancia o brillo fotométrico a la luz procedente de los objetos. En astronomía se usa con preferencia el termino magnitud estelar, que es:

Mag = -2.5log.l

Siendo I la intensidad luminosa medida con un instrumento calibrado o fotómetro, y se refiere normalmente a la diferencia de brillo entre dos estrellas, siendo una mag. equivalente a una diferencia de brillo de 2.512 veces entre ambas.

Molecular (Rayleigh) scattering

Debido a que los tamaños de las moléculas atmosféricas son mucho más pequeños que las longitudes de onda de la radiación solar e IR, la dispersión por gases atmosféricos es el dominio de dispersión de Rayleigh. En la aproximación de dispersión de Rayleigh, una molécula (o una partícula pequeña) se considera como un dipolo puntual individual.

OLS (Operational Linescan System)

Es un instrumento a bordo del satélite que permite el escaneado de líneas sobre el terreno de la superficie terrestre conforma avanza este en su órbita. Estas líneas tienen un grosor estrecho de pocos pixeles sobre la cámara, pero una gran longitud pudiendo llegar a abarcar unos 3000 Km. en cada barrido.

<u>DMSP</u>

Sistema de satélites de defensa de Estados Unidos que operan en orbitas polares a unos 600 Km. de altura. Fueron los primeros en utilizarse para estudiar el brillo de las ciudades de todo el mundo durante la noche.

Sistema fotométrico de Johnson

El Sistema fotométrico UBV, también conocido como Sistema de Harold Johnson (o sistema de Johnson-Morgan), es un sistema fotométrico de banda ancha para la clasificación estelar regido en función del color del astro. Es el primer sistema fotométrico estandarizado. Las letras U, B y V indican respectivamente Ultravioleta, azul y espectro visible, las cuales son medidas para clasificar a una estrella en el sistema UBV. La elección de colores pertenecientes al extremo azul del espectro se debe a la tendencia que tiene el papel fotográfico a captar estos colores. Fue introducido en 1950 por el astrónomo americano Harold Lester Johnson y William Wilson Morgan.

Visión escotópica

"La visión escotópica es aquella percepción visual que se produce con niveles muy bajos de iluminación. La agudeza visual es baja y la recepción de luz es principalmente con los bastones de la retina, que son sensibles al color azul del espectro (y por ende, ciego al rojo)" (química.es).

Con niveles de intensidad luminosa media o alta domina la visión normal o "Fotópica" en la que se perciben todos los colores del espectro del Sol y con preferencia los centrados en el verde amarillo.

<u>APÉNDICE E</u>

UNA TABLA DE OBSERVATORIOS A NIVEL UNIVERSAL Y SUS VALORES DE CONTAMINACIÓN LUMÍNICA

						Average	Average	Average	
					Zenith	radiance	radiance	radiance	Horizontal
Site	Type	Longitude	Latitude	Altitude	radiance	(all sky)	at 30°	below 10°	irradiance
		(deg)	(deg)	(m)	(W m ⁻² sr ⁻¹)	(W m ⁻²)			
Mani & F. Ontinal Station Observatory156 25700 20 70820 3034 1 17E_09 4 10E_09 2 94E_09 1 44E_07 9								0.355 00	
Maura Kas	Observatory	-155 47253	10 82464	4160	2.33E_00	4.19E-08	7.0%E_00	6 22E_08	2.49E_00
Mauna Kea Mauna Kaa (NO malanaa	Observatory	-155,47255	19.82404	4100	2.33E-09	1.54E-08	1.98E-09	0.22E-08	2.46E-08
Mauna Kea (NO voicano) Observatory	-154.47255	20.82464	4100	1.73E-09	9.25E-09	4.905-09	4.40E-08	1.30E-08
LICK	Observatory	-121.63/32	37.34285	1260	3.06E-07	1.29E-06	8.93E-07	3.88E-06	2.39E-06
Palomar	Observatory	-116.86500	33.35660	1712	1.34E-07	7.99E-07	4.65E-07	2.70E-06	1.30E-06
San Pedro Martir	Observatory	-115.46370	31.04410	2795	2.14E-09	1.66E-08	6.44E-09	1.31E-07	2.10E-08
Kitt Peak	Observatory	-111.59991	31.96394	2050	1.34E-08	1.33E-07	6.86E-08	4.29E-07	2.00E-07
Lowell Discovery Tel.	Observatory	-111.42200	34.74460	2353	5.83E-09	7.51E-08	3.55E-08	2.49E-07	1.06E-07
Whipple	Observatory	-110.88507	31.68892	2580	2.83E-08	2.59E-07	1.44E-07	8.35E-07	4.03E-07
Mount Graham	Observatory	-109.88920	32.70128	3191	1.36E-08	1.10E-07	5.91E-08	3.44E-07	1.72E-07
Starfire Optical Range	Observatory	-106.46349	34.96415	1872	2.27E-07	2.03E-06	1.26E-06	6.62E-06	3.28E-06
Apache Point	Observatory	-105.82023	32.78027	2790	1.92E-08	1.73E-07	9.91E-08	5.30E-07	2.80E-07
McDonald	Observatory	-104.01472	30.68145	2026	4.16E-09	5.57E-08	2.77E-08	1.82E-07	8.39E-08
Cerro Tololo	Observatory	-70.80653	-30.16966	2205	1.37E-08	8.01E-08	4.77E-08	2.63E-07	1.32E-07
Pachon	Observatory	-70.74235	-30.24352	2707	9.82E-09	6.10E-08	3.39E-08	2.06E-07	9.77E-08
La Silla	Observatory	-70.73248	-29.25995	2360	2.88E-09	2.35E-08	1.22E-08	8.26E-08	3.53E-08
Las Campanas (Magellar)Observatory	-70.69239	-29.01429	2380	3.79E-09	2.89E-08	1.63E-08	9.56E-08	4.55E-08
Las Campanas (GMT)	Observatory	-70.68216	-29.04877	2516	3.34E-09	2.66E-08	1.46E-08	8.97E-08	4.12E-08
Paranal	Observatory	-70.40417	-24.62722	2635	4.90E-10	5.96E-09	2.73E-09	2.81E-08	8.71E-09
Armazones (NO lodge)	Observatory	-70,19160	-24,59100	3046	5.43E-10	8.05E-09	3.62E-09	3.67E-08	1.15E-08
Armazones	Observatory	-70,19160	-24.59100	3046	1.75E-09	1.17E-08	6.60E-09	4.29E-08	2.09E-08
Tokyo Atacama	Observatory	-67 74225	-22.98629	5640	5 59E-10	1 28E-08	5.87E-09	4.26E-08	1.85E-08
Roque de los Muchachos	Observatory	-17 88642	28 75829	2344	1 39E-08	4 67E-08	3.46E-08	1.49E-07	971E-08
Calar Alto	Observatory	-2 54685	37 22070	2160	4 21E-08	2.56E-07	1.48E_07	9 37E_07	4 18E_07
South African AO	Observatory	20.81080	-32 37507	1760	4.21E-08	5 31E_00	2.03E_00	1.85E_08	4.16E-07 8.01E_00
South African AG	Observatory	41 44045	-32.31391 A3 64693	2070	1.02E_08	7.975 09	4.42E-09	2.76E_07	1.25E_07
ADJES Damathal Oha	Observatory	41,44045	43.04083	2070	1.02E-08	7.8/E-08	4.42E=08	2.70E-07	1.23E-07
ARTES Devasinal Obs.	Observatory	/9.08404	29.30110	2420	3.63E-08	2.51E-0/	1.54E-07	7.02E-07	3.79E-07
SST (Nav. Comm. Holt)	Observatory	114.09 011	-21.89574	39	2.03E-08	9.19E-08	7.4/E-08	3.71E-07	1.54E-07
Beijing Astron. Obs.	Observatory	117.57586	40.39576	880	1.03E-07	5.16E-07	3.43E-07	1.49E-06	9.32E-07
Australian Astron. Obs.	Observatory	149.06700	-31.27560	1130	6.21E-10	4.19E-09	2.49E-09	1.18E-08	6.80E-09
Macon	Potential site	-67.25955	-24.46540	5500	2.81E-10	9.73E-09	3.89E-09	3.54E-08	1.24E-08
Muztagh	Potential site	74.89700	38.33200	4526	1.28E-09	1.44E-08	6.98E-09	4.33E-08	2.19E-08
Ali	Potential site	80.04600	32.30800	5100	2.18E-09	4.14E-08	1.81E-08	1.08E-07	5.30E-08
NAOC Saishiteng Mt	Potential site	93.89584	38.60655	4215	9.89E-11	3.37E-09	1.60E-09	1.20E-08	4.89E-09
Daocheng	Potential site	100.10900	29.10900	4750	1.56E-09	2.32E-08	1.15E-08	6.37E-08	3.37E-08
Wilson	Historic/control obs.	-118.05718	34.22591	1742	1.30E-06	5.39E-06	3.68E-06	1.56E-05	1.00E-05
Lowell Mars Hill	Historic/control obs.	-111.66464	35.20292	2212	3.25E-07	1.45E-06	1.04E-06	3.40E-06	3.10E-06
Lowell Anderson Mesa	Historic/control obs.	-111.53677	35.09707	2204	1.93E-08	2.15E-07	1.22E-07	6.84E-07	3.27E-07
Chapultepec	Historic/control obs.	-99.18185	19.42047	2282	4.92E-06	3.29E-05	2.10E-05	8.91E-05	5.91E-05
Mont Megantic	Historic/control obs.	-71.15277	45.45579	1100	1.62E-08	9.88E-08	5.84E-08	2.60E-07	1.61E-07
Pic du Midi	Historic/control obs.	0.14162	42.93674	2877	3.19E-08	2.00E-07	1.09E-07	6.64E-07	3.17E-07
Brera-Merate	Historic/control obs.	9.42915	45.70592	332	2.75E-06	1.21E-05	9.19E-06	3.95E-05	2.32E-05
Asiago	Historic/control obs.	11.56901	45.84857	1360	3.91E-07	1.77E-06	1.22E-06	5.35E-06	3.31E-06
Pulkovo	Historic/control obs.	30.32615	59.77182	80	5.67E-06	2.28E-05	1.83E-05	7.87E-05	3.92E-05
New Mexico Skies	Amateur observatory	-105.52923	32.90331	2224	9.93E-09	9.99E-08	5.50E-08	3.13E-07	1.62E-07
El Sauce, Chile	Amateur observatory	-70,76488	-30.47062	1540	7.69E-09	5.30E-08	3.14E-08	1.65E-07	8.54E-08
El Pangue, Chile	Amateur observatory	-70.69424	-30.14302	1478	1.57E-08	8.83E-08	5.84E-08	2.71E-07	1.55E-07
Celestial Exploration	Amateur observatory	-68 17948	-22,95280	2397	2.33E-08	1.53E-07	9.82E-08	3.98E-07	2.84E-07
Chile							,		
Athos Centro	Amsteur observatory	-17 95875	28 77770	875	2 39E-08	8 86E-08	6 33E-08	2.42E-07	1 79E-07
Astronomico La Palma						0.000	0.000		
AstroForm Lo Palmo	Amsteur obcorvatory	-17 03460	28 78587	1155	1 17E_08	4 01E_08	3 73E_08	1.63E_07	0.805-08
Tiuoli Astro Econ	Amsteur observatory	18 01595	_23.46120	1240	1.25E-10	2.28E_00	1.14E_00	673E_00	3.43E_00
Nemihia	Adhateur observatory	10.01303	-23,40130	1340	1.2.50-10	2.200-09	1.140-09	0.7512-09	334312-09
Raia California	Control site	-114 1610	31 5057	22	2.625.00	\$ 06E 00	7.15E 00	2 \$75 08	1.607 00
Baja Camornia	Control site	-114,1518	31,3037	23	2.02E-09	3.902-09	1.035 04	2.57E-08	1.00E-05
sierra Estrella	Control site	-112.2796	33.2738	1325	5.25E-0/	2.816-00	1.95E-06	8.11E-06	5.00E-06
40 km North Mexico City	Control site	-99.2949	19.7616	2844	5.50E-07	0.10E-06	3.44E-06	1.74E-05	9.48E-06
San Benedello Po	Control site	10.9196	45.0511	20	9.96E-07	1.346-06	3.71E-06	1.46E-05	7.096-06
Ballic Sea (Bothnia Bay)	Control site	22.6992	64.6519	0	1.09E-09	2.70E-09	6.41E-10	1.16E-08	9.51E-09

Fuente: Falchi et al. (2023).

CAPITULO V

TURBULENCIA ATMOSFÉRICA

OBJETIVOS

1

El objetivo general es analizar el comportamiento de la variable "seeing", desde distintas aproximaciones técnicas y metodológicas, para el conjunto de los observatorios astronómicos donde se dispongan de estudios o datos.

Respecto a los objetivos específicos se pretenden desarrollar los siguientes:

Testar un sistema microtermal para la medición de la turbulencia atmosférica que nos permita inferir el seeing.

Realizar mediciones con ese sistema para los primeros metros de la superficie terrestre, aplicando diferentes técnicas, en distintos puntos representativos de la observación astronómica del SE de la península Ibérica.

Analizar mediciones del seeing con instrumental de tipo DIMM en los observatorios astronómicos de Calar Alto y Sierra Nevada y comparar las del primero con nuestro sistema microtermal.

2 INTRODUCCIÓN

Los astrónomos mantienen, desde hace siglos, una insistente búsqueda de los sitios ideales para ubicar observatorios astronómicos. Esta lucha tiene entre sus principales objetivos librarse de los efectos provocados por las capas bajas de la atmósfera, sobre las imágenes ofrecidas por los telescopios. Así, han recorrido todo el mundo, desde el ecuador al casquete de hielo Antártico y Groenlandia, y desde el desierto de Atacama al Tíbet. Ya hacia mediados del siglo XX se vio que la única posibilidad de escapar de tal perturbación eran los observatorios espaciales, tema que, por su naturaleza, escapa a esta visión geográfica del problema.

La realidad es que ha sido una búsqueda de carácter impulsivo, desde las primeras reflexiones de Isaac Newton en el Siglo XVII (Newton, I. 1730). Luego llegó una época de grandes exploraciones científicas a tierras lejanas, financiadas por las Reales Academias de Ciencia de países europeos. Estas tenían un enfoque multidisciplinar junto al geográfico (participaban etnobotánicos, geólogos, climatólogos, astrónomos, etc.). Estas exploraciones estaban, en gran parte, orientadas a la

navegación marítima, pero no podían faltar las observaciones realizadas por los naturalistas a bordo de buques o estaciones fijas, más o menos dispersas, en ultramar.

Esta época inicial fue un tanto caótica, en cuanto a la disciplina astronómica se refiere, porque aún no había nacido la astrofísica, cosa que no ocurre hasta el siglo XX, donde la astronomía ya exige unos niveles de precisión y estabilidad nunca vistos o exigidos. Esta es la razón por la que a partir de la década de los 60 y 70 del siglo XX se incrementa el interés por encontrar lugares para observatorios astrofísicos, lejos de las perturbaciones urbanas, industriales o climatológicas. En los últimos 50 años se han localizado unos pocos lugares, a lo largo de todo el mundo, que realmente superan a la inmensa mayoría de los observatorios clásicos, anteriores a 1950. Esto es así tanto por la cantidad de horas posibles de observación a lo largo del año, como por la calidad de las observaciones, merced a una mínima turbulencia atmosférica.

De acuerdo con el consenso de la literatura citada, como la tesis de Zago (1995), los mejores emplazamientos astronómicos deberían tener una calidad de visión natural (seeing) que se situaría entre 0.3 y 0.6 segundos de arco (Full Width at Half Maximum, FWHM). Considerese que este parámetro deriva, aproximadamente, a partes iguales, de las características de la alta atmósfera y la capa límite planetaria. Los lugares aceptables para la investigación astronómica tendrían un "seeing natural" de hasta 2 segundos de arco en promedio anual, y referido a cenit. En adelante nos referiremos a él como seeing.

El seeing local, es decir, el seeing causado por el telescopio y las estructuras circundantes, puede representar desde un valor de cero hasta alrededor de 5 segundos de arco, de diámetro FWHM, en el rociado de la luz de un objeto puntual, como es una estrella. Esto puede ser la causa de diferencias muy significativas de calidad de imagen entre los telescopios, incluso de los situados en el mismo observatorio. Comprender y actuar para disminuir estas diferencias, causadas, inequívocamente, por el recinto y el ambiente atmosférico en el entorno inmediato del telescopio, es el reto al que se enfrentan todos proyectos futuros de telescopios.

3 APROXIMACIÓN HISTÓRICO-GEOGRÁFICA

3.1 LOS INICIOS

Podemos iniciar el recorrido con Piazzi (1845). Concretamente, con su comunicado, a la "Royal Astronomical Society", en el que se describe como sacar partido a los grandes telescopios reflectores en climas y latitudes muy distantes de Inglaterra.

Proponía que las observaciones astronómicas las realizaran, por ejemplo, monjes brahmanes, provistos de telescopios peculiares, consistentes en grandes reflectores parabólicos o esféricos fijos o semifijos, emplazándolos en las laderas de altas colinas en la India. El punto de observación estaría situado a gran distancia del espejo, y mirando hacia el propio espejo desde la cima de la colina. Con una adecuada distribución de estaciones y orientaciones, sería posible cubrir una buena porción del cielo en las latitudes tropicales. Se señala, además, la economía de dicho sistema, lo cual indica la gran preocupación logística y económica de este proyecto, que ya se propuso hace 175 años. No sabemos que tuviese alguna consecuencia práctica y si se realizaron algunas observaciones con este curioso sistema. Evidentemente, el sistema estaría muy afectado por la turbulencia de ladera en las montañas, aunque tendría un gran poder de amplificación de las imágenes de los planetas, que serían vistos con un tamaño enorme, al menos de manera instantánea y visualmente hablando, pero que serían muy difíciles de ajustar, tanto en foco como en posición, dado lo rudimentario del sistema. Hoy los encontraríamos poco operativos.

Pease, en 1923, y desde el observatorio astronómico del Mount Wilson (Estados Unidos), ya realizó observaciones visuales del fenómeno del "seeing" a través de un ocular en el foco de los telescopios reflectores de 60 y 100 pulgadas. Se vale del aspecto que presentan la Luna, los planetas y algunas estrellas brillantes. Con ello, dedujo que una parte de las perturbaciones se vinculaban con el entorno del telescopio y la cúpula y con las distintas capas atmosféricas, incluso las situadas a unos 6 km de altura o más. En este último caso, la causa la atribuye, correctamente, a las diferencias de temperatura y densidad de células atmosféricas, de 5 a 20 cm. Células que presentan una forma irregular y cambiante, con una frecuencia de 0.1 a 100 ciclos por segundo. En conjunto encuentra un "seeing" total en anchura de 2 segundos de arco, correspondiéndole, probablemente, una anchura de aproximadamente 1.4 segundos de arco. Indica como algunos astrónomos han hecho trazos fotográficos del paso de las estrellas brillantes sobre una placa fotográfica en el foco del telescopio, pero que poco o nada ha transcendido de semejantes investigaciones. Incluso describe lo que en su día sería un sistema periscópico, asimilable a nuestros modernos medidores de seeing, denominados Differential Image Motion Monitor (DIMM), sobre los que volveremos más adelante.

En 1945 Bernard Lyot obtiene excelentes fotografías con el refractor gigante de 60 cm. desde el Pic du Midi (Francia). Las excelentes condiciones de este sitio, elevado a casi 2900 m. de altura, se traducen en excelente detalle en la imagen de la Luna y los planetas, y, sin duda, marcan para la época un techo difícil de superar. El Pic du Midí ha sido también considerado en nuestro trabajo como un candidato para tener en cuenta en trabajos de alta resolución óptica para astronomía.

En la segunda mitad del siglo XX se vivió una auténtica fiebre astronómica animada por los éxitos espaciales de EE. UU., ligado al objetivo de la conquista de la Luna, que como sabemos se materializó en 1969, con la llegada del hombre a un cuerpo extraterrestre; de manera un tanto precipitada y peligrosa, hemos de observar.

El desarrollo de la radioastronomía y las ciencias espaciales son dos de los mayores hitos en astronomía a mediados del siglo XX (Morgan, 1960). Como señala este autor, en los observatorios terrestres los problemas logísticos y la calidad de imagen son factores de la máxima importancia en el establecimiento de nuevos observatorios astronómicos, e indica como los factores físicos debieran prevalecer sobre los logísticos, al menos en los observatorios más modernos; más aún si se ha de construir un observatorio en el que participen varios países o instituciones. En este contexto de búsqueda de la excelencia se investigaron aspectos tan curiosos como la clase y forma de pintar los edificios y las cúpulas de los observatorios (Hardie y Geilker, 1964).

Uno de los aspectos ligado a la calidad de las observaciones viene de la mano de Vaucoleurs (1965). Este autor llevó a cabo observaciones sistemáticas de extinción fotométrica en el observatorio McDonald (Nuevo México). Entre los grandes desarrollos institucionales de la época destaca la colonización astronómica de las islas Hawái, con la búsqueda, caracterización y construcción de los observatorios de Mauna Kea, Mauna Loa y Haleakala (Hansen et al., 1966).

Walker (1971) utiliza de manera sistemática un método fotográfico denominado "Polar Stars Trail", o trazos de estrella polar, efectuados desde distintos observatorios y lugares, en California, Baja California, Arizona, Chile y Australia.

El método robusto y simplificado, utiliza un simple refractor de 4 pulgadas de apertura, y unas 40 pulgadas de focal. El telescopio se mantiene fijo sobre un soporte rígido, apuntando siempre a la estrella Polar. Una cámara fotográfica tipo réflex, cargada con película rápida, hace de detector de movimiento de las estrellas.

El resultado es un trazo fotográfico, con incursiones, en diferentes direcciones del centroide de la imagen, a lo largo del tiempo. El método consiste en encontrar el ruido "sigma" del centroide, que luego puede generalizarse a disco de imagen. Su robustez y facilidad de uso, en sitios con poca infraestructura, lo hicieron un sistema casi ideal para el estudio del seeing astronómico y la turbulencia atmosférica en la década de los 70 y 80 del siglo XX. Entre sus inconvenientes, cabe citar que es un sistema limitado a condiciones de escasa velocidad del viento, y que la altura de la polar es relativamente baja en los lugares estudiados. Estos problemas implican hacer

extrapolaciones al zenit por corrección de masa de aire, para obtener un verdadero seeing, tal como suele exponerse en la literatura.

Walker encuentra que, en promedio, el mejor seeing aparece en latitudes comprendidas entre los 30 y 40 grados norte y sur, y en montañas aisladas cerca de la costa. Las condiciones parecen empeorar hacia el interior de los continentes, a pesar de que existan montes de muy elevada altitud. Sugiere que las islas pequeñas de elevada altitud y situadas en latitudes bajas son lugares ideales para obtener buena calidad de imagen.

Los efectos de las variaciones microtermales sobre la calidad de imagen ya fueron expuestas por Hoag y Cook (1967), cosa que midieron observando las variaciones de imagen y las variaciones de temperatura en la rendija de la cúpula de 84" de Kitt-Peak (Arizona). Señalan la importancia de minimizar las variaciones espaciotemporales de la temperatura en las inmediaciones del propio telescopio.

La distribución geográfica de los observatorios astronómicos (Figura 91) aparece como una serie de núcleos o "cluster" de observatorios que tienden a ocupar los trópicos y las latitudes polares. De manera aproximada podemos distinguir:

- 1) Islas Hawái
- 2) SW EE. UU.
- 3) Isla Ellesmere
- 4) Canarias, península Ibérica
- 5) Turquía y el Cáucaso
- 6) Uzbekistan-Tayikistan
- 7) El Tíbet chino e indio.
- 8) Irán
- 9) Etiopia
- 10) Norte Chile
- 11) Namibia y Sudáfrica
- 12) Australia
- 13) Dome A
- 14) Dome C

Figura 91. Las áreas geográficas donde se hallan los mayores grupos de observatorios terrestres sobre un fondo donde aparece la nubosidad promedio (TCC) entre 1980-2019



Fuente: ERA 5 (ECMWF). Elaboración propia.

Este es un mapa universal donde, sobre el fondo del TCC, aparecen situados los distintos grupos de lugares donde se concentran observatorios astronómicos importantes. Téngase en cuenta que para su selección se ha considerado que dispongan de algún dato sobre registros del seeing. La mayor parte de los observatorios, de los que disponemos de registros de seeing, aparecen claramente enmarcados en zonas de muy baja nubosidad (tonos rojos y naranjas); frente a las zonas cubiertas por nubes con frecuencia (tonos azules y verdes). Para los valores de seeing y técnicas usadas en cada observatorio remitimos a la tabla del apéndice nº 3 de este capítulo, y a las notas someras que aparecen a continuación (apartado 3.2).

3.2 CONTEXTO ESQUEMÁTICO DEL FENÓMENO DE TURBULENCIA

La figura 92 se corresponde con el contexto idealizado, universalmente aceptado, sobre turbulencia y emplazamiento de los observatorios astronómicos. Las variaciones espaciotemporales son bastante diferentes de lo representado, no obstante, nos es muy práctico para situar el contexto de la revisión histórico-geográfica sobre turbulencia y astronomía, expuesta a lo largo del presente capítulo.





Fuente: Elaboración propia.

De manera resumida, la turbulencia sobre un observatorio astronómico, en condiciones nocturnas, se caracterizan por tener varios niveles de turbulencia típicos. En este sentido, cabe hacer notar la influencia de la capa límite planetaria, o inversión térmica planetaria, que raramente excede los 1800-2500 m. En esta capa la turbulencia es muy intensa, y las condiciones de observación astronómica malas, desde un punto de vista de calidad de la imagen o seeing. Es preceptivo que el observatorio se sitúe a mayor altura promedio, bastando, en nuestras latitudes, unos 2.4 Km. sobre el nivel del mar. Esta capa señala también el nivel máximo de las nubes bajas, generalmente con tiempo anticiclónico.

La capa de rozamiento superficial es muy variable, y se puede situar entre los 0-30 m. sobre el terreno. La turbulencia puede ser significativa y, en parte, inevitable, por los obstáculos presentes, como grandes rocas, árboles o edificios. Esta turbulencia se puede propagar a sotavento, a gran distancia de las cúpulas, hasta alturas de 30-200 m. sobre el terreno. Su efecto es grave si se observan objetos celestes que atraviesan dichos estratos turbulentos, pero mínimo si se observa hacia el cenit.

Una capa moderadamente turbulenta, pero de gran espesor, es la "atmósfera libre", que podemos situar entre los 2.4 y 16 km. de altura. Su gran espesor hace que contribuya siempre con un valor significativo al tamaño de disco de seeing, expresado como FWHM. Típicamente la contribución de esta capa puede ser del 50% del total.

Finalmente, puede existir algo de turbulencia en los niveles más altos de la troposfera, entre los 10-16 Km., debidos a vientos asociados a la corriente en chorro en las latitudes templadas.

Mas allá de los 16 km. de altura se ha comprobado que la turbulencia apenas contribuye con un 10-20 % del tamaño de seeing total, aunque es también altamente variable, difícil de establecer y completamente inevitable; aun observando desde aviones o globos a gran altitud. Solo los satélites artificiales, en órbita terrestre o más allá, pueden sortear, por completo, el fenómeno de la turbulencia atmosférica. Respecto a la máxima resolución alcanzable desde la superficie terrestre, podemos decir que no es posible obtener un seeing promedio inferior a los 0.2" arco en ninguna circunstancia (Barletti et al., 1977).

3.3 LA REGIÓN DEL SW DE EE. UU.

Uno de los pioneros en la determinación del seeing y la turbulencia, por métodos de medida "microtermal", fue Coulman (1974). La aplicación de esta técnica estuvo marcada por la elección del lugar para la erección del telescopio solar de Kitt-Peak, en Arizona. Se realizó un estudio de las capas más bajas del entorno inmediato del edificio del gran telescopio solar McMath de 60 pulgadas. De acuerdo con el autor: 1) se deben de considerar diseños cuidadosos y detalles estructurales del edificio del telescopio; 2) es importante tomar en cuenta la turbulencia generada por el mismo edificio durante todo el día, en especial en la abertura del telescopio y el heliostato situado en la cima del mismo; y 3), el calentamiento de las capas más bajas junto al suelo hace que el diseño de los telescopios solares sea un desafío notable, tanto para ingenieros como para astrónomos, que han de lidiar con edificios de estructura singular, y, a veces, notable altura sobre el suelo, tratando de evitar las térmicas superficiales.

Un excelente trabajo pionero es el de Bufton (1975). Este autor sienta las bases sobre las medidas de la turbulencia atmosférica por medio de sensores microtermales a bordo de vehículos aéreos. En su caso, Bufton utiliza el clásico globo sonda, con una estación microtermal y una estación meteorológica convencional, para determinar la estructura de temperatura, cuyo acrónimo es C_T^2 . Este autor consideró un paso a través de toda la atmósfera, desde donde se envían los datos a tierra por radio. La resolución de Bufton es de unos 25 metros en vertical, dada la rapidez del ascenso del globo.

Unos trabajos bastante extensos son los llevados a cabo por Walker (1971, 1983 y 1984). El autor estudia en detalle las condiciones de imagen en el SW de EE. UU y en la cima del volcán Mauna Kea (Hawái). El autor comprobó que existen diferencias en calidad de imagen entre los distintos conos volcánicos de la cima, en especial cuando

el flujo de viento no está perturbado por los conos vecinos. Sugiere, por tanto, reservar los conos de dicha cima para instrumentos que requieran muy alta resolución de imagen. Particularmente favorables encuentra las condiciones del cono NW. También observó que estas diferencias entre puntos cercanos en la cima del estratovolcán Mauna Kea son más evidentes en periodos de seeing mediocre, respecto a condiciones generales de muy buen seeing. Resultados similares obtiene Cayrel (1984), sobre las condiciones de la capa limite sobre Mauna Kea, teniendo en cuenta la dirección del viento y sus efectos en la capa turbulenta, hasta unos 200 m de altura.

Ulich y Davidson (1985), estudiando la turbulencia en la cima de Monte Graham, de 3267 m. altura (Arizona), encuentran poco importante la contribución superficial y capa limite en la degradación de la imagen. Esta observación se sustenta en el análisis de la estructura de variación de temperatura con la altura del lugar, parámetro más conocido como C_T^2 . Obtuvieron un FWHM de solo 0.8" arco para la imagen observada en larga exposición. Más adelante, Egner y Masciadri (2007) determinan la estructura del índice de refracción C_N^2 de la misma cima del Monte Graham. Para ello utilizan un monitor de seeing modificado (G-Scidar), con una buena resolución, de pocas decenas de metros en vertical hasta los 2000 metros, y una resolución más pobre desde este estrato hasta la estratosfera. El inconveniente de este instrumento es que necesita de un telescopio de una apertura media o grande (en este caso 1.7 m de diámetro), y eso no es fácil en condiciones primitivas de campo, o donde existe poca infraestructura logística.

En la misma zona del SW de EE. UU., Harris y Vrba (1992) reportan un seeing mediano de 1.3", para el observatorio Naval de los Estados Unidos (USNO), en Flagstaff, Arizona.

En el célebre observatorio de Mount Wilson, California, Teare et al. (2002), mediante un estudio estadístico del seeing, encuentran que valores por debajo de 1" on frecuentes, para los últimos 80 años. Los autores también evidencian que hasta 1970 los valores son consistentes, pero que a partir de esa fecha se incrementa la dispersión. Los mejores valores se obtienen de julio a septiembre; y el mejor periodo parece coincidir con las décadas de los 30 y los 40 del siglo XX.

En el caso de Sierra Negra, México, Carrasco et al. (2003, 2005) observan que la corriente en chorro a 200 mb. que causa una modulación anual del seeing óptico sobre los observatorios mexicanos de San Pedro Mártir y Sierra Negra. Aunque Sierra Negra es un observatorio de gran altitud (4500m), dedicado a radioastronomía, se ha encontrado que el seeing en el óptico es bastante estable todo el año, con un promedio de solo 0,78" para el 50% de las medidas. Solo excepcionalmente se alcanzan valores excelentes de 0.5". Los autores no encuentran gran diferencia entre integrar 10 o 20 milisegundos en la medida, condicionamiento que si aprecian diferentes autores como Martin (1987), Giovanelli (2001) o Sarazin (2001).

3.4 SEEING EN MAUNA KEA (HAWÁI)

Por su parte, el equipo japonés en Mauna Kea, de Ando et al. (1989), se centran en la búsqueda del lugar para el telescopio "Subaru". Se exploró la cima por medio de medidas microtermales, con estimaciones mediante maquetas modelo, situadas dentro de un túnel de viento, comparándolas con las medidas realizadas en los telescopios ya instalados. Se halló que las condiciones de la cima varían bastante entre unos lugares y otros, y que la escala de altura es de unos 27 metros, con una contribución de 0.1" (segundos de arco) para el seeing, dentro de la capa límite. Según los autores, el seeing mediano (FWHM) se sitúa en torno a 0.94" (segundos de de arco). Al parecer, se hizo un gran esfuerzo en los años anteriores a 1989, para mejorar el seeing de cúpula, que resultó ser prohibitivamente grande al inicio del funcionamiento del observatorio, pues se registraban promedios del orden 2", valor que excedía largamente la contribución de la capa límite del lugar.

También en Mauna Kea (Hawái), McHugh et al. (2008) realizan una serie de sondeos meteorológicos, con globos sonda equipados con sensores microtermales. Estos autores encuentran que, para Mauna Kea, y en condiciones excelentes de seeing, todas las capas contribuyen de manera significativa a la degradación de imagen; y que los datos de las termosondas tienden a dar valores inferiores a los efectuados con el monitor de seeing superficial tipo DIMM. Esto refleja que la termosonda no tiene resolución en los primeros 30 m. de elevación de la atmósfera, precisamente la zona que contribuye de forma más significativa en condiciones de alta turbulencia. Este trabajo es básico a la hora de entender la metodología empleada en nuestras medidas microtermales en diversos observatorios de la península Ibérica.

Abundando en las reflexiones anteriores, sobre el seeing de la capa más superficial en Mauna Kea, Chun et al. (2009) encuentran que la capa más turbulenta se encuentra en los primeros 80 m. de elevación sobre la cima. Además, deducen un seeing mediano de solo 0.42" arco para las capas encima de esta, lo cual demuestra que la mayor parte de la turbulencia es generada de forma natural en las capas superficiales, pero donde también intervienen las cúpulas y su entorno inmediato.

Igualmente, Els et al. (2009), en la campaña de prospecciones para la instalación del TMT (Telescopio de treinta metros), realizan un completo "test", a base de radiosondeos microtermales, sobre cinco lugares, dos en América del Norte (S. Pedro Mártir en México y Mauna Kea, en EE.UU.), y tres en el Norte de Chile (Cerro

Armazones, Cerro Tolonchar y Cerro Tólar). Estos lugares fueron una posible alternativa al telescopio de 30 metros TMT, proyectado inicialmente para Cerro Tololo. Su objetivo era establecer la altura de las capas atmosféricas más turbulentas sobre estos emplazamientos. Se viene a confirmar que estas son las inferiores, quizá los primeros 200 metros sobre los lugares investigados. También existe una contribución, no despreciable, de los efectos de la corriente en chorro en los límites de la troposfera superior. Estos efectos son estacionales y variables, pero inevitables. El flujo turbulento, en las capas bajas, está causado, probablemente, por las irregularidades topográficas del terreno y la dirección del flujo de aire en cada momento. Este último efecto es más manejable o corregible, pues basta con elegir un lugar que muestre superioridad en este aspecto, respecto a un número finito de candidatos, a priori, asequibles. La elevación de las infraestructuras de las cúpulas también es un factor importante, al menos en las primeras decenas de metros de altura sobre el terreno circundante. Si ya existe alguna torre topográfica natural o artificial en la cima de la montaña, debe estudiarse en profundidad, dada su posible ventaja para ubicar los telescopios, aun no estando en la máxima altura de la cadena de montañas próximas. Cada lugar es muy particular en este aspecto, como repetidamente ha quedado demostrado en estudios de seeing dentro de la capa límite o superficial, de los que hasta ahora hemos referido. Bastantes de ellos señalan este efecto diferencial entre lugares próximos a la cima o cerca de ella.

3.5 LUGARES ASIÁTICOS Y AFRICANOS

Asia y África son bastante desconocidos a efectos astronómicos. Nosotros extendemos su amplitud geográfica a toda el área de Asia central, África y Oriente Medio, como lugares de potencial interés para la observación astronómica, en alta resolución y en el infrarrojo. Nuestra apreciación es que se trata de una zona muy extensa y desatendida, astronómicamente hablando. La causa debe atribuirse a la confluencia de diversos factores adversos, como son la logística pobre y la geopolítica, muy inestable.

Autores como Guryanov et al. (1992), de la academia rusa de ciencias, usando una modificación del DIMM clásico, exploraron las montañas de los alrededores de Samarcanda (Uzbekistan). Básicamente, encuentran que la mayor parte de la turbulencia se concentra en alturas superiores a 500 metros sobre los lugares estudiados. No obstante, evidenciaron que existe cierta correlación entre la intensidad de la turbulencia de las capas bajas y la calidad de imagen observada.

Por su parte, los rusos Kornilov et al. (2010) efectúan sus medidas de seeing en el observatorio del monte Shatdzhatmaz (en el Cáucaso). Para ello utilizan una versión

286

del DIMM, llamada MASS/DIMM, elevando el instrumento 6 metros sobre la superficie, por medio de una torre metálica. Deducen varios parámetros de la turbulencia óptica sobre el lugar, y los comparan con otros observatorios importantes. Para este lugar en concreto, la mediana se situó en torno a los 0.96" de arco; y la contribución de la atmósfera libre se estimó en 0.43" de arco. Los autores sugieren que las variaciones estacionales y locales son importantes, y que es necesario realizar campañas astroclimáticas de larga duración, para el establecimiento de nuevos e importantes complejos astronómicos.

Hongshuai Wang et al. (2015) caracterizan, mediante modelos atmosféricos WRF (Weather Research and Forecasting), el C_T^2 en el área del Tíbet, donde se encuentra el observatorio de gran altitud chino de Ali. Estimaron para la zona un seeing de 0.53" segundos de arco, extendiendo el estudio a toda el área próxima al observatorio. Esto nos es más que una aproximación modélica, pero hay que tener en cuenta que la cartografía de una gran área geográfica puede ayudar a determinar los lugares más prometedores, y evitar costosos y largos trabajos de campo. Según nuestras estimaciones, los investigadores chinos tienen intención de alcanzar la cota de los 6000 m. de altitud, en observatorios astronómicos, por lo que sería el observatorio más alto del mundo. Siguiendo el artículo, y las obras del lugar, parecen estar instalándose nuevas infraestructuras a 5400 m. de altitud.

Mekuriaw (2019) presenta las medidas de seeing para un lugar tan exótico, desde nuestra perspectiva, como son los alrededores de Lalibela, en Etiopia, sede de un famoso santuario ortodoxo. En concreto, y para la zona del monte Abune Yousef, los valores encontrados, mediante la técnica del DIMM, son de 0.73" segundos de arco, con episodios de seeing excepcional de 0.32" de arco. Esto confirma que la zona goza de un seeing excelente, y podría ser la sede de algún proyecto futuro de astronomía óptica en una zona del mundo donde, por su latitud y longitud geográfica, no existen observatorios conocidos.

Para el nuevo emplazamiento de un gran observatorio astronómico nacional iraní (INO), en el monte Gargash, Danesd et al. (2019) presentan medidas inéditas de seeing atmosférico, mediante la técnica del DIMM. La larga campaña de 7 años permite establecer, con confianza, los valores de seeing, así como los demás parámetros meteorológicos y climáticos de la zona.

Dhananjay (2014), en la evaluación del sitio para un gran telescopio solar, en Hanle (Tíbet, India), explican de manera extensa como construir sondas microtermales de hilo de cobre, cuál es su electrónica, así como los resultados obtenidos de sus primeras medidas. Estos sensores se montan en pares, separados un metro, a distintas alturas, en una torre de 15 metros, para estudiar los efectos de turbulencia en las capas más bajas sobre el suelo, durante las 24 horas del día. El lugar parece beneficiarse de un seeing excelente, con 0.7" segundos de arco de mediana. El primer cuartil goza de un extraordinario 0.4" de mediana; y el tercer cuartil asciende a 0.8" de arco. Actualmente, continúan los trabajos de evaluación del lugar, en orden a establecer, en poco tiempo, los valores definitivos de los parámetros de turbulencia y demás variables meteorológicas relevantes.

Surendran et al. (2018) describen un sencillo método instrumental para la medida de turbulencia, basado en la estimación de la escintilación o variación del brillo del borde lunar. Todo ello para la caracterización nocturna del observatorio Hanle; concretamente, para usar dicho observatorio para tareas astronómicas. Adicionalmente, realizan comparación puntual con otros observatorios de 1º nivel, mostrando que el sitio de Hanle puede ser un lugar conveniente para un gran observatorio en el norte de la India. Este lugar está próximo a la zona de Ali (China), al que nos hemos referido anteriormente.

Birkle et al. (1976), en un estudio comparativo entre diversas regiones del mundo, estudian el seeing en una meseta elevada, a unos 2400 m., cerca de Gamsberg (Namibia). El método usado fue el de "Stars Trails" y el monitor de seeing fotoeléctrico, también usado en España (en Calar Alto) y en Chile (en La Silla). Los valores obtenidos arrojaron excelentes resultados sobre calidad de imagen, siendo, por tanto, un lugar notable para astronomía, aunque sin desarrollo apreciable desde entonces, por las difultades en logística.

Erasmus (2000) encuentra un seeing mediano de 0.9" de arco para el sitio del observatorio sudafricano, próximo a Johannesburgo. Aquí, las excelentes condiciones meteorológicas hacen viable el lugar, aunque solo está a 1760 metros de altitud. Al situarse en una colina, en medio de una llanura, no muy prominente, las variaciones locales de seeing han sido notables. Han usado una torre de 30 metros con sensores microtermales a varias alturas. Para este mismo observatorio, Catalá et al. (2013) estimaron el seeing con MASS-DIMM. Los autores hallaron un seeing mediano de 1.32" de arco. Además, comprobaron cómo la dirección del viento jugaba un importante papel en este lugar, elevado solo a unas decenas de metros sobre la llanura, y a solo 1768 metros de altitud. Se señala que los periodos de peor seeing se relacionan con un viento de componente SE, típico de los alisios del sur.

3.6 SEEING EN LA ZONA CANARIAS Y PENÍNSULA IBÉRICA

La zona comprendida entre la península Ibérica y las islas Canarias presenta condiciones bastantes heterogéneas en cuanto a lugares astronómicos. Por un lado, las islas Canarias son un emplazamiento casi ideal para observaciones ópticas y, por otro lado, los lugares de la península ibérica pueden ofrecen excelentes lugares tanto en el óptico como en el infrarrojo y el de radio. Los lugares situados en el Atlas marroquí, si bien excelentes, han mostrado una incidencia de polvo sahariano en suspensión; un factor limitante en determinadas épocas del año. Esta anomalía, si bien presente en la península Ibérica, tiene una incidencia mucho menor.

Barletti et al. (1977) son pioneros en realizar vuelos de medidas microtermales sobre Tenerife y sobre isla de la Palma. El objeto fue determinar el mejor lugar para un observatorio solar. Las medidas se efectuaron mediante globos rellenos de hidrógeno, equipados con la electrónica de medida y trasmisión, hasta alturas de 20000 m.

Hartley et al. (1981) estudian el posible emplazamiento de un observatorio en la isla de la Palma, realizando medidas microtermales. Este experimento portaba los sensores sobre un mástil, de unos 8 metros, en la falda norte de la caldera de Taburiente. A través de sus resultados, concluyen que el lugar óptimo se situaría cerca de la cima, pero no en el borde de la caldera. Además, discernieron que, aunque durante la noche disminuye la actividad microtermal de forma notable, se observan algunos picos ocasionales. De la correlación de medidas microtermales, junto con las medidas de Polar Stars Trails, se dedujo un seeing zenital (deducido al zenit) comprendido entre los 0.8" y 1.7" de arco. Debemos indicar que el método de la polar no es muy indicado en un lugar de tan baja latitud, como la Palma, a 28º Norte.

Asimismo, para el observatorio de la isla de la Palma (Canarias), Vernin y Muñoz-Tuñón (1992) encuentran un seeing mediano del orden de 0.69" de arco: valor excelente en el contexto de los grandes observatorios. La técnica usada fue la de Scintillation Detection and Rangging (SCIDAR); un instrumento que puede medir la turbulencia atmosférica y la contribución de las distintas capas de la atmósfera a las cualidades del seeing. Así encuentran que: la capa superficial solo contribuye con 0.082" de arco a su degradación; la capa limite planetaria con 0.5" de arco; y la atmósfera libre, por encima de las anteriores, con 0.4" de arco.

Unos años más tarde, los mismos autores, esto es, Vernin y Muñoz-Tuñón (1995) y Muñoz-Tuñón y Vernin (1996), describen, con profusión de detalles técnicos y operativos, el Differential Image Motion Monitor (DIMM). Con el tiempo, este tipo de instrumento, y algunas variantes, se han convertido en un instrumento estándar para la medida de la calidad de imagen telescópica en campo, donde no se posea aún una gran infraestructura, o donde de manera rutinaria se desea monitorizar el seeing astronómico.

Gurtabai et al. (2013) midieron el seeing a partir del DIMM en las proximidades del telescopio Galileo, en la Isla de la Palma (Canarias, España). Estos autores calcularon una mediana en torno a 0.89" de arco; este valor es solo ligeramente superior al obtenido, también por DIMM, por Muñoz-Tuñón et al (1997). Estos autores deducen, asimismo, la longitud de la escala externa (L_0) de las células convectivas que, por definición, es infinitamente grande y, por tanto, no afecta a las microcélulas medibles con el DIMM, de escasos centímetros de diametro. Por tanto, el DIMM es insensible a los cambios del L_0 .

Birkle et al. (1976) realizaron un trabajo de exploración para estudiar la turbulencia atmosférica en lugares muy diferentes del mundo. En este trabajo, con implicación geográfica, se evalúa la calidad de imagen en montañas de Grecia, España, Namibia y Chile. Se utilizó, principalmente, la técnica del "stars trails" fotográfico; aunque también se empleó un método de estimación impersonal, a partir de medias fotoeléctricas del desplazamiento de la estrella en un pequeño telescopio. Los resultados de ambos métodos son consistentes, y rindieron condiciones comparables entre Calar Alto en España y Pirgaki en Grecia. Ambos lugares, aunque con un seeing promedio muy aceptable, estaban un tanto por debajo de la calidad de imagen que se determinó en Gamsberg (Namibia) y La Silla (Chile). Aplicando el espectro de potencias de Fourier, ven como predominan dos componentes temporales en el espectro de potencia de las series. Concretamente, hallaron máximos relativos en torno a 1 y 10 ciclos por segundo. También para Calar Alto, Elsasser (1991) reporta un seeing promedio anual de 1.5" de arco en el telescopio de 3.5 m. Posteriores informes procedentes del "staff" del mismo observatorio indican que Calar Alto aún puede albergar telescopios de gran apertura (8 m y más), pues el seeing se ha mostrado consistente a lo largo de los años, con un valor mediano en torno a 0.90" de arco (Sánchez et al., 2007). Para esta última determinación del seeing, medido en el exterior, se utilizó un sistema DIMM. Sus estimaciones son notablemente mejores a las establecidas por Elsasser (1991). Ello lleva a suponer un notable efecto de la cúpula del telescopio de 3.5 m, la cual tiene unos 30 metros de diámetro. Por tanto, parece evidente que la misma necesitaría adaptaciones para equilibrar las temperaturas del interior y el exterior del edificio. Adicionalmente, Ziad et al. (2005) encuentran un FWHM para el disco de seeing mediano de 0.92" de arco para las observaciones del monitor de seeing DIMM de Calar Alto (España), para el periodo 2001-2004.

En otro orden de cosas, Granados-Muñoz et al. (2012) midieron la capa turbulenta planetaria sobre la latitud de Granada durante un año. Para ello utilizaron la técnica Light Detection and Ranging (LIDAR), pues a partir del haz de luz láser emitido por el radar es posible medir las partículas en suspensión presentes en la atmósfera mediante la técnica de retro esparcimiento. Evidentemente, el trabajo estaba orientado a estudiar la composición y espesor de la capa de aerosoles. No obstante, este estudio es de nuestro interés para el presente capítulo porque a partir de su información es posible derivar la variación anual de la capa limite planetaria (capa de inversión) sobre nuestra latitud geográfica. Ciertamente, a partir de los datos de radio sondeos adicionales, mostrados en el artículo, es posible inferir la altura de las capas más turbulentas. Los valores promedio, referidos al nivel del mar, fueron de 2.2 Km. en junio y 1.3 Km. en enero¹. Durante el calentamiento diurno la capa de inversión planetaria suele rebasar con mucho el nivel de la capa límite de rozamiento del flujo de aire, aunque, por la noche, es frecuente que la capa de rozamiento esté por encima de la capa límite planetaria. Es un juego diario que solo se rompe en situaciones de mucha inestabilidad atmosférica, por el paso de frentes perturbadores de la circulación de las masas de aire. En este último caso las condiciones de turbulencia suelen están gobernadas por la circulación general atmosférica.

3.7 SEEING EN LUGARES ÁRTICOS Y ANTÁRTICOS

A pesar de la lejanía de los lugares árticos y antárticos, sus larguísimos periodos de obscuridad en la noche polar, y la frecuencia de cielos sin nubosidad, hacen de estos lugares cercanos a los polos sitios de excelente calidad astronómica, especialmente en las bandas infrarroja y de radio del espectro electromagnético. El seeing óptico sufre especialmente los efectos de la inversión térmica de los primeros 30 m. de altura, mejorando, extraordinariamente, a alturas sobre este nivel, en los lugares de Dome A y Dome C.

Steinbring et al. (2013), situándose en el extremo norte de la isla Ellesmere, en el ártico canadiense, y aprovechando la infraestructura de la base científica PEARL, determinan el seeing para el lugar, de solo 610 metros de elevación, situando el medidor de seeing DIMM y MASS DIMM en el techo del edificio. Se midieron valores promedio de 0.85" y medianos de 0.76" de arco. El percentil 20% se situó en 0.53" de arco. Valores excelentes si tenemos en cuenta la altitud del lugar. Los autores estiman que la turbulencia de la atmósfera libre sobre el lugar contribuye con solo 0.3" de arco a la imagen del seeing.

Pasando al Polo Sur, las primeras medidas microtermales con orientación a aplicaciones astronómicas se realizaron desde la base Scott de los EE. UU, en el mismo Polo Sur, a 2880 metros de altitud (Marks et al., 1996). A pesar de lo elevado del lugar, los vientos catabáticos de ladera son lo suficientemente constantes y fuertes para estropear la quietud atmosférica en las capas más cercanas a la superficie. Así, se

¹ No debe confundirse la altitud de esta inversión principal de la circulación general atmosférica de aquella otra más específicamente gobernada por la orografía, llamada "capa límite de rozamiento", que presenta un carácter más local, y que suele ser más delgada, pues, raramente excede de los 600 metros sobre la superficie rugosa del terreno.

sugiere que se debería buscar algún lugar en las partes más elevadas del casquete Antártico, tal vez en las llamadas Dome A, o Dome C, donde se presuponen mejores condiciones a este respecto. En estas fechas aún no se había construido la base francoitaliana de Concordia, que después demostró que, efectivamente, mostraba mejor comportamiento en lo referente a la turbulencia superficial.

Swain y Gallée (2006) deducen el seeing probable en la capa más superficial de Dome F, Antártida. Este es uno de los lugares más elevados, remotos y fríos de la Tierra. Estos autores se basan en un modelo de predicción meteorológica de tipo regional (MAR), y encuentran que aún en este sitio, probablemente uno de los menos perturbados, hay que elevar la infraestructura del telescopio un mínimo de 20 metros sobre el terreno, a fin de evitar las capas más superficiales, afectadas por una potente inversión de temperatura.

Agabi et al. (2006) estudian por primera vez el seeing en la noche antártica desde la base de Dome C, a 3230 m. de altitud. Los valores, largamente esperados por la comunidad astronómica, mostraron que una capa turbulenta de poco espesor, de menos de 30 metros sobre el hielo, era responsable del 87% de la degradación de imagen, de forma que, ya a 8 m. elevación, apreciaron un seeing mediano de 1.3" de arco, y a 30 m. de elevación éste era de 0.36" de arco. Valores ciertamente extraordinarios y muy difíciles de conseguir, por espacios de tiempo prolongados, en latitudes templadas. El método consistió en elevar globos con sondas microtermales en periodos de tiempo espaciados, a través del periodo de obscuridad antártico, a fin de determinar la estructura del índice de refracción del paso atmosférico del globo o el C_N^{2} .

Para el mismo lugar (Dome C), Aristide et al. (2005a-2005b) encontraron, para el periodo de luz solar antárticos, valores de 0.54" de arco a alturas equivalentes a 8-15 m. Éste es también un valor excelente para observaciones con luz solar.

Sarazin (2006) analiza las características infrarrojas e interferométricas de un lugar en la zona templada (Paranal, 24º S) y una zona polar (Antártica, Dome C, 75º S). El autor discute aspectos relativos a las altas exigencias de calidad de imagen para la astronomía. Por ello analiza el seeing mediano y las características propias de cada lugar, a partir del análisis del "tiempo de coherencia" (el tiempo en que la imagen esta cuasi-estática, no desplazada por efecto de la rugosidad causada al frente de onda de la luz estelar, al atravesar capas turbulentas de la atmósfera terrestre).

El equipo chino-australiano de Bonner et al. (2010) mide el espesor de la capa turbulenta en el casquete de hielo antártico (Dome A), a 4090m de altitud. La técnica usada fue el Surface layer Non-Doppler Acoustic Radar (SNODARS). Ésta consiste en el uso de un radar con sondeos acústicos perfeccionados. Durante la mayor parte del año, en el Dome A la capa limite (Boundary Layer) aparece a tan solo 13.9 m. de

elevación sobre el terreno (se alude al valor de su mediana); su percentil 75 se sitúa por debajo de los 19.7 m. de elevación. No obstante, los autores indican que puede haber periodos de mayor altura de la capa turbulenta, sobre todo en febrero, marzo y abril, pues aún hay cierta cantidad de luz solar. Si lo comparamos con los lugares templados de la Tierra, el escaso espesor de la capa límite en esta zona puede considerarse excepcional. Téngase en cuenta que en la banda templada, en el mejor de los casos, la capa limite turbulenta alcanza cientos de metros de espesor.

Por ello, se puede garantizar que elevando la estructura que soporte el telescopio del Dome A, a unos 15 metros (o más) sobre el hielo, se disfrutaría, durante largos periodos de tiempo, del seeing propio de la atmósfera libre. Éste es, típicamente, inferior a 0.3" de arco. Por tanto, aquí, con humedades absolutas próximas a 0, se disfrutarían de unas condiciones óptimas para astronomía infrarroja, asi como para la de alta resolución espacial.

Fossat (2011) presenta un informe (site testing) de diez años de investigaciones sobre la base antártica francoitaliana de Concordia (Dome C). En este caso, se usaron radiosondeos y medidores ópticos de seeing tipo DIMM. Se destaca que la capa superficial turbulenta se encuentra a muy poca altura sobre el hielo (15-60 m.), y que el seeing puede considerarse excepcional sobre esa altura. Se indica que, con frecuencia, las capas turbulentas quedan por debajo de los 30 m. de altura, al menos durante la época invernal. El seeing puede ser tan bueno como 0.29" de arco sobre periodos de 60 horas y a solo 8 m. de altura sobre la superficie. Respecto a las características infrarrojas, se encuentra que esta base tiene notables ventajas, respecto a los mejores lugares de gran altitud en el norte de Chile, siendo posible, incluso, practicar la observación astronómica en ventanas tan problemáticas como las de 200 micras.

Pietroni et al. (2014) también presentan resultados para la base situada en el Dome C (Antártica). En este caso, se estudió la capa límite durante un año, mediante medidores de turbulencia atmosférica, a partir del uso de las microondas. Estas medidas muestran que una inversión potente domina todo el año hasta unos 200 metros de altitud máxima. Esta inversión es menos potente en verano, de solo unos 100 metros; y mucho más patente en invierno, alcanzando los 200 metros de altura. Con todo, lo destacable aquí es que el grueso de la inversión aparece en las primeras decenas de metros. Este hecho es explicable por la fortísima reflexión sobre la radiación solar del hielo. La capa de mezcla desaparece, por tanto, a 15-30 metros sobre el hielo en invierno; lo que podría indicar una gran estabilidad de imagen a partir de dicha altura del suelo, para cualquier instrumento óptico astronómico. Las observaciones se complementaron con una serie de vuelos de globo sonda, equipada con la sonda Vaisala RS 92. Este radiosondeo

presenta una menor adecuación para estudiar los valores de turbulencia de la atmósfera polar en capas muy próximas al suelo, debido a su rápido ascenso vertical.

Yi Hu et al. (2018) encuentran, por primera vez, el nivel promedio de la inversión superficial de temperatura sobre el DOME A (4093 metros, meseta Antártida) en el periodo de noche polar. Sus resultados evidencian el escasísimo espesor de la misma sobre la superficie helada; ésta se sitúa a tan solo 14 m. durante el 50 % del tiempo, y en periodos de hasta 10 horas consecutivas. El seeing estimado ofreció valores óptimos, pues éste puede ser inferior a los 0.3" de arco; valores semejantes a los que caracterizan la atmósfera libre. Por tanto, los autores consideran interesante el hecho de que con cúpulas astronómicas de solo unos 8 metros de altura pueda disfrutarse de valores de seeing realmente bajos, acercándose a los valores de algunos telescopios situados en el espacio.

3.8 LA REGIÓN DEL NORTE DE CHILE

Posiblemente la región del norte de Chile sea la de mayor interés astronómico y con más estudios sobre el seeing local, en base a sus aptitudes para establecer los telescopios gigantes de finales del siglo XX y de principios del siglo XXI. Por lo conocido, y publicado hasta ahora, es la mejor región del mundo para aplicaciones astronómicas en el óptico y en el infrarrojo, siendo solo superada por la Antártida en las regiones de radio submilimétrico e infrarrojo lejano.

Un autor destacado para el caso de Chile es Sarazin (1989). El autor pertenece al equipo del Observatorio Europeo Austral (ESO), y ha trabajado en las cercanías del desierto de Atacama. Aquí se ha instalado el telescopio más potente hasta la fecha: el Very Large Telescope (VLT), perteneciente al ESO. De los lugares investigados, se dedujo que las condiciones más favorables se daban en el Cerro Paranal, de 2650 m., situado en la cordillera costera cercana a Antofagasta (Chile).

Persson et al. (1990), pertenecientes a la Institución Carnegie de Washington, estudian el seeing desde el observatorio de las Campanas, en el norte de Chile. Utilizaron pequeños telescopios para medir con alta frecuencia los desplazamientos del centroide de la imagen. Esta alta frecuencia de medición permite determinar, de alguna forma, el parámetro de Fried, o diámetro de coherencia (r₀), de la imagen. Concluyen que, aunque pequeño, el efecto de los movimientos de alta frecuencia, del orden de 200 a 500 Hz, debe ser tenido en cuenta, si bien, en la práctica, un rango de frecuencias de 2 a 30 Hz es suficiente. El valor mediano estimado fue de solo 0.6" de arco: valor excelente, y pocas veces superado en medidas promediadas.

El trabajo de Giovanelli et al. (2001) puede ser considerado como la guía para comprender las características infrarrojas y de calidad de imagen de los lugares elevados del desierto de Atacama. Estos autores trabajaron en la zona de la meseta de Chajnantor y los volcanes vecinos (Chile), entre 5000 y 5600 metros de altitud. Sus resultados mostraron que, el mejor seeing mediano, de 0.7" arco, se registraba en cerro Chico, a 5100 metros de altura, sobre la meseta citada antes. Los autores sugieren usar este valor como patrón para comparar con el resto de los lugares investigados en la zona. Así, el seeing en la misma meseta donde, actualmente, se aloja el complejo radioastronómico de antenas ALMA es de 1.1" arco mediano; valor que es algo inferior a lo esperado. Desde un punto de vista logístico, se consideran que las dificultades operativas de trabajar a 5000 metros de altitud ya son considerables, y que no siempre está justificado llegar a la máxima altura posible. Es interesante consultar la descripción logística del lugar y sus peculiaridades. Desde un punto de vista geográfico-climático, se señala como la fase negativa del ENSO (El Niño) afecta cada pocos años a las características del lugar, llevando a un empeoramiento de las condiciones generales de nubosidad, calidad de imagen y cantidad de agua precipitable. De todas formas, es difícil imaginar un lugar con mejores accesos y calidad infrarroja para la astronomía, rivalizando, en muchos aspectos, con la astronomía infrarroja que se proyecta para el alto casquete de hielo antártico (Dome A, B, C y F).

Estos autores señalan que, los parámetros como el C_N^2 (estructura de la constante del índice de refracción) no pueden derivarse con precisión para este lugar, por la falta de resolución vertical del radiosondeo clásico. No obstante, indican que las condiciones imperantes en los conos volcánicos que rodean el llano de Chajnantor pueden estar muy cerca de las propias de la atmósfera libre; aunque sobre el llano hay una capa turbulenta de una altitud variable, dependiendo del flujo de viento. Como comparativa, señalan como la capa BL (Boundary Layer) de los meteorólogos se situaría, en promedio, a unos 220 m sobre S. Pedro Mártir (México); a unos 900 m. sobre la Silla (Chile); y a unos 2000 metros sobre Paranal, sitio del VLT de la ESO.

Tokovinin et al. (2003) reportan un seeing mediano de 0.95" de arco en una campaña de tres meses en cerro Tololo (Chile). Señalan como los primeros 500 metros sobre el observatorio dan cuenta, al menos, del 60 % de la degradación de imagen; y que la atmósfera libre da cuenta del resto, con un valor en torno a 0.55" de arco. Se señala que existe una capa turbulenta en los límites de la troposfera, a 15-16 Km altura sobre el lugar. De forma que nunca se obtendría menos de 0.15" de arco dentro de la troposfera.

Els et al. (2009), en la búsqueda de un lugar óptimo para el nuevo telescopio americano TMT, de 30 m de diámetro, miden la turbulencia en distintas zonas de la

montaña de cerro Tololo, en el Norte de Chile. Ellos sitúan sus detectores de seeing MASS-DIMM en pequeñas estructuras abiertas al aire libre, separadas de las cúpulas mayores, y elevadas unos 6 metros sobre el terreno. Sus resultados arrojan un seeing, ya corregido de errores, de 0.79" segundos de arco para el percentil 50.

Travouillon et al. (2011a, 2011b), en la búsqueda de lugares adecuados para el telescopio americano gigante TMT del CALTECH, realizaron distintas pruebas de turbulencia atmosférica con un sondeo acústico SODAR, y con medidas simultáneas a partir de MASS/DIMM en Mauna Kea, San Pedro Mártir, y en lugares del centro y norte de Chile (cerro Tólar, Tolonchar y cerro Armazones). En Mauna Kea se encontró que la contribución a la perturbación del seeing de la capa entre 200 y 500 m., sobre el observatorio, era muy pequeña, respecto a los primeros 200 metros de la atmósfera. El acuerdo entre SODAR y MASS/DIMM fue aceptable para los casos de Mauna Kea y Armazones, con un coeficiente de correlación de ~0.8; pero fue muy pobre para el caso de San Pedro Mártir (México); probablemente debido al ruido acústico introducido por los árboles y los edificios cercanos a este observatorio. En consecuencia, el instrumento SODAR es poco adecuado para la medida de turbulencia en lugares con obstáculos altos y edificios cercanos al instrumento.

Sánchez et al. (2012), dentro del contexto de los datos de seeing para la ubicación del TMT, tomados con DIMM y MAS-DIMM, determinaron una mediana de tamaño de imagen de 0.78" de arco: valor, creemos nosotros, bastante aceptable para latitudes templadas.

En cualquier caso, la decisión final del TMT ha estado y está sujeta a muchos problemas de ubicación, al menos en el hemisferio norte, barajándose la posibilidad de instalarlo en Mauna Kea (Hawái, Estados Unidos), aunque con una fuerte oposición de los nativos, y, quizá, en la Isla de la Palma (Canarias, España), como alternativa.

Cavazzani et al. (2012 y 2017) estudiaron las condiciones del cielo a partir de un modelo predictivo del seeing sobre los lugares de máxima importancia del norte de Chile, como son los sitios del actual VLT y el lugar previsto para erigir el Telescopio Extremadamente Grande (ELT), en el vecino cerro de Armazones. Los autores, para deducir un modelo de turbulencia local, a través de las imágenes de nubosidad y cobertura nubosa, parten de imágenes de satélite del GOES-E, desde 2003 a 2015. Adicionalmente, usaron imágenes del Aqua MODIS, de mayor resolución, para el mismo periodo de tiempo. Aunque los resultados son meramente indicativos, permiten anticipar el seeing probable y así colocar la cola de observaciones en un orden conveniente. Ciertamente, dado lo gigantesco de las aperturas de dichos telescopios (hasta 40 m de diámetro) es imperativo maximizar el tiempo y cualidades de la observación en función de la calidad de imagen. Cavazzani et al. (2014) describen un nuevo método de medida

de turbulencia a baja altitud sobre el terreno. El mismo está basado en un paso horizontal de emisor de diodo láser, que se proyecta en una pantalla a una distancia determinada. Ambos instrumentos pueden montarse a distintas alturas, sobre torres separadas, de modo que permite calcular el parámetro de Fried o r₀, a partir de la estructura de temperatura C_t^2 del paso del rayo.

Thomas Osip et al. (2012) estudiaron las cualidades del cielo para la ubicación del telescopio gigante Magallanes (GMT), en las Campanas (Chile). En su estudio estos autores encuentran un seeing mediano de 0.63" de arco para 2008; y de 0.80" de arco para 2010, ambos medidos con DIMM. Los autores señalan, además, que la turbulencia decrece exponencialmente con la altura, hasta unos 500 metros; y que la dirección del viento juega un importante papel en la estructura turbulenta de los primeros 30 metros sobre el terreno.

3.9 AUTORES TEÓRICOS DEL SEEING Y SUS MODELIZACIONES

La teoría de turbulencia atmosférica es abordada por la termodinámica como cuerpo específico dentro de la rama que estudia los fenómenos físicos del comportamiento de los fluidos. Los orígenes del estudio de la turbulencia hay que remontarlos a las aportaciones iniciales de Reynolds y Richardson (siglos XIX y XX). La información después fue sistematizada estadísticamente por Kolmogorov-Obukhov en 1941 (véase Birnir y Bjorn, 2012). Esta estadística, bastante compleja, da cuenta de la distribución de energía y de la turbulencia en general, y que puede aplicarse a la física de la propia turbulencia atmosférica. Esta sistematización es, por tanto, la base teórica para la medida del seeing astronómico observado a causa de la turbulencia.

Con todo, no es hasta finales del siglo XX cuando se formulan, de manera específica, los desarrollos que sustentan la teoría de la turbulencia atmosférica kolmogoriana. La misma aparece simplificada, en cuanto a sus cálculos, y con la muestra de sus aplicaciones meteorológicas y astronómicas, en los trabajos de Van Zandt et al. (1978, 1981). Estos autores desarrollan el formalismo que se usaría desde entonces en la determinación de los diferentes índices atmosféricos, como son $C_t^2 y C_n^2$. Los mismos definen la estructura de temperatura y presión en un paso vertical atmosférico. Además, atienden a otros índices, y constantes derivables, que llevan, finalmente, a una determinación del FWHM del disco de seeing. Las medidas experimentales se efectúan mediante los radiosondeos meteorológicos de los barridos de radar y sonar; o mediante sondeos microtermales, método éste más preciso y, generalmente, utilizado para determinar el $C_T^2 y C_n^2$ (ver apéndice 1).

Los efectos orográficos de pequeñas colinas o cadenas de colinas sobre la capa turbulenta próxima a la superficie terrestre son estudiados por Van Valin et al. (1982). Experimentalmente, y en simulación de laboratorio, encuentran que estos obstáculos ensanchan y elevan la extensión de la capa de mezcla, determinando un valor mínimo de esta capa sobre el obstáculo de 100-200 metros sobre el llano adyacente, según la forma de este, su extensión y las condiciones locales del viento.

Woolf (1982) pone el punto de mira en la necesidad de medir la turbulencia sobre el primer kilómetro sobre el observatorio astronómico. Define varios aspectos interesantes sobre la localización de observatorios desde el punto de vista teórico, y topográfico, sugiriendo, por ejemplo, el volar con un avión ligero sobre las colinas donde se pretende construir un nuevo observatorio para observar las turbulencias locales. El autor intuye que pueden ser muy diferentes en distintos picos de la misma cadena de montañas, según variables como la exposición y las sombras del viento local.

Moulsley et al. (1982) sugieren comparar las mediciones de globos meteorológicos (que disponen de un solo sensor térmico) con lo que ocurriría según la teoría de C_t^2 . Los autores advierten que los incrementos de temperatura locales, caracterizados por su baja frecuencia y gran duración, se ven muy reforzados con este sistema. Además, discuten sobre los efectos de la convección muy desarrollada cerca de un único sensor. Al respecto, enuncian que, debido al movimiento errático del globo sonda, para frecuencias inferiores a 1 Hz, la energía calculada a partir de un solo sensor es bastante mayor que la estimada con el método del C_t^2 (que se nutre de medidas simultáneas de dos sensores). En consecuencia, este trabajo puede ayudar a acotar los componentes de baja frecuencia presentes en la microestructura de la temperatura de un paso atmosférico.

Un artículo de interés es el de Roddier (1986). En el mismo se realiza una revisión bibliográfica sobre los métodos y el instrumental para estudiar la turbulencia atmosférica. Además, sugiere acercarse al seeing desde el punto de vista meteorológico, y propone estudiar la turbulencia por capas. Para el instrumental de medida aboga por dos modalidades:

- De tipo fijo, mediante sensores que analicen el frente de onda (DIMM, "seeing monitor") y a partir de torres con sensores microtermales a distintas alturas.
- 2. De tipo remoto, mediante globos sonda y sondeos acústicos.

Desde Australia, Coulman et al. (1986) proponen un método de determinación de variación del parámetro del índice de refracción atmosférico, también expresado como C_n^2 . En este caso utilizan un globo meteorológico hasta los 20000 m. de altitud.

Los autores tratan de correlacionar el C_n² con el tamaño de disco de seeing, observado simultáneamente en un observatorio cercano.

Bally et al. (1996) utilizan una variante del monitor de seeing. El denominado como H-DIMM. En lugar de una cuña óptica en las sub-aperturas del telescopio utilizan una máscara de Hartman, que dispone de una gran cantidad de aperturas en la entrada del telescopio. Su objetivo era determinar la distancia a la que se encuentran las distintas capas turbulentas de la atmósfera, para determinar el parámetro de Fried (r₀).

Una variante de monitor de seeing lo tenemos en el Scidar Generalizado de Fuchs et al. (1998). El mismo permite muestrear las distintas capas atmosféricas de manera remota, incluyendo la capa superficial. La técnica un tanto compleja, muestra los intentos de los astrónomos por determinar completamente el comportamiento atmosférico, capa a capa, y su contribución al fenómeno de la degradación de la imagen de los astros.

Wilson et al. (2004) describen nuevas y potentes herramientas de análisis del seeing, como el denominado SLOpe Detection And Ranging (SLODAR). Utilizan máscaras y estrellas dobles para determinar el perfil de turbulencia atmosférica, vía triangulación. Su objetivo es demostrar las posibilidades de los lugares con excelentes cualidades de imagen, como la isla de la Palma (Canarias, España) o los observatorios del norte de Chile. Su orientación está dirigida a la implementación de las técnicas de óptica adaptativa (OA), requerida en los modernos telescopios de gran apertura (4 m. y más).

Racine (2005) desarrolla un modelo empírico de predicción del seeing basado en los datos reales de calidad de imagen (seeing). Para ello toman como muestra 23 observatorios, situados a distintas altitudes y latidudes, con una gran diversidad de localizaciones geográficas. Esto debería facilitar la tarea de la elección de emplazamientos de futuros telescopios, al menos en primera aproximación. Describe con claridad la diferenciación de tres capas atmosféricas, claves a la hora de entender la física y génesis del seeing. El modelo está basado en las condiciones de la Capa Superficial (SL), de la capa límite planetaria o inversión principal (BL) y de la atmósfera libre (FA). De este modelo, y de los datos experimentales, se concluye que la capa (SL) es crítica, y contribuye con un alto porcentaje a la degradación de imagen. Se encuentra además que la escala de altura es de 3.5 m., al menos en los primeros 10 a 15 metros de elevación sobre el telescopio en el terreno circundante al mismo.

Trinquet y Vernin (2006) desarrollan un modelo predictivo del seeing a través de parámetros meteorológicos, recolectados por medio de radiosondeos con globos meteorológicos. Los mismos son equipados con sensores microtermales, deduciendo la

estructura de la atmósfera, en cuanto a la variación de su índice de refracción cuadrático (C_N^2) .

A Tokovinin y Kornilov (2007) podemos considerarlos rigurosos por el formalismo matemático de sus exposiciones sobre turbulencia atmosférica, y su traducción en calidad de imagen o seeing. En un trabajo anterior, Tokovinin (2002) discute todos los pormenores teóricos y técnicos de los medidores de calidad de imagen tipo DIMM. Indica que la mera extrapolación de lo observado a calidad de imagen en forma de FWHM no es trivial. Un resumen completo de las características del seeing y sus formas de medirlo es expuesta por el mismo Tokovinin (2023), haciendo especial distinción entre métodos basados en el desplazamiento de imagen, y aquellos que proponen medir los cambios de intensidad de la imagen estelar observando su centelleo o Scintillation (Baretti et al., 1977 y Beyrich et al., 2021).

Todo esto nos ilustra acerca de la complejidad y dificultad de integrar distintos parámetros atmosféricos para obtener un resultado final deseable por el astrónomo. Nos estamos refiriendo al tamaño y estabilidad de las imágenes de los objetos del espacio exterior. Todo ello a través de un modelo matemático que calcula el valor de seeing, u otros parámetros relacionados con él, como las facetas espaciotemporales del seeing. Para ello hay que efectuar un aporte de datos empíricos, esencialmente aleatorios, y que pudiésemos definir como "ruido atmosférico". El instrumental DIMM es robusto y puede caracterizar las capas bajas de la atmósfera, si bien puede ser poco preciso cuando las condiciones de degradación de imagen provienen de las capas más altas que provocan el centelleo y borrosidad en la imagen, que dificulta la medida de los centroides estelares.

Otro instrumento DIMM es el MAS/DIMM. El mismo ha sido descrito por Kornilov et al. (2010). Básicamente, constituye un instrumento DIMM modificado, pues en lugar de poseer dos subaperturas, separadas unos 20 cm., tiene tres. Con este instrumento, combinando la posición y los cambios de intensidad detectados, es posible reconstruir cómo se muestra la turbulencia atmósferica, al menos en el primer Km sobre el lugar de medición. Las primeras observaciones de prueba se realizaron en el observatorio de Niza y en el Plató de Calern (Francia).

Sheperd et al. (2013) apuntan a que la próxima generación de sistemas de óptica adaptativa (AO) podría requerir reconstrucción tomográfica del índice de refracción atmosférico, de manera bidimensional. Y ello con el fin de reconocer y corregir las fluctuaciones detectadas a lo largo del trayecto de la visión del telescopio. Indican que estas reconstrucciones de variaciones del índice de refracción podrían ser mejoradas con perfiladores externos al propio telescopio. Así, los autores denominan al nuevo instrumento Stereo-SCIDAR. Con el mismo, a través de un sistema óptico estereoscópico, se aprecia la figura de un sistema de estrella doble, incidiendo en dos sistemas ópticos y dos cámaras separadas entre sí. Separar las dos pupilas de imagen tiene varias ventajas, entre ellas un aumento de la relación señal/ruido (S/R), de hasta 16 veces, en el caso de estrellas dobles de la misma magnitud, y mejoras de dicha relación, notables aún, en caso de que la diferencia en brillo del sistema doble sea hasta de 3 magnitudes. Además, puede deducirse el perfil de velocidad de viento en altura sobre el observatorio. El sistema ha sido probado en dos telescopios. Uno de 2.5 m. apertura (NOT) y otro de 1 m de apertura (J. Kapteyn), ambos situados en el observatorio de la Isla de la Palma (Canarias, España).

Un nuevo concepto del DIMM, el llamado GDIMM, fue expuesto por Aristidi et al. (2014). Este es capaz de medir los más diversos parámetros que componen el seeing estelar, como el tamaño de disco de seeing llamado θ , el ángulo isoplanático, llamado θ_0 , el tiempo de coherencia (T₀), así como la escala externa de turbulencia (£₀).

El desarrollo completo de la óptica adaptativa (AO) en los modernos telescopios excede los presupuestos de nuestro capítulo de turbulencia, dado que es un asunto casi totalmente ingenieril. Con todo, nos gustaría apuntar que está directamente relacionada con la calidad de imagen, pues a partir de la misma se trata de mejorar, corrigiendo, precisamente, el error del frente de onda introducido por el fenómeno de la turbulencia atmosférica. Para una mejor comprensión de esta técnica, remitimos al trabajo de Rigaut (2015), que la describe con un nivel para "no expertos". Digamos, además, que esta técnica nació del proyecto de defensa estratégica de los EE.UU en los años 80, estando durante mucho tiempo restringida su difusión. No es hasta el año 1990-2000 cuando comienza a difundirse no solo la teoría sino también los resultados prácticos en astronomía. En la actualidad existen muchas modalidades de OA, algunas incluso para aplicaciones médicas.

4 FUENTES Y METODOLOGÍA

4.1 ORGANIGRAMA DE FLUJO DEL CAPITULO "TURBULENCIA"

Después de la revisión bibliográfica, iniciamos un proceso metodológico (Figura 93) que agrupa varias fuentes de datos: 1) las bases de datos de los propios observatorios astronómicos, con medidas fiables de turbulencia o "DIMM", por el acrónimo del medidor diferencial del movimiento de la imagen; 2) la información registrada por nosotros a través de vuelos con drones provistos de sensores; y 3), los
datos proporcionados por torres meteorológicas con sensores de temperatura de precisión localizados a diferentes altura del suelo.

La tarea persigue la elaboración de una serie de estudio de casos, de los que se dispone de abundante material, presentando gráficos y tablas. En la discusión se abordan algunos de los aspectos más llamativos, derivados de nuestro estudio, y su contraste con los resultados obtenidos de la literatura científica. Esto permite introducir algunas ideas acerca de posibles mejoras en los actuales observatorios de Sierra Nevada, Calar Alto y La Sagra. Finalmente, se presenta unas conclusiones resumidas de lo discutido.

Figura 93. Los elementos principales del flujo de información y tareas en el capítulo de "Turbulencia Atmosférica"



Fuente: Elaboración propia.

La literatura sobre el tema de turbulencia atmosférica, dada su complejidad, ha ido desarrollándose en los últimos 150 años no determinándose, con certeza, en el plano experimental, hasta décadas muy recientes, con la introducción de sistemas de medida impersonal o de tipo electrónico, como son los CCD y los monitores de seeing, también llamados DIMM (Differential Image Motion Monitor). Nosotros haremos un breve recorrido sobre esta literatura y, en ocasiones, se realizará algún comentario aclaratorio, con anotaciones, tanto propias como literales. Este rastreo se remonta en el pasado hasta mediados del siglo XIX, hasta donde la literatura científica nos ha permitido realizar un seguimiento diacrónico.

Durante las décadas de los 60 y 70 del siglo pasado se reaviva el interés por encontrar nuevos sitios astronómicos, con la mejor calidad de imagen posible y que se

pudiesen contrastar experimentalmente entre sí, no solo a través de la fotografía astronómica, sino también a partir de la espectroscopia y la fotometría.

Nosotros expondremos los datos estadísticos del monitor de seeing de los observatorios de Calar Alto (Almería) y del Observatorio de Sierra Nevada (OSN). Los citados observatorios mantienen un archivo con medias diarias de seing desde el año 2001 a 2022. Se pretende también correlacionar la serie del OSN (Observatorio de Sierra Nevada) con el observatorio de Calar Alto. Ello puede dar alguna información de la contribución de las capas bajas, gobernadas por la orografía, y la de las capas altas, dominadas por la situación general atmosférica

4.2 EL DRON: UNA NOVEDOSA TÉCNICA MICROTERMAL PARA LA CAPA LÍMITE

Nuestras medidas microtermales han experimentado un salto cualitativo muy importante al incorporar drones de aficionado de tipo comercial a las herramientas de medición de turbulencia atmosférica. Éstos se han volado con cargas científicas, portando medidores de temperatura de precisión (medidores microtermales), desde el suelo hasta unos 150 m. de altura, aproximadamente. Los observatorios de los que actualmente disponemos de mayor número de vuelos son: 1) el de La Sagra (NE de la provincia de Granada), donde existe un pequeño observatorio astronómico, dependiente del CSIC, donde se han efectuado medidas en dos emplazamientos, situados a 1530 m y a 1800 m; 2) el de Calar Alto, para el que disponemos de medias en tres puntos distintos de la cima, separados entre si alrededor de un Km. Estas medidas están orientadas a localizar los puntos de ambos observatorios con menor turbulencia.

Las pruebas iniciales de construcción de la sonda microtermal se hicieron con prototipos y modelos comerciales (lámparas de 5 a 15 W de filamento de tungsteno sin protección de ampolla de vidrio). Aunque funcionaron, no eran lo bastante robustas para volar continuamente a bordo del dron. Recientemente la introducción de resistencias comerciales de platino del tipo PT1000, que son muy estables y con constantes de tiempo del orden de 1/10 sec., ha abierto la puerta para probar este tipo de sensor, por economía, robustez y fiabilidad.

Si lo comparamos con la literatura, la carga del prototipo de Bufton (1975), pesa 2600 gramos, mientras la nuestra solo pesa 120 gramos. Su sonda alcanza la altura de unos 25 km: la que le permite un globo meteorológico bastante caro, relleno de helio. En nuestro caso estamos limitados a 150 metros, que es lo máximo que permite el control de altura para drones sin licencia. La resolución de Bufton es de unos 25 metros en vertical, dado la rapidez del ascenso del globo; en cambio nuestra resolución en altura es de 1-2 m.

Se han probado diversas configuraciones geométricas y eléctricas. Las más estables parecen ser las sondas multisensoriales, que trabajan bien en un entorno al aire libre, pero sin recibir insolación o radiación del cielo o la tierra de manera directa. Hay muy pocas fuentes que citen a los drones como herramienta de trabajo, al menos en astronomía, aunque se está generalizando su uso en todas las ramas científicas que requieran de medidas rápidas, fiables y económicas. En nuestro caso es prácticamente una novedad el estudio microtermal de la turbulencia atmosférica mediante el uso de drones comerciales de la gama baja de precios (Figura 94). Un dron con una autonomía de vuelo de 20 minutos es suficiente siempre que pueda elevar la carga, que en nuestro caso no llega a 150 gramos de peso.



Figura 94. Imagen del sistema de medida microtermal y el dron

Fuente: Elaboración propia.

Tras una serie de pruebas se optó por el "dron", de tipo aficionado comercial, de ¹/₂ Kg. de peso, que puede elevar unos 250 gramos hasta 120-150 m. de altura. Este tipo de drone puede volar entre 10 y 20 minutos, dependiendo del peso de la carga. Al estar controlados por radio, no dependen de cables, y como el posicionamiento es mediante GPS, el control de altura y desplazamientos es muy preciso.

A 5 metros bajo el dron, y pendiente de un hilo fino, se instala la sonda microtermal. Esta sonda está compuesta de un par de puentes de Wheatstone, separados un metro entre sí en la horizontal. En la parte central de la varilla se instala

la electrónica de preamplificación, convertidor analógico-digital y el emisor de radio (en nuestro caso un transmisor/receptor LORAN, aunque puede usarse cualquier otro sistema como el Wifi). Finalmente, los datos son almacenados en formato txt. en un ordenador portátil, o en un "Data Logger" en tierra. Nosotros usamos un programa de lectura de puerto de serie denominado MTTTY, del que existen varias versiones libres en la red. Como nuestro sistema es un tanto artesanal, integrado por elementos de hardware y software de diversas procedencias, creemos que con estas indicaciones otros investigadores podrán reproducir nuestro sistema o similar, que de alguna forma han de calibrar de manera absoluta, pues las medidas de temperatura son transformadas en voltajes, para amplificarlas, digitalizarlas y transmitirlas. Estos voltajes son archivados en el ordenador receptor. Después pueden tratarse de forma que podamos establecer el nivel de ruido atmosférico, cosa que puede hacerse determinando el RMS de las variaciones de temperatura, para después poder deducir el resto de los parámetros de interés astronómico, como son la estructura de temperatura en un vuelo vertical entre el suelo y las capas bajas de la atmósfera, hasta unos 150 m. de altura.

De los valores de estructura C_t^2 se pueden deducir otros, como el índice de refracción (C_N^2) en cada capa, y aún otros derivables, como el parámetro de Fried (r_0), que nos lleva a un valor aproximado de turbulencia y probable tamaño de imagen observada por el telescopio (Fried,1966).

4.3 SENSOR MICROTERMAL

Suele referirse a un dispositivo que mide las diferencias (milésimas de $^{\circ}$ K) entre dos sensores térmicos, separados una distancia (por norma 1 metro), que toman cada cierto tiempo un par de medidas, que son usadas para derivar parámetros atmosféricos, muy útiles en el estudio de la turbulencia y la calidad de imagen, como es el C_T². A partir de éste se puede obtener el C_N², y desde este último deducir el r₀. Con ello, y solo con la aportación de las medidas microtermales, es posible llegar a un número que nos ofrece, de forma cuantitativa, la calidad de imagen estandarizada y aceptada por la comunidad astronómica: el parámetro de Fried.

Ciertamente, debemos señalar que hay que extrapolar los valores del diferencial microtermal a parámetro de Fried (r_0), con dos pasos adicionales de deducción teórica de la calidad de imagen. Ello puede llevar a que se tengan errores apreciables en la determinación del parámetro r_0 .

Una manera alternativa de soslayar este salto teórico es cruzar los datos de un sistema DIMM, suficientemente calibrado y probado, con los datos microtermales de

torres meteorológicas u otros obtenidos mediante drones o globos meteorológicos. También, en este caso, existe una indeterminación, que solo una muestra estadística robusta de la la atmósfera puede superar.

Después de concienzudos análisis de factibilidad y viabilidad del vehículo portador de la sonda microtermal, nos decantarnos por utilizar un dron ligero de I/2 Kg de peso, capaz de elevar una carga de unos 250 gr. sin dificultad, hasta unos 150 metros de altura.

Considérese, que el globo cautivo de látex de 90 cm. no resultó viable, pues es arrastrado por el viento y le cuesta muchísimo elevarse. En consecuencia, se descartó desde los primeros ensayos.

4.4 NUESTRO PROCESO DE CALIBRADO

Debido a la escasez de medios de laboratorio especializado, el proceso de calibración fue bastante artesanal, consiguiéndose, no obstante, una calibración aceptable. En concreto, nosotros usamos, como referencia, dos termómetros de tipo industrial, de pantalla digital. Se registraron pares de valores, en milivoltios, entre las sondas microtermales de tipo PT 1000 (separadas un metro entre sí) y dichos termómetros. La temperatura se varió artificialmente mediante una fuente controlada de calor en la caja negra, donde estaban alojados, en un extremo de la varilla de 1 m., el sensor PT1000 y el termómetro calibrado industrial con pantalla digital. A esta caja negra la llamaremos el "polo caliente". En el otro extremo de la varilla situamos el otro sensor PT1000 y otro termometro digital calibrado (se colocan a temperatura ambiente pero estabilizada). A este otro extremo se le llamó "polo frio". En este caso no debe variar de temperatura. Las lecturas voltimétricas en el circuito de salida del puente de las PT1000 son entonces fácilmente correlacionadas con los diferenciales de temperatura de los dos termómetros digitales calibrados, situados, como se ha indicado, en los polos caliente y frio (Figura 95).

Se deben tener dos medidores idénticos. En este caso, podemos trabajar con un lado de la sonda, a temperatura ambiente del laboratorio, cerca de uno de los medidores que apunta a una pantalla negra; y la otra sonda a calibrar, la alojamos en una caja negra, con una resistencia, en la que introducimos calor adicional de forma controlada. Se dispondrá, en este caso, de una pantalla negra (cuerpo negro dentro de la caja), sobre las que hacer las medidas de la temperatura real de la caja. Este método de calibrado es más rápido e, igualmente, preciso, siempre que se consideren variaciones de al menos 2 °C, en el rango de medida. Esta variación viene gobernada por la escala de valores de nuestro amplificador y convertidor analógico/digital, que en nuestro caso

era de 2.0 V. La conversión de voltaje de la salida del amplificador de las PT1000 a temperatura en ^oC. viene gobernada por la pendiente hallada en la mejor línea de regresión, que en nuestro caso fue de:

$$y = 3.0069x - 0.528 \tag{1}$$

Siendo "x" el voltaje medido en la salida del amplificador de las resistencias del par PT1000; e "y" los valores diferenciales en °C, medidos por los termómetros digitales de tipo comercial industrial, cuya precisión absoluta es de 0.1 C. Como R² fue próximo a 1, el proceso de calibración debe darse por bueno. Ello está de acuerdo con las especificaciones eléctricas de las PT1000, cuyo coeficiente de variación de resistencia es del orden de 3.9 ohmios/°C. En nuestra disposición instrumental 1 V de variación equivale aproximadamente a 3°C, siguiendo la Ley de Ohm V=R*I.

El mejor ajuste, entre los termómetros calibrados en laboratorio, de tipo industrial, y los sensores microtermales, de respuesta desconocida, se ajustan a un modelo lineal, dentro de un rango muy amplio de valores. Por ello se consideró que el resistor de platino PT 1000 era ideal para nuestro propósito (Figura 95).



Figura 95. Ajuste lineal entre los termómetros de tipo industrial y los sensores microtermales

Fuente: Elaboración propia.

4.5 LA TORRE CON SENSORES MICROTERMALES DEL OBSERVATORIO DE LA SAGRA

La torre microtermal, con una sección de 10 cm de lado, y 12 metros de altura, cuenta con sensores a diferentes niveles cerca del suelo. Este sistema de medición es el complemento ideal para los vuelos con globos o drones, que llegan más arriba, dentro de la capa límite. Sus sensores, igualmente, están calibrados, de acuerdo con el modelo de regresión mostrado en la figura 95. Como la torre y los sensores han de soportar severas inclemencias meteorológicas durante largo tiempo, debe prestarse especial atención a la robustez y calidad de los sensores microtermales que, en todo caso, deben poseer la menor cantidad de masa posible, para poder discriminar, con alta frecuencia, la variabilidad térmica de las células de aire pasantes.

Figura 96. Torre con sensores microtermales utilizada en nuestra investigación y situada en la Sierra Montilla (1800 m)



Fuente: Elaboración propia.

Nuestro observatorio microtermal experimental se ubica en el observatorio astronómico de La Sagra (Figura 96). El mismo está situado en una ampliación del actual observatorio, justo 1 km al norte del mismo, y a una altitud de 1800 m., en la cima de la loma de Montilla, próxima al pico de La Sagra. Una montaña aguda, pero con una cima larga de unos 500 m., lo que la hace proclive a permanecer cerca de la atmósfera libre, que se caracteriza por tener una baja turbulencia, y estar poco afectada por lo que se denomina "turbulencia de la capa limite" o BL. Los sensores microtermales se ubican a 3, 6 y 12 m. de altura sobre el suelo. Las mediciones se complementan con la instalación de una estación meteorológica automática y los equipos de comunicación del obsevatorio (Figura 96).

La loma donde está instalada la torre sigue una orientación W-E. Dicha orientación permite que los vientos dominantes la ataquen por su perfil de menor sección superficial, con lo que la circulación atmosférica se ve poco entorpecida, generándose poca turbulencia por efecto del terreno.

En este mismo lugar, a partir de vuelos con dron con sensores microtermales se ha observado, durante los años 2020 y 2021, que las condiciones de turbulencia son muy favorables, y enteramente comparables a los observatorios astronómicos de Calar Alto y Sierra Nevada.

5 RESULTADOS Y ESTUDIO DE CASOS

5.1 NUESTRO TRABAJO DE INVESTIGACIÓN SOBRE TURBULENCIA: EL MARCO GEOGRÁFICO

La figura 97 muestra la disposición de los puntos de estudio donde se han realizado los registros de microturbulencia con drones, y otras técnicas de medida, en el SE de la península Ibérica.





Fuente: Elaboración propia.

En la figura 98 se indican de manera detallada las localizaciones de los puntos de medida de la turbulencia microtermal en el entorno del observatorio de Calar Alto. Se indican las localizaciones de los vuelos con dron (en rojo) y la situación del observatorio (en amarillo). Su estructura fisiográfica, en forma de montaña alargada, con ocasionales elevaciones relativas, facilita la instalación de numerosas cúpulas astronómicas, actuales o futuras.

Figura 98. El entorno geográfico del observatorio de Calar Alto (Sierra Filabres,

Almería)



Fuente: worldview.earthdata.nasa.gov/

En la figura 99 se destacan los puntos donde se han efectuado estimaciones del seeing en el entorno de La Sagra. El relieve abrupto, del macizo de la Sagra, destaca, sobre las demás elevaciones de la subbética del SE de la península Ibérica, por su mayor elevación, cercana a los 2400 m. En la misma figura, se indican, en círculos rojos, los lugares donde se han efectuado vuelos del dron para medidas microtermales; mientras que aparece en amarillo la localización de la cima de la Sagra, donde no se dispuso de medidas directas con el dron, debido a las exigencias logísticas.



Figura 99. Entorno geográfico de la Sierra de la Sagra y los puntos de observación microtermal

Fuente: worldview.earthdata.nasa.gov/

En nuestras investigaciones sobre el seeing astronómico hemos pasado por varias fases, sobre distintos lugares, para la localización óptima del observatorio, y aplicando varios métodos, que podemos resumir, temporal y espacialmente, desde los años 70 del siglo pasado.

Las primeras apreciaciones fueron de tipo visual en Sierra Nevada. Las mismas se desarrollaron en la década de los 70, aplicando las conocidas escalas visuales de Danjon o de Pickering, tomando anotaciones sistemáticas del aspecto de las imágenes de las estrellas, en un reflector de 32 cm. de diámetro y larga longitud focal. De estas observaciones se deduciría hoy un valor promedio que oscilaría, según las noches, entre 0.5 y 1.5" arco, para el observatorio inicial del IAA (Instituto de Astrofísica de Andalucía), en el Mojón de Trigo, Sierra Nevada, a 2615 m de altitud.

Durante los años 1983-1987 efectuamos varias observaciones fotográficas nocturnas, de tipo "Star Trails", para Pico Veleta, en Sierra Nevada, a 3400 m. de altitud. Su posterior calibración, en el observatorio Greenwich (Reino Unido), llevó a la conclusión de que el seeing observado, en algunas pocas noches, fue de 0.9" de arco, aunque con notable oscilación, de entre 0.5 y 1.5" de arco.

Entre 1981-1987 también centramos nuestra atención en la montaña de La Sagra, al NE de la provincia de Granada, con una altitud máxima de 2,383 m. Aquí solo realizamos una decena de mediciones nocturnas con observaciones visuales, con telescopios reflectores, Newton de 150 y 200 mm. de apertura. Las focales de 1200 mm.

permitieron apreciar un seeing visual de calidad extraordinaria, observando los planetas, aun a baja altitud. Se pudo apreciar que el seeing seria comparable a 0.5" de arco, si se efectuase con un sistema DIMM estándar. Solo existen informes mecanografiados de esta época, que nunca llegaron a publicarse. No obstante, si nos atenemos a criterios topográficos, posiblemente tengamos en La Sagra un equivalente al Pic du Midi (Pirineos franceses), donde, con frecuencia, se ha reportado un seeing inferior a los 0.5" de arco (Peach, 2017). Por consiguiente, nos estamos refiriendo a un nivel de calidad de imagen igual o superior a los mejores observatorios astronómicos hoy existentes en Chile, y comparables, en cierto modo, a las imágenes del telescopio espacial HUBBLE.

Posteriormente (1994-1995) también se investigó preliminarmente, de forma visual, la calidad de imagen en el Pico Javalambre, Teruel. Aquí después se llegaría a instalar un moderno observatorio, y se efectuaron pruebas de seeing DIMM con valores en torno a 0.7" de arco (Moles et al. 2010). En esta época primaba la suposición de que la topografía jugaba un papel predominante en la calidad de imagen, como, en efecto, el tiempo y pruebas más objetivas, como el DIMM o los sensores microtermales, nos han demostrado.

En 2012 se estudió, de manera muy preliminar, en una corta campaña, de 15 noches, el seeing de los montes próximos a la localidad de Inazares (Murcia). Se utilizó un sistema DIMM, desarrollado por Aceituno (2007), similar al existente en el observatorio de Calar Alto y el observatorio de Sierra Nevada.

Solo muy recientemente (2018-2022) hemos desarrollado un sistema de mediciones microtermales. Este sistema se ha instalado en torres fijas o en drones. Este último sistema permite caracterizar con pocas semanas de medidas los mejores lugares disponibles en un área concreta. Ciertamente, con el vuelo de drones se pueden detectar con rapidez los efectos de los más mínimos cambios inducidos por las características topográficas. Se han realizado medidas hasta 150 m. de altitud sobre la superficie (capa SL). Por encima tenemos el resto de la capa límite (BL), hasta unos 1000 metros de altitud sobre la superficie y, más externamente, la capa libre (FL).

BL y SL pueden llegar a contribuir con un 50% a la turbulencia total en superficie; de ahí la necesidad de tener una SL con la menor perturbación posible; y de ahí la necesidad de conocer lo que sucede en la misma (sus niveles de turbulencia).

Ya cerrado este trabajo (2024), estamos implementando sistemas de medidas de calidad de imagen de tipo DIMM, y también mediante técnicas de centelleo (Scintillation) para el observatorio de la Sagra y Calar Alto. Este sistema es previsible que se extienda a otros lugares, tras un periodo de calibración y depuración instrumental y operativa.

Los observatorios y puntos de control donde se han efectuado vuelos con el dron aparecen en la tabla 7. Estos se sitúan en un amplio rango de altitudes, principalmente en el SE de la península Ibérica. Esto ha llevado a poder determinar unas características medias (RMS °C) para cada lugar y para los 150 m. sobre el suelo. Se puede observar que, en efecto, la altitud es un parámetro relevante, y que el seeing FWHM probable, de todo el paso atmosférico, también parece estar influido por dicha altitud (ver Figura 100).

	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	RMS Nº	RMS º C	SEEING
Observatorio				PERFILES		FWHM
LA HITA (TOLEDO)	39º 34′ N	3º 11 ′ W	670	4	0.0391	~3
H. SANTILLAN	37º 14 N	3º 31′W	1120	7	0.0228	~2.2
(GRANADA)						
CALAR ALTO	37º 12′ N	2º 33′ W	2168	20	0.0129	1.2"
(ALMERIA)						
OBSV. SAGRA	37º 58′ N	2º 34′W	1530	40	0.021	2.1"
(GRANADA)						
MONTILLA	37º 59′ N	2º 34'W	1800	18	0.0134	1.2"
(GRANADA)						
CIMA SAGRA	37º 57′ N	2º 34 W	2383	EXTRAP.	0.0082	~0.7"
(GRANADA)				18		
PUERTO LOSA	38º 0′ N	2º 35′ W	1750	2		~1.7"
(GRANADA)						

 Tabla 7. Puntos de observación microtermal, con indicación de sus características y principales resultados obtenidos

Fuente: Elaboración propia.

5.2 CORRELACIÓN ENTRE LA ALTITUD DEL OBSERVATORIO Y EL SEEING (MEDIANA TOMADA DE NUESTRO ESTUDIO DE CASOS Y DE LA LITERATURA)

En la figura 100 es posible observar cierta dependencia entre la altitud del observatorio y su turbulencia, expresada en segundos de arco, en promedio anual y deducido al cenit.



Figura 100. Correlación encontrada entre las medianas de seeing reportadas en la literatura y las derivadas de nuestro estudio de casos

Fuente: Composición del autor a partir de Racine (2005).

Hay que considerar que esta baja correlación puede ser explicada porque no se ha tenido en cuenta la latitud geográfica y la altitud de los instrumentos de medidas sobre el suelo. Esta última variable también ejerce una notable influencia, por lo que esta aproximación es solo dependiente de la altitud del propio observatorio. La escala de altura resulto ser de unos 1870 m., no muy alejada de la escala de altura de 1200 m. (Figura 101) que nosotros hemos determinado para el RMS de las variaciones de temperatura, en los estratos bajos de la capa límite atmosférica, en diversos observatorios de la península Iberica. En principio, la altitud sería la variable explicativa más importante (véase Racine, 2005)

El seeing en superficie es muy dependiente de la dirección y fuerza del viento, asi como de su rafagosidad; factores todos ellos modulados por la topografía del terreno. Este modelo debe encontrar el mejor lugar posible, aunque, en la práctica, las limitaciones de todo tipo pueden hacerlo no aconsejable. La logística juega también aquí un papel adicional a considerar posteriormente.



Figura 101. RMS °C. de los estratos de los observatorios donde se han efectuado medidas microtermales con drones

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la escasez del número de vuelos en algunos de los lugares citados (Tabla 8), podemos considerar suficiente este ajuste. La línea de ajuste ofrece una primera aproximación a su probable RMS atmosférico con solo conocer su altitud, y considerando la zona de la península Ibérica. La escala de altura para el RMS °C es del orden de 1200 m., aplicable hasta unos 3000 m de altitud, cubriendo todas las posibilidades de los lugares de nuestra región.

De los valores de la integral de cada lugar es posible derivar el diámetro de imagen FWHM (ver fórmulas del apéndice 1).

5.3 SEEING DIMM SOBRE CALAR ALTO (CAHA) ENTRE 2001-2023

La serie mostrada en la figura 102 apenas ha sufrido variaciones, aún considerando periodos decadales. Los valores medianos se mueven dentro de sigma+/-1. Con estos valores puede estimarse, razonablemente, que el valor absoluto del seeing FWHM es de 0.93" de arco, y que está bien establecido para este observatorio astronómico.



Figura 102. Seeing mediano (en promedio anuales) sobre Calar Alto (2001-2023)

Fuente: Observatorio astronómico de Calar Alto. Elaboración propia.

5.4 HORAS NOCHE Y NÚMERO DE CASOS DE MÁXIMO SEEING EN CALAR ALTO

Los episodios de máximo seeing o turbulencia (Figura 103) parecen concentrarse en torno a medianoche. Se ha tomado una muestra aleatoria de noches, con registros completos entre los años 2001-2003. Estos episodios parecen estar relacionados con el momento en que la capa de inversión térmica atraviesa el nivel de altura del observatorio de Calar Alto. En ese momento se produce también un salto brusco de temperatura, de 1.5 a 3ºC, apareciendo, posteriormente, un periodo de relativa tranquilidad, con mejor seeing y condiciones de temperatura y humedad más estables. El mismo comportamiento se ha observado para todo el periodo estudiado en este observatorio (2001-2023).



Figura 103. Dependencia horaria de los episodios de degradación del seeing DIMM durante la noche en Calar Alto

Fuente: Observatorio astronómico de Calar Alto. Elaboración propia.

Nosotros hemos observado como es bastante frecuente, sobre todo en verano, que el paso descendente de la capa de inversión térmica, que se sitúa entre los 1500 y 2500 m., afecta negativamente, con saltos bruscos de la calidad de imagen, cuando realmente las capas de muy diferente temperatura y humedad se sitúan a un nivel justo del observatorio, a 2170 m. La hora de estos pasos se sitúa en torno a las 00 UTC. Aunque puede ocurrir en un intervalo de +/- 3 horas en torno a la medianoche UTC. De no mediar algún otro efecto artificial, la anterior parece la interpretación más plausible, toda vez que el brusco descenso de la inversión provoca un momentáneo diferencial de temperatura entre células de aire adyacentes, que se manifiesta en un "bump", de más o menos longitud temporal, y de profundidad variable. Este efecto ya ha sido señalado por otros autores como Martin (2000) para Cerro Paranal, sin que exista una explicación convincente del fenómeno.

Se observa una alta frecuencia de noches con valores entre 0.76 -0.96" de arco (Figura 104). La frecuencia de mal seeing (> 1.5" arco) es muy exigua. Ello permite tener buena calidad de imagen la casi totalidad de las noches despejadas. Estos tres años, coinciden con una época de peor seeing relativo, al periodo completo 2001-2023.





Fuente: Elaboración propia a partir de CAHA

Adicionalmente, y ateniendo a los resultados obtenidos por Birkle et al. (1978), para el seeing de Calar Alto (1969-1972), en términos de desplazamiento de imagen, obtendríamos alrededor de 0.71" de arco. Tras sucesivas transformaciones de sigma (σ), se deduce un valor de 1" de arco, homologable a lo que se ha obtenido con el sistema DIMM, aunque el método empleado fue muy diferente, tratándose de trazos de estrellas como la Polar. Por ello, entendemos que hace 50 años el seeing sobre el observatorio era quizá un 10% inferior al actual, dentro del margen de error esperable en este caso.

Alternativamente, una elevación de la capa de inversión planetaria, y el aumento de temperatura, o su fluctuación nocturna con oscilaciones decadales, también podrían explicar parte de este pequeño incremento del seeing (ver Ziad et al., 2005).

5.5 CORRELACIÓN DEL SEEING DIMM DE CALAR ALTO CON LAS MEDIDAS MICROTERMALES EFECTUADAS MEDIANTE DRONES. PRIMERA APROXIMACIÓN

A pesar de que el nº de noches en que se han realizado medidas simultáneas es muy escaso (Figura 105), parece apuntarse una cierta correlación entre las series de medidas de seeing DIMM y nuestras medias microtermales, tomadas con dron en las inmediaciones del instrumento DIMM.



Figura 105. Calibrado DIMM/RMS microtermal (dron) sobre Calar Alto

Fuente: Elaboración propia.

Estas primeras medidas simultáneas indican que es necesario considerar nuevas campañas de medición para la determinación del seeing, para mejorar la calibración del sensor microtermal instalado en un drone. Así se podrían obtener medidas con el sistema de vuelo de drone allí donde no se disponga de medidor DIMM. Ciertamente, una vez dispuesta esta calibración con suficiente robustez, podremos considerar a los sensores microtermales, a bordo de drones, como una herramienta predictiva, rápida, eficaz y económica para determinar el seeing en los lugares deseados.

5.6 EL SEEING EN EL OBSERVATORIO SIERRA NEVADA (OSN) Y CALAR ALTO

En la figura 106 se observa una notable discrepancia entre la tendencia media anual de ambas series de datos; y ello a pesar de que se consideran los mismos años, el instrumental es idéntico y sólo media una distancia entre ambos de 100 km. Además, estos instrumentos DIMM estaban calibrados entre sí.



Figura 106. Comparativa de dos décadas entre el seeing mediano de Calar Alto y el del observatorio de Sierra Nevada (OSN)

Fuente: OSN (IAA/ CSIC) y observatorio astronómico de Calar Alto. Elaboración propia.

5.6.1 Posibles explicaciones

Los efectos del seeing en los niveles altos de la atmósfera parecen poco determinantes. Por ello planteamos varias hipótesis que pueden ser explicativas de las diferencias encontradas: 1) efectos locales en la variación anual y tendencial del seeing en ambos observatorios; 2) efectos producidos por cambios en la ubicación de los medidores del seeing DIMM; 3) efectos locales del terreno frente a la dirección del viento. Puede ocurrir también que sea una interacción entre las posibles causas indicadas arriba.

En el caso de Sierra Nevada se observa un primer periodo algo más turbulento, que va desde 2003 a 2009, y un segundo periodo de mejor calidad de seeing, comprendido entre 2010 y 2020.

En todo caso, en Sierra Nevada, con una mediana de solo 0.77" de arco (FWHM), aparece una tendencia decreciente del seeing en las dos últimas décadas; mientras que en Calar Alto, por el contrario, observamos una notable estabilidad, con una mediana en torno a 0.93" de arco para el FWHM. Un mínimo relativo en ambas series ocurriría en torno a 2010. Este quizá si fuese achacable a efectos de la circulación general atmosférica, involucrando todas las capas hasta el nivel del Jet-Stream.

La conclusión es que la determinación y caracterización del seeing de un observatorio no es una tarea simple, pues intervienen múltiples variables, por lo que se necesitan décadas de observaciones con instrumental calibrado. Solo asi pueden aparecer tendencias claras y ciclos de gran amplitud temporal. Adicionalmente, debe llevarse un cuidadoso filtrado de fenómenos que ocurren en los primeros 30 metros sobre la superficie, los cuales pueden degradar, sobremanera, la calidad de imagen. Estos fenómenos pueden tener origen artificial, y son comparables al conocido "seeing de cúpula". Si se dan estas circunstancias los valores de seeing obtenidos no serían concluyentes para definir la calidad de imagen de un observatorio que situe sus telescopios sobre una altura razonable sobre el terreno circundante.

Tanto en el OSN como en el Calar Alto los DIMM están situados a unos 2 m sobre el suelo. Eso se ha mostrado insuficiente, y nosotros hemos tenido que hacer un análisis exhaustivo sobre los datos superficiales, en (Raw), ofrecidos por el DIMM de Calar Alto. Aunque no en todas, en un parte de las noches, hubo que aplicar un factor de corrección del 25%. Por el contrario, apenas se han eliminado noches claramente anómalas de nuestra estadística, siendo estas menos del 2% del total. Por ello, consideramos que nuestro filtrado es más bien conservador. Si se descuenta el efecto perturbador de los primeros 30 metros encima del medidor DIMM, podemos deducir que la mediana absoluta no debería de diferir apenas de aquella de Sierra Nevada, debiéndose situar en torno a los 0.8" de arco. En todo caso, e idealmente, situando el medidor de seeing DIMM a una altura generosa sobre el suelo (6-12 m), y evitando todo obstáculo o fuente de calor cercana. Sin estos requisitos los medidores tipo DIMM están muy afectados por los fenómenos de turbulencia de las capas muy cercanas al suelo, no digamos de la presencia de edificios, con frecuencia calefactados. Ello queda puesto de manifiesto en nuestros vuelos efectuados con el dron en este observatorio. Ello también se desprende de las medidas de microturbulencia de las torres microtermales en La Sagra, a niveles de 3 y 12 m sobre el suelo, que se exponen en epígrafes posteriores de este capítulo.

5.7 MEDIDAS VISUALES EN LA CIMA DEL PICO DE LA SAGRA

Solo se dispone de informes propios del autor recabados mediante observaciones visuales en verano durante varias noches de los años 1981-1983.

De las estimaciones sobre observaciones planetarias con reflectores de 15 y 20 cm. de apertura (Figura 107) se pudo estimar que, aún a distancias cenitales de más de 70º, la imagen no presentaba oscilaciones apreciables con aumentos mediante ocular de unos 150-200X. Esto sería compatible con un seeing FWHM <<1" de arco.

Figura 107. Una instantánea a modo de "selfie" en agosto de 1982 con el autor en la cúspide de la Sierra de la Sagra, (2383 m.), poco antes de anochecer, para efectuar medidas de seeing



Fuente: Elaboración propia.

Desgraciadamente, la logística del sitio, bastante difícil, y los intereses institucionales, no han permitido realizar más medidas en los últimos 40 años. Si, esto es ciertamente lamentable.

5.8 EL CASO DE INAZARES (MURCIA). UNA APROXIMACIÓN A LAS CONDICIONES A LUGARES DE INTERÉS ASTRONÓMICO DE MEDIANA ALTITUD

En la figura 108 mostramos los resultados de una campaña de dos meses de medidas de seeing DIMM efectuados a una altitud de 1550 m en las estribaciones de la Sierra de los Odres, cercana a la Sierra de La Sagra. Aunque la muestra es escasa, da una información relevante acerca de las condiciones favorables de la zona para la observación astronómica. En este caso, ello se acompaña con facilidades logísticas y cielo casi libre de contaminación lumínica. El valor más probable de esta muestra está en ~ 0.9" de arco FWHM, con un error del 5-10 %, como máximo. Su escasa distancia a la Sierra de La Sagra, refuerzan la evidencia de las pruebas en favor de las ventajas de esta zona. Aunque este lugar está a una altitud 900 metros inferior al Pico de La Sagra, aún es posible extrapolar que las condiciones que podrían esperarse en la cima de La Sagra (2383 m) serian de un seeing probable entre ~ 0.5-0.7" de arco. Ciertamente, entre los mejores del mundo, según la bibliografía.



Figura 108. Test de medidas de seeing DIMM en la localidad de Inazares (Murcia)

Fuente: Informes personales cedidos por. J. Luis Ortiz y Francisco Aceituno. Elaboración propia.

5.9 EL OBSERVATORIO DE LA HITA (TOLEDO). UN CASO A BAJA ALTITUD EN LA MANCHA

Nosotros hemos encontrado valores promedio anormalmente altos de RMS desde la superficie hasta 100 m. de altura, donde la capa límite superficial parece dar paso a un régimen de atmósfera libre. Como solo disponemos de 4 vuelos con instrumental microtermal, concretamente correspondiente a los días 8-9 diciembre de 2018, es muy prematuro dar un valor de seeing para este observatorio. Ello sugiere que las condiciones en llano, a una altitud modesta (600 m), no parecen, "a priori", ser favorables, debido a que las inversiones nocturnas son muy potentes, máxime en invierno con tiempo anticiclónico. Ello sugiere que al menos un observatorio en los llanos de la Mancha (España) debe de buscar una ubicación en algún promontorio sobre la llanura. Nosotros estimamos que éste debe ser de al menos 100-150 m. Este sería un tópico de investigación sobre calidad de imagen astronómica que habría que desarrollar, siempre y cuando exista causa científica.

5.10 LOS PROYECTOS EN CURSO SOBRE MEDIDAS DE SEEING EN EL OBSERVATORIO DE LA SAGRA Y CALAR ALTO. AVANCE DE PRIMEROS RESULTADOS

En el ajuste exponencial de la figura 109 se utilizó el conjunto de 17 vuelos con drones efectuados en 2020 y 2021, cercanos al observatorio de Calar alto. A partir de los 50 m. de altura las condiciones son excelentes respecto a la turbulencia atmosférica. No obstante, los niveles inferiores a esta altura se ven bastante afectados por los efectos orográficos de la cima de la montaña, y la propia estructura de los edificios de las cúpulas astronómicas, algunas de ellas de gran tamaño y altura. De acuerdo con la calibración del sensor microtermal a bordo del dron y el DIMM (Figura 105), deberíamos tener un seeing mediano de ~1.2" de arco, según un RMS de 0.0129 °C. Se ha considerado la integral de todas las capas de los sondeos microtermales y de todos los vuelos efectuados. En la integral de RMS se ha descartado la capa de medida de menos de 2.5 m. sobre la superficie, por el ruido térmico de la propia superficie del terreno.



Figura 109. Perfil del RMS °C promedio para el emplazamiento del observatorio de Calar Alto (Almería)

Fuente: Elaboración propia.

El mejor ajuste exponencial para el perfil microtermal del conjunto de 14 vuelos realizados con drones entre 2020 y 2021 en el observatorio de la Sagra se muestra en

la figura 110. A partir de los 30-50 m de altura las condiciones son excelentes, en lo que respecta a la turbulencia atmosférica. A partir del nivel de 100 m parece observarse un régimen de turbulencia compatible con la atmósfera libre, pues el RMS promedio se sitúa entre 0.005 y 0.007 °C. No obstante, los niveles inferiores al nivel de los 20-30 m. de altura se ven moderadamente afectados por efectos orográficos de la cima de la montaña. En general, este lugar parece tener al menos tan buen seeing como Calar Alto. A tenor de la calibración provisional (Figura 105) entre el RMS medido por el dron en este punto (0.0134 ° C) y el DIMM de Calar Alto deberíamos tener unas condiciones con seeing mediano de ~1.2" de arco para las noches consideradas. Además, para el cálculo de la integral del RMS se ha descartado la capa de medida de menos de 2.5 m. sobre la superficie, por las mismas causas esgrimidas para el caso de Calar Alto.

Figura 110. Perfil del RMS ^oC. promedio para el emplazamiento del observatorio de La Sagra (loma Montilla, al NE de la provincia de Granada)



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 111 mostramos el mejor ajuste exponencial para el perfil del RMS del conjunto de 38 vuelos realizados con drones entre 2020 y 2021 en el observatorio de La Sagra. A partir de los 150 m de altitud sobre el lugar las condiciones devienen en baja turbulencia. Bajo este nivel de altura las condiciones son mediocres, si comparamos su perfil con el de Calar Alto o de la misma loma de Montilla. En estos dos

últimos lugares las condiciones son netamente mejores, aun asumiendo los errores de determinación, que son, como máximo, del orden de 0.005°C.



Figura 111. Perfil del RMS ^oC. promedio para el emplazamiento del observatorio de La Sagra a 1530 m (Collados de La Sagra, al NE de la provincia de Granada)

En general, este lugar, el observatorio de La Sagra, parece tener mayor turbulencia a todos los niveles. El hecho sería explicable por hallarse en una loma o collado entre dos montañas próximas entre sí. Por tanto, aquí el efecto de la turbulencia es topográfico y local. A tenor de la calibración provisional (Figura 105) entre el RMS integrado, medido por el dron (0.021 ° C), y el DIMM de Calar Alto, deberíamos tener unas condiciones con seeing mediano de ~2.0" de arco para las noches consideradas. En la integral del RMS también se ha descartado la capa de medida de menos de 2.5 m. sobre la superficie.

En la figura 112 se presentan los resultados microtermales, mediante vuelos con drones, de los lugares estudiados en su conjunto.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 112. Perfiles de RMS en los lugares de observación de nuestro estudio de casos

Fuente: Elaboración propia.

El actual observatorio de La Sagra, en Collados de la Sagra, a una altitud de 1530 m., tiene un RMS absoluto integrado del orden de 0.021 °C. (línea negra). La ampliación del observatorio de La Sagra en la Loma Montilla, ya con una altitud de 1800 m., y en un pico aislado, presenta un RMS °C inferior, de 0.0134 (línea roja). El observatorio de Calar Alto, a 2170 m de altitud, presenta un RMS integrado de 0.0129 ° C (línea naranja). Y, finalmente, las condiciones extrapoladas para el RMS de la cima de la Sagra, ~2400 m de altitud, nos han devuelto una estimación de su RMS °C de 0.0082 (línea discontinua azul). La estimación de los valores del RMS de este lugar está basada en los ajustes entre los otros tres lugares estudiados, con datos microtermales reales, promediados cada 10 segundos de tiempo, y aplicando correcciones de altura para cada nivel, de acuerdo con los valores medidos. El factor de reducción aplicado fue de 0.615 para cada nivel, respecto a las medidas de Montilla, por ser el lugar más próximo y con características más parecidas. Las condiciones topográficas y de situación de la cima de la Sagra son excepcionales, como esperamos determinar en próximas campañas de medición de turbulencia microtermal.

5.10.1 Primeras estimaciones del FWHM en nuestra zona de estudio

En general, hemos obtenido un C_T^2 promediado de 0.0004°C por metro, por lo que con una altura de integración H de 100 metros obtendríamos una contribución de esa primera capa atmosférica de 0.132" de arco al seeing θ . En realidad, necesitaríamos 1000 metros de capas de tal turbulencia media para llegar a 1.32" arco (valor muy frecuente). Teniendo en cuenta que la capa turbulenta total es de unos 16 Km., no es un valor muy alejado de lo deducido por DIMM, pues las capas superiores a unos 1000 metros son mucho menos turbulentas que los primeros 100 metros, y su contribución total puede ser solo del 50 % del seeing total. De esta forma, dado que el C_T^2 disminuve a partir de los primeros 100 metros de altura, y dado que se observa un valor más uniforme de turbulencia en el resto de la troposfera, es factible deducir el seeing probable con mayor confianza. En nuestro estudio de casos, y dado que todos los lugares estudiados tienen una apreciable contribución de la capa límite y superficial al seeing total (del 10% al 40 %), es por lo que consideramos que el cálculo teórico de integración de la ecuación (2), solo es razonablemente válido. Si las observaciones las realizamos partiendo de una cima a bastante altitud, y sin obstáculos topográficos en varios Km. a su alrededor, podemos tener una contribución de las capas inferiores cercanas a la superficie < 10% del seeing total.

la capa límite de los lugares representados en la figura 112							
CONTRIBUCION	C. SAGRA	MONTILLA	OBSV.	CALAR			
FWHM 9 "ARCO			SAGRA	ALTO			
(CAPALIMITE150m) 0,91[[[] CT2 (Z)dz]^0,6	0.0505	0.0836	0.144	0.0977			

Tabla 8. Contribución al seeing FWHM por efectos de variaciones microtermales en

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de tener alta turbulencia, cosa habitual en lugares con condiciones del seeing mediocres, rodeados de obstáculos, se impone una integración por capas delgadas, de unos 10 metros, cada una con su propio C_T^2 , hasta, al menos, los 150 m. de altura. La diferencia entre el seeing medido por DIMM, en un lugar dado, y lo hallado matemáticamente (ecuación 2), debe devolvernos el porcentaje contributivo de estas capas bajas. Para capas elevadas, podemos inferir los C_T^2 de capas de acuerdo con la tendencia mostrada por los vuelos microtermales hasta 150 m. de altura. Al respecto, se ofrecen los valores calculados para algunos ejemplos de nuestro estudio de casos, en el SE de la Península Ibérica. Estos resultados se resumen en la tabla 8. Los valores

aquí presentados se han deducido a partir de los datos mostrados en la figura 112 y considerando la ecuación (1.14) del apéndice de este capítulo.

Este ejemplo pone de manifiesto la importancia de tener lugares casi completamente libres de perturbaciones, como el caso de la cima de La Sagra, de la que hemos deducido, de manera tentativa, una contribución de solo 0.05" de arco en los 150 m. de la capa limite más próxima al suelo; mientras que, en el actual observatorio de La Sagra, situado en condiciones de altitud y topográficas mucho menos favorables, aparece una contribución de 0.144" de arco para esa misma capa.

Por supuesto, la capa perturbada puede ser de más de 1,000 metros, elevando al menos a 1.5" de arco la degradación por turbulencia hasta la altura de la capa planetaria, a los que habría que sumar alrededor de 0.4" de arco de la atmósfera libre. Las muestras microtermales fueron promediadas durante 10 segundos de tiempo. Para intervalos mayores de tiempo, obviamente, la contribución al seeing total crece, de manera notable y en forma logarítmica, mostrando que los efectos de la capa límite son importantes en la calidad de imagen en una escala de tiempos de minutos, en la exposición del objeto estudiado, generalmente débil en brillo.

Debemos decir que esta es una aproximación teórica a la contribución del seeing sobre diversos lugares, y que la realidad puede ser marcadamente diferente. Por eso, estas primeras aproximaciones deberán cotejarse con valores de tipo DIMM, cuando se complete el largo proceso de calibración necesario. Al respecto, hay pequeñas diferencias en los valores hallados, aunque no alteran el sentido de las estimaciones, si en lugar de considerar separadamente la contribución de cada capa de pocos metros dentro de la capa limite, consideramos un promedio C_T^2 (por metro), y multiplicamos por el espesor de la capa límite en estudio (en nuestro caso 150 m.). Cuestiones de tipo topográfico y relacionadas con las medidas experimentales, nos llevan a sugerir que habría que considerar una capa de integración de unos 1000 metros como mínimo, para tener valores realistas del verdadero seeing observable. Esto se puede determinar también, mediante datos suministrados por el DIMM, en las más diversas condiciones meteorológicas. Tales supuestos llevan a resultados del orden de ~2" de arco para lugares mediocres; y de 1" o menos para lugares excelentes.

En nuestras medidas experimentales con drones equipados con sensores microtermales, el RMS diferencial de temperatura y, por tanto, el C_T^2 , son bastante bajos a partir de unos 100 m de altura. Dicho de otra forma: *a 100 m de altura todos los lugares parecen bastante buenos*. No obstante, una pequeña contribución al seeing se va añadiendo conforme consideramos el efecto de las demás capas, hasta el límite de la inversión planetaria, donde la contribución es muy pequeña. Esta capa superior se extiende miles de metros en vertical. En los límites de la troposfera, también existe una

cierta turbulencia, asociada a las grandes velocidades de viento y sus efectos de cizalla, y que se asocian a la corriente en chorro en latitudes templadas. Medidas experimentales sugieren que dichas capas turbulentas en altura no tienen más que unas decenas de metros de espesor.

La estimación del seeing FWHM con respecto a un valor medio de C_T^2 aparece en la figura 113. Este valor se obtiene de la integración de los valores del C_T^2 , considerando el eje vertical sobre una altura Z (en metros). Usualmente, en los experimentos Z = 1 m. Siendo C_T^2 (eje x) la varianza del RMS o sigma (σ) del diferencial de temperatura entre dos sensores microtermales separados Z(m), que se corresponde con el eje de la y.



Figura 113. Parametrización del seeing FWHM con respecto a un valor medio de CT²

Fuente: Reinterpretación propia a partir de Zago (1995).

Además, hay que considerar que, para la obteción del CT2 (diferencial ºK.), en la práctica, los sensores están a 1 m entre sí, aunque la tabla permite cálculos de CT² entre 1 mm. y 100 m. directamente.

La ecuacion de aplicación es:

$$FWHM\theta = 0.91 \left[\int_{H} CT^{2} (Z) dZ \right]^{3/5}$$

$$\theta = FWHM$$
(2)

- - -

En el gráfico aparecen algunos valores típicos de FWHM entre 0.025 y 0.8" de arco. Una tabla con valores representativos de C_T^2 puede ser de gran utilidad en la

determinación rápida del disco de seeing probable en condiciones iniciales de campo durante las medidas del mismo (Zago, 1995).

5.11 FRECUENCIAS RELATIVAS DEL RMS MICROTERMAL, POR NÚMERO DE CAPAS AFECTAS Y PARA LOS DISTINTOS OBSERVATORIOS DE NUESTRO ESTUDIO DE CASOS

En la figura 114 tenemos las alturas típicas (por niveles de altura) a las que se han efectuado las medidas de microturbulencia con el dron y son: 2.5, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 75, 100, 120 y 150 m. El intervalo < 0.01 RMS ° C. puede considerarse excelente; la horquilla 0.011 a 0.02 como aceptable; la de 0.021 a 0.30 mediocre; y valores malos los que superan 0.031 (véase la tabla del apéndice 3 para observar el desglosado por capas y su RMS correspondiente). La contribución al seeing de la cima de La Sagra puede ser muy baja, seguido por Montilla y Calar Alto, como casos intermedios. El lugar del actual observatorio de La Sagra tiene unas condiciones de turbulencia, en la capa lÍmite, claramente inferiores a los demás sitios investigados.





Fuente: Elaboración propia.

5.12 CÁLCULOS DE LOS DATOS DE LA TORRE MICROTERMAL DEL OBSERVATORIO DE LA SAGRA (LOMA MONTILLA)

En la figura 115 aparecen las diferencias en salida de voltaje (en milivoltios, mV) de los dos sensores microtermales instalados en la torre del observatorio de La Sagra,

con una resolución temporal de una décima de segundo. Este diferencial de voltaje se transforma en temperatua siguiendo la siguiente expresión: (Sigma mV) *11)) /1000. En este caso el RMS o Sigma fue ~ 0.00508871 °C para dicho intervalo de 10 seg.



Figura 115. Una muestra típica (en bruto) del valor en mV. del diferencial microtermal obtenidos por los sensores PT1000 separados un metro

Fuente: Elaboración propia.





Fuente: Elaboración propia.

En la figura 116 aparecen los valores del RMS (°C) anotados en la torre microtermal de la loma Montilla entre agosto y diciembre de 2022, considerando integraciones de 10 segundos, a lo largo de varias horas de la noche. El nivel de 3 m. (azul) muestra un ruido ligeramente superior al nivel de 12 m (rojo). Aunque el R² no es significativo, es posible inferir una clara tendencia estacional.

5.13 VALORES DE SIGMA DESDE AGOSTO A DICIEMBRE DE 2022 EN LOMA MONTILLA (TODA NOCHE)

En la figura 117 se muestra la evolución del Sigma o RMS (°C), esto es, el ruido microtermal en Loma Montilla. Aquí los valores se ofrecen como media nocturna, considerando integraciones de toda la noche, ~44000 segundos. El nivel de 12 m. (rojo) muestra un incremento estacional moderado y poco significativo; mientras que el nivel de 3 m. (azul) parece tender a disminuir conforme avanza la estación fría. Estas tendencias, en principio, pueden atribuirse a la turbulencia relativa de capas a distintas alturas sobre la loma de Montilla, según la estación, necesitándose, al menos, un año de medidas para poder determinar, con más seguridad, lo que está ocurriendo. No se descartan problemas instrumentales, a pesar de la consistencia de las medidas a lo largo del tiempo. Como cabría esperar, el nivel de 12 m. aparece con medidas del RMS (°C) inferiores a lo largo de todo el periodo. Los niveles de RMS son razonablemente estables y con menos dispersión entre noches a lo largo de todo el periodo de 5 meses.

Figura 117. Valores del Sigma o RMS (°C) en media nocturna. Los valores en azul se refieren al nivel de 3 m y los que aparecen en rojo al nivel de 12 m



Fuente: Elaboración propia.

5.14 VALORES DE SIGMA CON EL TIEMPO DE INTEGRACIÓN A 3 Y 12 M EN LOMA MONTILLA

En la figura 118 aparece una situación típica de una noche típica en verano para los valores SIGMA a 3 y 12 m de altura en Loma Montilla. Según se observa en la figura 118, donde aparecen periodos de muestreo entre 1 y 10 segundos, apenas se observa diferencia entre los niveles de 3 y 12 m de altura. Eso coincide con el hecho de que el ruido bajo 10 segundos de promediado de SIGMA es muy bajo para los niveles de altura considerados. A partir de 10 segundos y hasta 44,000 segundos (toda la noche) se observa una notable diferencia entre los niveles de 3 y 12 m., al menos en verano; aunque con el avance del otoño e invierno dichas diferencias tienden a ser mucho menores.

A 10000 segundos de tiempo de integración del SIGMA ya tenemos un nivel al menos 10 veces superior de ruido. El sigma o RMS parece aumentar el doble en el nivel de 3 m altura que, a 12 m. a lo largo del intervalo de tiempos de integración considerado, entre 1 y 44000 segundos. El mejor ajuste ha sido el de tipo logarítmico en ambas series de datos (3 y 12 m de altura sobre el suelo). Los coeficientes de correlación hallados son muy altos.



Figura 118. Valores de SIGMA obtenidos a partir de la torre microtermal en la Loma Montilla para distintos tiempos de promediado (los ejes están en escala logarítmica)

Fuente: Elaboración propia.

5.15 CONCLUSION A LAS MEDIDAS MICROTERMALES DE LA TORRE DE LA LOMA MONTILLA DE LA ÉPOCA PT 1000

En la loma Montilla, de acuerdo con nuetras estimaciones (un tiempo de medida según los valores de la tabla 9, un CT^2 de 0.0001 en promedio de ambos niveles y en un espesor de 10 m), obtendríamos una contribución al FWHM θ < 0.02" de arco. Estos datos muestran una contribución mínima. Todos los cálculos están referidos a tiempo de medida de 10 segundos para la turbulencia de los niveles a 3 y 12 metros sobre el suelo (Tabla 9). La época PT 1000 fue la inicial de medidas microtermales, seguida por la época NTC 10K.

	Monuna)				
	3 M	12 M			
RMS ºC.	0.01132328	0.009303924			
СТ^2	0.0001282	8.6563E-05			

Tabla 9. Contribuciones al FWHM a nivel de 3 m y 12 m. (torre microtermal en la loma Montilla)

Fuente: Elaboración propia.

Como es de esperar, estos valores se ajustan a los medidos con los drones para esos niveles (Figura 112), ya que para esos niveles las contribuciones calculadas han quedado en torno a ~0.02" de arco FWHM. Bien es cierto que en otras noches se han observado valores superiores en las sondas instaladas a bordo de los drones. Entre otras causas, aparte las instrumentales, podrían encontrarse que las medidas se realizaron justo al obscurecer sobre la loma Montilla. Eso significa que aún puede quedar un remanente extra de turbulencia térmica a niveles tan cercanos al suelo como son 3 y 12 m.

A partir de los vuelos microtermales se obtuvieron contribuciones para este lugar de 0.08" de arco FWHM, considerando todo el espesor del vuelo, que son los 150 m primeros sobre el terreno. Esto sigue siendo una contribución baja para tal espesor, lo cual tiende a validar el sitio como poseedor de excelentes condiciones de imagen.

5.16 CÁLCULOS DE LOS DATOS DE LA TORRE MICROTERMAL DE LOMA MONTILLA (ÉPOCA NTC 10 K.). (VER TAMBIÉN 5.17)

Para el caso del observatorio de La Sagra, y según los datos obtenidos de la torre microtermal de loma Montilla, podemos deducir la existencia de periodos de ruido térmico (RMS) casi el doble que en otros (Figura 119). Ello según el nomograma de la figura 113 nos daría unos valores tentativos de contribución parcial al seeing total, en términos de FWHM, de la capa superficial, de acuerdo con la tabla 9.





Fuente: Elaboración propia.
En la figura 120 mostramos una secuencia de una noche de toma de datos en mV registrados en la torre microtermal de la Loma Montilla (lugar de emplazamiento del observatorio astronómico de La Sagra). En azul se muestra el nivel situado a 12 m sobre el terreno. En rojo aparece la turbulencia en el nivel de 3 m sobre el terreno. Puede observarse que incluso en las noches tranquilas, como la aquí mostrada, los valores son sensiblemente superiores a 3 m. respecto de los 12 m.



Figura 120. Una muestra de RMS sobre la loma Montilla (noche del 16 mayo de 2024)

Fuente: Elaboración propia.

 Tabla 10. Valores estimados de la turbulencia de la capa límite en dos niveles sobre la superficie de la loma Montilla en el observatorio de La Sagra

PROMEDIO	0.01885246
CT^2 * m.	0.00035542
Contribución. Seeing "	
Arco	
3 a 12 m.(integ.)	~ 0.015 " ARCO
3 a 30 m (intg.)	~ 0.030 " ARCO

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 10 mostramos que el nivel comprendido entre los 3 y los 12 m de altura muestra una contribución del orden de 0.015" de arco al FWHM; mientras que en el nivel entre los 3 y los 30 m. tenemos una contribución del orden de 0.030" de arco FWHM.

5.17 CALIBRACION SENSORES TIPO NTC DE 10 K

Se han calibrado los sensores de 10 K instalados en la torre microtermal en la loma de Montilla (Figura 121). Aunque provisional, aparece un excelente ajuste entre ambos sistemas de medición.





Fuente: Elaboración propia.

5.17.1 Conclusiones respecto a las medidas del dron y las mediciones realizadas en la torre microtermal (época NTC 10 K)

Las inclemencias meteorológicas, fuertes vientos y falta de robustez mecánica y electrónica, ha llevado a implementar un nuevo sistema robusto de sensores microtermales en la torre de la loma Montilla. En concreto, esta disposición tiene dos NTC compatibles con medidas microtermales dispuestas a 1 m. entre sí. Así se registran medidas diferenciales a 3 y 12 m de altura sobre el suelo, haciendo un puente a la entrada analógica (A0) del amplificador de Arduino Uno (situado en una cabaña

protegida). Esta disposición empezó a tomar datos a finales de febrero de 2023, habiendo completado el año 2023 (Figura 119) con una baja tasa de fallos. El sistema ha sido calibrado de acuerdo con la figura 121.

5.18 LA OROGRAFÍA DE LA SIERRA DE LA SAGRA

Examinando la figura 122 se observa de forma bastante intuitiva que las condiciones fisiográficas del pico de La Sagra ofrecen una de las mejores condiciones físicas para la observación astronómica en la península Ibérica, atendiendo a la calidad de imagen o seeing. Esta es una de las hipótesis de nuestro trabajo a lo largo de 40 años. Hipótesis aún indemostrable, en su casi totalidad, por falta de recursos operativos e impulso científico institucional, en este caso concreto.



Figura 122. Topografía de la montaña de La Sagra 2381 m. a escala 1:17.000

Fuente: Mapa topográfico digital del IGN.

En las inmediaciones de la cima no existen obstáculos de ningún tipo, por lo que se presupone que existe un flujo de aire laminar a pocos metros sobre la superficie. Tampoco hay árboles ni vegetación en los últimos 300 m. bajo la cima. Además, el color blanco de las rocas calizas contribuye a amortiguar los desfases térmicos, evitando acumulaciones de calor durante el día, que pudiesen perjudicar la calidad de imagen por radiación superficial durante la noche.

En la figura 123 se ofrece una imagen de la disposición de los emplazamientos estudiados en los que se han anotado medidas microtermales en el entorno de la sierra de La Sagra. Vista desde el este, al norte (derecha) se encuentra la estación astronómica de Montilla, a 1800 m. En el centro aparece el observatorio actual de collados de la Sagra, a 1530 m.; y, al Sur (izquierda), aparece la cima de La Sagra, a 2383 m. No se dispone actualmente de ninguna estación de ningún tipo en esta cima, y todas las consideraciones que se han hecho sobre ella están basadas en estaciones de medición en collados de La Sagra y loma Montilla. Además, también se ha considerado los valores del DIMM del observatorio de Calar Alto, que se tomaron como referencia.

Figura 123. Contextualización del relieve en 3-D de La Sagra, el observatorio de La Sagra y Loma Montilla



Fuente: Google Earth.

Aunque el número de lugares donde se ha podido medir el RMS microtermal es escaso, podemos deducir con relativa confianza, que las condiciones de seeing mediano en la cima de la Sagra estarían, probablemente, en torno a 0.7" arco (incluyendo la capa superficial de 0-30 m de altura). Estos datos serían similares a los estimados en los mejores sitios de los que se disponen de datos instrumentales, como, por ejemplo, la isla de la Palma (Canarias) y los observatorios de La Silla, cerro Tololo, Paranal y Armazones (Chile). Considérese al respecto, que estos observatorios son calificados como de los mejores del mundo en este aspecto, y con topografías y altitudes enteramente similares a la sierra de La Sagra. Es evidente que ya con nuestra aproximación, seria aún más útil y deseable tener medidas "in situ" en la cima de La

Sagra, cosa que hasta el momento no se ha hecho, por dificultades logísticas y, también, por falta de verdadero interés científico, por parte de las instituciones astronómicas españolas.

6 DISCUSIÓN

Por lo deducido con nuestras medidas experimentales de RMS microtermal efectuadas mediante drones y torres meteorológicas, se puede indicar que el diferencial de temperatura es bastante pequeño a partir de unos 100 m. de altura. Dicho de otra forma: "a 100 m de altura todos los lugares parecen razonablemente buenos". No obstante, una pequeña contribución al seeing se va añadiendo conforme consideramos el efecto de más capas turbulentas, hasta el límite de la inversión planetaria, donde la contribución es ya muy pequeña. Esta capa se extiende, en promedio, hasta unos 2000 metros en la vertical. En los límites de la troposfera (12-16 Km.) también existe una cierta turbulencia, asociada a las grandes velocidades de viento y a sus efectos de cizalla, y que están asociados a la corriente en chorro del oeste en latitudes templadas.

Entre nuestros hallazgos sobre turbulencia atmosférica podemos destacar:

(a)

Nuestro sistema de aproximación a la determinación de la turbulencia en la capa límite es novedosa, ya que los vuelos de drones, equipados con sensores microtermales, ofrecen ventajas respecto de otros medios, como p.ej. la mayor precisión espaciotemporal de las mediciones, respecto de los globos sonda. De esta forma es posible discriminar la contribución a la turbulencia, considerando estratos como la capa superficial (GL), que representa los primeros 30 metros de altura sobre el observatorio. Lo que podemos llamar verdadera capa límite de rozamiento (BL), que abarca desde el suelo hasta unos 300 m de altura y la atmósfera libre (FA); esta última extendida entre los 300 y los 16000 m en nuestras latitudes. Nuestra contribución principal se centra en el estudio de la GL y en la BL, con resolución del orden de un metro en la vertical. Nuestro estudio se efectuó en el ámbito geográfico de las elevaciones montañosas del SE de la península Ibérica. En dichos lugares existen observatorios astronómicos o están muy próximos.

(b)

Se constata que nuestros resultados están en línea con la extensa bibliografía consultada, referentes a la medición de turbulencia en la capa límite atmosférica. Las aproximaciones efectuadas con globos sonda meteorológicos clásicos, para todo el paso atmosférico, y las torres con sensores, hasta una altura de unos 30 m., se han

mostrado insuficientes a la hora de reflejar la contribución de la capa situada entre unos 30 m y unos 300 m de altura.

(C)

La capa limite intermedia (30 a 300 m.) está pobremente determinada en su contribución a la turbulencia total a la calidad de imagen o "seeing". Por ello, nuestro método y nuestra técnica pueden rellenar eficazmente este importante hueco y, además, determinar con rapidez las características turbulentas de un observatorio con varios puntos de control alrededor del mismo, e indicar si su situación es óptima o no.

(d)

La validación de nuestro sistema de medidas de turbulencia se ha efectuado partiendo de la teoría de turbulencia atmosférica y mediante un sistema real de medida de diámetro de imagen o "seeing", efectuando medidas simultaneas entre el monitor de "seeing" del observatorio de Calar Alto y nuestros vuelos con sensores microtermales, en la misma cima del observatorio. El cotejo de nuestros datos con los del DIMM del Calar Alto arrojó una primera calibración que, a pesar de su independencia, mostró una correlación R² de ~0.83 (Figura 105). Esta relación consideramos que es satisfactoria, tratándose de solo 14 vuelos, aunque habrá de mejorarse y robustecer con más vuelos simultáneos.

(e)

Hemos detectado como primera aproximación que la mayor parte de la turbulencia de la capa límite es generada en las capas superficiales, las cúpulas y su entorno orográfico inmediato. Esta es una de las conclusiones que también podemos extraer de nuestras medidas microtermales en otros lugares del SE de la Península Ibérica, donde llegamos a observar contribuciones de turbulencia de tamaño de imagen de hasta un 20% en los primeros 50 m. de altura, en términos de FWHM. Nuestras medidas experimentales muestran que, a partir de unos 120 m. de altura, casi todos los lugares parecen excelentes, con contribuciones similares en todos los sitios.

(f)

Por tanto, de acuerdo con en el epígrafe anterior, podemos concluir, razonablemente, que cuanto más bajo sea el RMS integrado de nuestros vuelos microtermales más probabilidad hay de estar cerca de la atmosfera libre (FA), la cual suele tener un seeing típico de ~0.4" de arco (FWHM). Lugares con formas topográficas agudas, redondeadas, libres de cimas cercanas de su misma altitud y, por supuesto, altitud elevada, son los mejores candidatos para albergar observatorios astronómicos, donde se busque una alta calidad de imagen. En nuestro estudio de casos, la sierra de La Sagra parece reunir todos estos requisitos, y a tenor de los vuelos efectuados en las inmediaciones y extrapolados a su cima (Figura 100), debemos tener una contribución de la capa límite

entre un 5% y un 10%, como máximo, al tamaño de imagen FWHM. Este valor, aun siendo extrapolado, es del máximo interés astronómico (ver Ando et al., 1989).

Bufton (1975) menciona que, en el caso de efectuar vuelos diurnos o crepusculares, hay que cuidar al máximo el que no llegue radiación directa ni retrodifundida del Sol, dado que afectan, térmicamente, a los sensores de la estación y pueden falsear las medidas; cosa que se advierte por rápidos cambios de pendiente del diferencial de temperatura entre los dos sensores. Durante los vuelos nocturnos esta circunstancia no es esperable, pero pueden aparecer errores diferenciales por emisión de otras fuentes, aparte de las intrínsecas de la capa atmosférica atravesada en ese momento del vuelo. En realidad, nosotros hacemos un *sándwich* de capas, dado que estacionamos el dron a alturas determinadas durante un periodo de 10 a 30 segundos, periodo éste considerado como un estándar de medida o tiempo de integración.

Un caso llamativo, relacionado con una escasa incidencia o contribución de la capa límite superficial sobre los efectos de degradación de la imagen, aparece en Ulich y Davidson (1985). Estos autores, midiendo la turbulencia en la cima de Monte Graham (3267 m. de altura, en Arizona), encuentran poco importante la contribución superficial a la perturbación del seeing. Ello a raíz de lo observado en la variación de la estructura de la temperatura con la altura del lugar, a partir del C_T^2 . Los autores obtuvieron un FWHM de alrededor de 0.8" arco para la imagen observada en larga exposición. En nuestra impresión, lo elevado y agudo del pico el Monte Graham puede explicar parte de este resultado, ya que, por lo general, siempre hay una apreciable contribución muy negativa de los primeros 300 metros sobre el observatorio en la calidad de imagen observable.

Siguiendo a Zago (1995), colegimos que nuestras medidas con drones y sensores microtermales sobre la capa límite son coherentes con su exposición y sus cálculos, y que la contribución al seeing FWHM es bastante pequeña (solo significa un pequeño % al tamaño total de imagen o FWHM en segundos de arco). Adicionalmente, nuestros sondeos microtermales, sobre distintos lugares de montaña en la península Ibérica, han mostrado que esta contribución no es mayor de un 20%, y aún un 10% en la mayoría de los casos, y para los primeros 150 m de altura. A pesar de ello, estas primeras aproximaciones deben tomarse con precaución, admitiendo posibles indeterminaciones (quizá de hasta un factor 2).

Por tanto, de acuerdo con lo expuesto en los epígrafes anteriores, podemos concluir, razonablemente, que cuanto más bajo sea el RMS obtenido de nuestros vuelos microtermales más probabilidad hay de estar cerca de la atmosfera libre (FA), con un seeing típico de ~0.4" de arco.

El globo de radiosondeo de vuelo libre al ascender con gran rapidez, aún equipado con sensores microtermales, no puede determinar, de manera fiable, la contibución al seeing del sector atmosférico más próximo al suelo, que es, al fin y al cabo, el de mayor contribución al seeing (ver McHugh et al., 2008).

Respecto a la altiplanicie Antártica (Dome C y Polo Sur), Agabi et al. (2006) encuentran que el seeing en superficie presenta un 1.3" de arco de mediana. Ello es debido a una fuerte inversión térmica, casi siempre presente. En el caso del Polo Sur esta capa turbulenta puede alcanzar los 200 m de altura. No obstante, en Dome C esta capa apenas alcanza los 30 m. de altura, estimándose un seeing de solo 0.3" de arco (mediana) a partir de unos 20-30 m de altura sobre la superficie del hielo, lo que lo convierte en un lugar de gran interés, si se trabaja a dicha altitud o a una superior.

Como podemos comprobar, el estudio de la turbulencia atmosférica aplicado en la estimación de la calidad de imagen astronómica se inició por científicos en las cercanías de las ciudades durante los siglos XIX y XX. A mediados de los 60 se instalaron en áreas más favorables del SW y W de los EE. UU. En los 70 y 80 exploran otras partes del mundo aptas para astronomía, como las islas remotas de los grandes países europeos, sus posesiones y el norte de Chile, África del SW y zonas del borde sur, del entonces, Unión Soviética. Con todo, no es sino hasta finales del siglo XX y comienzos del XXI cuando se empiezan a instalar bases científicas astronómicas en la Antártida y en zonas remotas del Ártico.

En los últimos años ha ganado peso la idea de emplear "observatorios remotos" en zonas muy inaccesibles o difíciles, desde el punto de vista logístico. Un buen ejemplo sería la vastedad del Antártico, Asia central, Tíbet, Pamir, Mongolia y los altos volcanes de los Andes de Sudamérica. No es imaginable un observatorio astronómico en estos lugares, sino manejado casi en su totalidad de manera remota. Por ello, los futuros observatorios astronómicos en superficie se harán muy similares a los observatorios espaciales en su manejo y operatividad.

Tanto Dome A como Dome C (la Antártida) parecen tener valores extraordinarios de seeing a partir de solo unos 20-30 m. Aspecto importante en la edificación de cúpulas en aquel entorno tan hostil, evitando los efectos de inversión superficial, que aquí es muy potente.

En el suresta de la península Ibérica, la sierra de La Sagra parece reunir todos estos requisitos, a tenor de los vuelos efectuados en las inmediaciones, y extrapolados a su cima (Figura 112). En dicha cima debemos tener una contribución de la capa límite que debe situarse entre un 5% y un 10%, como máximo, al tamaño de imagen (FWHM).

345

En el caso de Sierra Nevada, con una mediana absoluta para el disco de seeing de solo 0.772" de arco (FWHM), podemos decir que se sitúa entre los lugares más favorables del mundo en este aspecto.

En el caso del observatorio de Calar Alto hemos deducido un seeing del orden de 0.9" de arco (FWHM). Estos datos se han deducido de las medidas de su propio medidor DIMM. Considérese que ha sido necesario aplicar algunos filtrados menores a sus registros, dado que su ubicación es claramente poco adecuada. Esta situación ha favorecido que sus registros del FWHM sean superiores a los esperados. Toda vez depurados sus datos, podemos expresar que sus valores son, ciertamente, muy competitivos en un panorama internacional, resultandos similares a los de la isla de la Palma, Paranal o los observatorios del SW de EE. UU.

Al igual que buena parte de los autores citados, en nuestro estudio de casos hemos encontrado que la contribución de la capa límite y la capa superficial son relativamente importantes en el total de la turbulencia atmosférica (y, por tanto, en la distorsión del seeing); bien es cierto que esta contribución es mucho menor en lugares óptimamente situados, como picos aislados a gran altitud.

Si hemos aprendido algo es que la extrapolación del seeing observado a calidad de imagen posible sobre un observatorio no es trivial, en concordancia con las apreciaciones de Tokovinin (2002 y 2023). La conclusión es que la determinación y caracterización del seeing de un observatorio no es una tarea simple, intervienen muchas variables, se necesitan décadas de observaciones con instrumental calibrado, óptimamente ubicado, etc. Solo asi pueden aparecer tendencias claras y ciclos de gran amplitud temporal.

7 CONCLUSIONES

Nuestro trabajo ha sido un intento con éxito en la tarea de implicar a los drones en la medida de turbulencia atmosférica y, por ende, facilitar la tarea de localización para el desarrollo y protección ambiental de lugares con alto potencial astronómico en nuestro país y, por extensión, en cualquier otro lugar.

Nuestro sistema de aproximación (con vuelos de drones equipados con sensores microtermales) en la determinación de la turbulencia en la capa límite es novedoso, al permitir ganancia de altura (con respecto a las torres meteorológicas) y resolución espaciotemporal (p.ej. respecto a los globos sonda). Por ello, creemos haber demostrado que, aún con medios modestos, es posible hacer contribuciones en un campo tan complejo como es el estudio de la turbulencia atmosférica, aplicado sobre

distintos emplazamientos, con características orográficas y climáticas diversas, donde se desea expandir o construir observatorios astronómicos.

En los últimos años ha ganado peso la idea de los "observatorios remotos" en zonas como el continente Antártico, Asia central, el Tíbet, y los altos volcanes de los Andes, en América del Sur. No es imaginable un observatorio en estos lugares sino manejado casi en su totalidad de manera remota. Su estudio con drones sería una buena alternativa.

Esto viene a confirmar uno de los presupuestos centrales de nuestro trabajo, y es que los condicionantes logísticos y geográficos, sin mencionar los políticos, han impuesto siempre su ley a los limitados recursos de los astrónomos y sus instituciones, que, aún buscando la excelencia física de los lugares de observación, no fuese generalmente posible construir y operar con observatorios en lugares de extrema altitud, latitud y lejanía geográfica. Es cierto que los recursos y las exigencias científicas han crecido con el tiempo; pero debemos recordar que la necesidad de tener imágenes de calidad ya fue apreciada muy pronto por Newton, inventor del telescopio reflector. En sus palabras:

"Telescopes ... cannot be so formed as to take away that confusion of the Rays which arises from the Tremors of the Atmosphere. The only Remedy is a most serene and quiet Air, such as may perhaps be found on the tops of the highest Mountains above the grosser Clouds" (Newton, 1730).

BIBLIOGRAFÍA

Agabi, A., Aristidi, E., Azouit, M., Fossat, E., Martin, F., Sadibekova, T., Venin, J., & Ziad, A. (2006). First Whole Atmosphere Nighttime Seeing Measurements at Dome C, Antarctica. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 118(840), 344-348. doi: 10.1086/498728

Ando, H., Noguchi, T., Nakagiri, M., et al. (1989). Evaluation of the JNLT site. *Astrophysics and Space Science*, 160, 183-189. Recuperado de https://link.springer.com/article/10.1007/BF00642769

Aristidi, E., Agabi, A., Fossat, E. G., Azouit, M., Martin, F., Sadibekova, T., Travouillon, T., Vernin, J., & Ziad, A. (2005). Site testing in summer at Dome C, Antarctica. *Astronomy and Astrophysics*, 444, 651-659. doi: 10.1051/0004-6361:20053529

Aristidi, E., Agabi, K., Azouit, M., Fossat, E., Vernin, J., Travouillon, T., Lawrence, J. S., Meyer, C., Storey, J. W. V., Halter, B., Roth, W. L., & Walden, V. (2005). An analysis of temperatures and wind speeds above Dome C, Antarctica. *Astronomy and Astrophysics*, 430(2), 739-746. doi: 10.1051/0004-6361:20041876

Aristidi, E., Fanteï-Caujolle, Y., Ziad, A., Dimur, C., Chabé, J., & Roland, B. (2014). A new generalized differential image motion monitor. *Proceedings SPIE*, 9145. doi: 10.1117/12.2056201

Aristidi, E., Ziad, A., Chabé, J., Fanteï-Caujolle, Y., Renaud, C., & Giordano, C. (2019). A generalized differential image motion monitor. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 486(1), 915-925. doi: 10.1093/mnras/stz854

Bally, J., Theil, D., Billawala, Y., Potter, D., Loewenstein, R. F., Mrozek, F., & Lloyd, J. P. (1996). A Hartmann Differential Image Motion Monitor (H-DIMM) for atmospheric Turbulence Characterisation. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 13, 22-27. doi: 10.1017/S1323358000020452

Barletti, R., Ceppatelli, G., Paterno, L., Righini, A., & Speroni, N. (1977). Astronomical site testing with balloon borne radiosonde: Results about atmospheric turbulence, solar seeing and stellar scintillation. *Astronomy and Astrophysics*, 54(3), 649-659. Recuperado de https://adsabs.harvard.edu/full/1977A%26A....54..649B

Beyrich, F., Hartogensis, O. K., de Bruin, H. A., & Ward, H. C. (2021). Scintillometers. En T. Foken (Ed.), *Springer Handbook of Atmospheric Measurements* (pp. 1-12). Cham, Alemania: Springer. doi: 10.1007/978-3-030-5

Birkle, K., Elsasser, H., Neckel, T., & Schnur, G. (1976). Seeing measurements in Greece, Spain, Southwest Africa, and Chile. *Astronomy and Astrophysics, 46*, 397-406. Recuperado de https://adsabs.harvard.edu/full/1976A%26A....46..397B

Birnir, B. (2012). *The Kolmogorov-Obukhov statistical theory of turbulence*. Recuperado de https://escholarship.org/uc/item/5809r86n

Bonner, et al. (2010). Thickness of the Atmospheric Boundary Layer Above Dome A, Antarctica, during 2009. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 122, 1122-1131. doi: 10.1086/656250

Bufton, J. L. (1975). A radiosonde thermal sensor technique for measurent of Atmospheric turbulence. NASA Technical Note NASA TN D-7867. Recuperado de https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19750008971/downloads/19750008971.pdf

Carrasco, E., Carramiñana, A., Avilés, J. L., & Yam, O. (2003). Optical seeing at Sierra Negra. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 115, 879-887. doi: 10.1086/376396

Carrasco, E., Avila, R., Inaoe, A. C., Tonantzintla, Astronomia, M. I., Unam, & Mexico. (2005). High-altitude wind velocity at Sierra Negra and San Pedro Martir. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 117,104-110. doi: 10.1086/427736

Catala, L., Crawford, S. M., Buckley, D. A. H., Pickering, T. E., Wilson, R. W., Butterley, T., Shepherd, H. W., Marang, F., Matshaya, P., & Fourie, C. (2013). Optical turbulence characterization at the SAAO Sutherland site. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 436, 590-603. doi: 10.1093/mnras/stt1602

Cayrel, R. (1984). Knowledge acquired during the site testing for the Canada-France-Hawaii Telescope. En A. Ardeberg & L. Woltjer (Eds.), *Proceedings of the ESO Workshop on Site Testing for Future Large Telescopes* (pp. 45-53). Retrieved from https://catalog.princeton.edu/catalog/992477653506421 Cavazzani, S., Ortolani, S., & Zitelli, V. (2012). Site testing at astronomical sites: evaluation of seeing using satellite-based data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 419, 3081-3091. doi: 10.1093/mnras/stx1527

Cavazzani, S., Rodeghiero, G., Capraro, I., Ortolani, S., Barbieri, C., & Zitelli, V. (2014). Ground Layer Laser Seeing Meter. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 126, 312-318. doi: 10.1086/676009

Cavazzani, S., Ortolani, S., & Zitelli, V. (2017). Satellite-based forecasts for seeing and photometric quality at the European Extremely Large Telescope site. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 471, 2616-2625. doi: 10.1093/mnras/stx1527

Chun, M., Wilson, R., Avila, R., Butterley, T., Aviles, J. L., Wier, D., & Benigni, S. (2009). Mauna Kea ground layer characterization campaign. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 394, 1121-1130. doi:10.1111/j.1365-2966.2012.20926.x

CNIG e IGN (s.f.). Visor Iberpix. Ortofotos y cartografía. Recuperado de https://www.ign.es/iberpix/

Coulman, C. E. (1974). A Quantitative Treatment of Solar 'Seeing'. II: Microthermal Measurements in the Immediate Vicinity of Telescopes. *Solar Physics, 34*(2), 491-506. doi: 10.1007/BF00153685

Coulman, C. E., Andre, J. C., Lacarrére, P., & Gillingham, P. R. (1986). The observation, calculation, and possible forecasting of astronomical seeing. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 98, 376-387. doi: 10.1086/131769

Danesh, A., Khosroshahi, H. G., Javanmardi, B., et al. (2019). Iranian national observatory project: seeing measurements at mount Gargash. *Experimental Astronomy*, 47, 145. doi: 10.1007/s10686-019-09621-3

Dierickx, P. (1992). Optical performances of large ground-based telescopes. *Journal of Modern Optics*, 39, 569. <u>doi</u>: 10.1080/09500349214550551

Danesh, A., Khosroshahi, H. G., Javanmardi, B., et al. (2019). Site evaluation study for the Indian National Large Solar Telescope using microthermal measurements. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 437*(3), 2092–2105. doi: 10.1093/mnras/stt1985

El Gran Observatorio (2024). Entrevista a Damian Peach: el mejor astrofotógrafo planetario del mundo. En *El Gran Observatorio*. Recuperado de https://elgranobservatorio.com/damian-peach/

Elsasser, H. (1991). Der Calar Alto die bundesdeutsche Astronomy. *Sterne und Weltraum*, 6, 361-367. Recuperado de https://www.buchfreund.de/de/d/p/49685882/sterne-und-weltraum-6-91

Egner, S., & Masciadri, E. (2007). A G-SCIDAR for Ground-Layer Turbulence Measurements at High Vertical Resolution. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 119, 1441-1448. doi: 10.1086/524850

Els, S. G., Travouillon, T., Schöck, M., Riddle, R., Skidmore, W., Seguel, J., Bustos, E., & Walker, D. (2009). Four Years of Optical Turbulence Monitoring at the Cerro Tololo

Inter-American Observatory (CTIO). *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 121, 922-934. doi: 10.1086/599384

Els, S. G., Travouillon, T., Schöck, M., Riddle, R., Skidmore, W., Seguel, J., Bustos, E., & Walker, D. (2009). Thirty Meter Telescope Site Testing VI: Turbulence Profiles. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 121, 527-543. doi: 10.1086/599384

ECMWF (s.f.). ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. Recuperado de https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-singlelevels-monthly-means?tab=download

Erasmus, D.A. (2000). Meteorological conditions and astronomical observing quality ('seeing') at candidate sites for the Southern African Large Telescope. South African Journal of Science, 96, 475-482. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/295923276

Fried, D. L. (1966). Optical Resolution Through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposures. *Journal of the Optical Society of America*, 56(10), 1372-1379. doi: 10.1364/JOSA.56.001372

Fossat, E. (2011). Some results after 10 years of site testing at Concordia, Antarctica. Arxiv. Recuperado de https://arxiv.org/pdf/1101.3210

Fuchs, A., Tallon, M., & Vernin, J. (1998). Focusing on a Turbulent Layer: Principle of the "Generalized SCIDAR". *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 110, 86-91. doi: 10.1086/316109

Giovanelli, R., Darling, J., Sarazin, M., Yu, J., Harvey, P., Henderson, C., Hoffman, W., Keller, L., Barry, D., Cordes, J., Eikenberry, S., Gull, G., Harrington, J., Smith, J. D., Stacey, G., & Swain, M. (2001). The Optical/Infrared Astronomical Quality of High Atacama Sites. I. Preliminary Results of Optical Seeing. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 113(785), 789-802. doi: 10.1086/322135

Giovanelli, R., Darling, J., Henderson, C. P., Hoffman, W. F., Barry, D. J., Cordes, J., Eikenberry, S. S., Gull, G. E., Keller, L. D., Smith, J. D., & Stacey, G. J. (2001). The Optical/Infrared Astronomical Quality of High Atacama Sites. II. Infrared Characteristics. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 113, 803-813. doi.10.1086/322136

Granados-Muñoz, M. J., Navas-Guzmán, F., Bravo-Aranda, J. A., Guerrero-Rascado, J. L., Lyamani, H., Fernández-Gálvez, J., & Alados-Arboledas, L. (2012). Automatic determination of the planetary boundary layer height using lidar: One-year analysis over southeastern Spain. *Journal of Geophysical Research*, 117, D18208. doi: 10.1029/2012JD017524

Gurtubai, A. G., del Valle, A., Molinari, E., Ortolani, S., San Juan, J., Fiorenzano, A. F. M., & Zitelli, V. (2013). TNG DIMM working on Roque de los Muchachos. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 429, 506-515. doi: 10.1093/mnras/sts354

Gur'yanov, A. E., Kallistratova, M. A., Kutyrev, A. S., Petenko, I., Shcheglov, P. V., & Tokovinin, A. (1992). The contribution of the lower atmospheric layers to the seeing at some mountain observatories. *Astronomy and Astrophysics*, 262, 373-381. Recuperado de https://adsabs.harvard.edu/full/1992A%26A...262..373G

Hansen, R., Hansen, S., & Price, P. (1966). An Example of Meteorological considerations in Erecting an Observatory site in Hawaii. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 77(2), 14-28. Recuperado de https://adsabs.harvard.edu/full/1966PASP...78...14H

Hardie, R., & Geilker, H. (1964). On thermal effects of observatory exterior paint. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 76, 169-172. Recuperado de https://iopscience.iop.org/article/10.1086/128076/pdf

Hartley, M., McInnes, B., & Smith, F. G. (1981). Microtherma] Fluctuations and their Relation to Seeing Conditions at Roque de los Muchachos Observatory, La Palma. *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 22, 272.

Harris, C., & Vrba, F. (1992). Seeing measurements and observing statistics at the U.S. Naval Observatory, Flagstaff Station. *Publications of the Astronomical Society of thePacific*, 104, 140-149. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40679837

Hu, Y., Hu, K., Shang, Z., Ashley, M. C. B., Ma, B., Du, F., Li, Z., Liu, Q., Wang, W., Yang, S., Yu, C., & Zeng, Z. (2018). Meteorological Data from KLAWS-2G for an Astronomical Site Survey of Dome A, Antarctica. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. doi: 10.1088/1538-3873/aae916

Hoag, A. A., & Cook, K. (1967). Microthermal Measurements at the Slit of the 84-Inch Telescope Dome. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 79*, 490-492. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40674505

Kornilov, V., Shatsky, N., Voziakova, O., Safonov, B., Potanin, S., & Kornilov, M. (2010). First results of a site-testing programme at Mount Shatdzhatmaz during 2007-2009. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 408, 1233-1248. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.17203.x

Lombardi, G. (2009). Astronomical site testing in the era of the extremely large telescopes (Tesis Doctoral). Universidad de Bolonia, Bolonia.

Lyot, B. (1945). Lunar Photographs taken by B. Lyot on the Pic Du Midi. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 57(339), 310-311. doi: 10.1086/125761

McHugh, J. P., Jumper, G. Y., & Chun, M. (2008). Balloon Thermosonde Measurements over Mauna Kea and Comparison with Seeing Measurements. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 120, 1318-1324. doi: 10.1086/595871

Marks, R. D., Vernin, J., Azouit, M., Briggs, J. W., Burton, M., Ashley, M. C., & Manigault, J. F. (1996). Antarctic site testing-microthermal measurements of surface-layer seeing at the South Pole. *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, 118, 385-390. doi: 10.1051/aas:1996205

Martin, F., et al. (2000). Optical parameters relevant for High Angular Resolution at Paranal from GSM instrument and surface layer contribution. *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, 144, 3-44. doi: 10.1051/aas:2000197

Mekuriaw, D. A. (2019). : Analyses of seeing measurements on optical astronomical site testing at Abune Yosef Mount, Ethiopia. *Experimental Astronomy*. doi: 10.1007/s10686-019-09628-w

Moles, M., Sánchez, S. F., Lamadrid, J. L., Cenarro, A. J., Cristóbal-Hornillos, D., Maicas, N., & Aceituno, J. (2010). Site Testing of the Sierra de Javalambre: First Results. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 122, 363-372. doi: 10.1086/651084

Morgan, W. W. (1960). Some Vistas of Astronomical Discovery. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 72(426), 153-159. doi: 10.1086/127503

Moulsley, T., Asimakopoulos, D., Cole, R. S., Caughey, S. J., & Crease, B. A. (1982). Temperature structure parameter measurements using differential temperature sensors. *Boundary-Layer Meteorology*, 23, 307-315. doi: 10.1007/BF00121118

Muñoz-Tuñon, C., Vernin, J. & Varela, A.M. (1997). Night-Time Image Quality at La Palma Observatory. *Astronomy and Astrophysics*, 125, 183-193. Recuperado de https://aas.aanda.org/articles/aas/pdf/1997/13/ds5876.pdf

Newton, I. (1730). *Optiks or a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections AND Colours of Light* (1952, 4th ed.). Recuperado de http://strangebeautiful.com/other-texts/newton-opticks-4ed.pdf

Pease, F. G. (1924). Notes on Atmospheric effects observed with the 100-inch Telescope. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 36, 191-198. doi: 10.1086/127503

Piazzi, C. (1844). On the Advantages of employing Large Specula and Elevated Situations for Astronomical Observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 6(3), 17. doi: 10.1093/mnras/6.3.17

Pietroni, I., Argentini, S., & Petenko, I. (2014). One Year of Surface-Based Temperature Inversions at Dome C, Antarctica. *Boundary-Layer Meteorology*, 150, 131-151. doi: 10.1007/s10546-013-9861-7

Persson, S. E., Carr, D. M., & Jacobs, J. H. (1990). Las Campanas observatory seeing measurements. *Experimental Astronomy*, 1, 195-212. doi:10.1007/BF00462040

Racine, R. (2005). Altitude, elevation and Seeing. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 117, 401-410. <u>doi</u>: 10.1086/429307

Rigaut, F. (2015). Astronomical adaptive optics. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 127(958), 1197-1203. doi: 10.1086/684512

Roddier, F. (1986). Guidelines for a Site Testing Campaign and the LASSCA Experience. In *Proceedings ESO Conference and Workshop Nº 24, Venice 2- October*. Recuperado de https://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.44-dec86/messenger-no44-36-37.pdf

Sánchez, S. F., Aceituno, J., Thiele, U., Perez-Ramirez, D., & Alves, J. (2007). The nightsky at the Calar Alto Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 119, 1186-1200. doi: 10.1086/522378

Sanchez, L. J., Cruz-Gonzalez, I., Echevarría, J. E., Ruelas-Mayorga, A., García, A. M., Avila, R., Carrasco, E. R., Carramiñana, A., & Nigoche-Netro, A. (2012). Astroclimate at San Pedro Mártir — I. Seeing statistics between 2004 and 2008 from the Thirty Meter Telescope site-testing data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 426, 635-646. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.21527.x

Sarazin, M., & Roddier, F. (1990). The ESO Differential Image Motion Monitor. *Astronomy & Astrophysics*, 227, 294-300. Recuperado de https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1990A&A...227...294S/abstract

Sarazin, M. (1992). Caracterisation des propriétes optiques de la turbulence atmospherique: Application au choix du site du VLT de l'Observatoire Européen Austral (ESO) (Tesis Doctoral). Universidad de Aix-Marseilla, Marsella.

Sarazin, M., & Sadibekova, T. (2005). Site Considerations for the Next Generation of Optical Arrays: Mid-latitude Sites versus Antarctica. In *Proceedings of the European Interferometry Initiative Workshop organized in the context of the 2005 Joint European and National Astronomy Meeting "Distant Worlds"*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/241198544

Shepherd, H. W., Osborn, J., Wilson, R. W., Butterley, T., Avila, R., Dhillon, V. S., & Morris, T. J. (2013). Stereo-SCIDAR: Optical turbulence profiling with high sensitivity using a modified SCIDAR instrument. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 437(4), 3568-3577. doi: 10.1093/mnras/stt2150

Skidmore, W., Els, S. G., Travouillon, T., Riddle, R. L., Schöck, M., Bustos, E., Seguel, J., & Walker, D. D. (2009). Thirty-Meter Telescope Site Testing V: Seeing and Isoplanatic Angle. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 121, 1151-1166. doi: 10.1086/644758

Steinbring, E., Millar-Blanchaer, M. A., Ngan, W., Murowinski, R. G., Leckie, B., & Carlberg, R. G. (2013). Preliminary DIMM and MASS Nighttime Seeing Measurements at PEARL in the Canadian High Arctic. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125, 866-877. doi: 10.1086/671482

Surendran, A., Parihar, P. S., Banyal, R. K., & Kalyaan, A. (2018). Development of a Lunar Scintillometer as part of the national large optical telescope site survey. *Experimental Astronomy*, 45, 57-79. doi:10.1007/s10686-017-9567-9

Swain, M. R., & Gallee, H. (2006). Antarctic Boundary Layer Seeing. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 118, 1190. doi:10.1086/507153

Teare, S. W., & Thompson, L. A. (2002). Long-Term Periodic Behavior in the Subarcsecond Seeing at Mount Wilson Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 114, 125-127. doi: 10.1086/338064

Tokovinin, A. (2002). From differential Image Motion to Seeing. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 114, 1156-1166. doi: 10.1086/342683

Tokovinin, A., Baumont, S., & Vasquez, J. (2003). Statistics of Turbulence profile at Cerro Tololo. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 340, 52-58. doi: 10.1046/j.1365-8711.2003.06231.x

Tokovinin, A., & Kornilov, V. (2007). Accurate Seeing measurements with MASS and DIMM. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 381, 1189-1207. doi: 10.1111/j.1365-2966.2007.12307.x

Tokovinin, A. (2023). The Elusive Nature of "Seeing". *Atmosphere*, 14(11), 1694. doi: 10.3390/atmos14111694

Trinquet, H., & Vernin, J. (2006). A Model to Forecast Seeing and Estimate C2N Profiles from Meteorological Data. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 118, 756-764. doi: 10.1086/503165

Thomas-Osip, J., Prieto, G., Berdja, A., Cook, K., Villanueva, S., DePoy, D., Marshall, J., Rheault, J., Allen, R., & Carona, D. (2012). Characterizing optical turbulence at the GMT Site with MooSci and MASSDIMM. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 124(911), 84. doi: 10.1086/664076

Travouillon, T., Schöck, M., Els, S. G., Riddle, R. L., & Skidmore, W. (2011). Using a Sodar to Measure Optical Turbulence and Wind Speed for the Thirty Meter Telescope Site Testing. Part II: Comparison with Independent Instruments. *Boundary-Layer Meteorology*, 141, 289-300. doi: 10.1007/s10546-011-9644-y

Ulich, B. L., & Davison, W. B. (1985). Seeing measurements on the Mount Graham. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 97(593), 609-615. doi: 10.1086/128144

Van Valin, C. C., Pueschel, R. F., Barrett, E. W., & Williams, G. M. (1982). Field observations of stratified atmospheric flow above an obstacle. *Boundary-Layer Meteorology*, 24, 331-343. doi: 10.1007/BF00121598

VanZandt, T. E., Green, J.L., & Clark, W.L. (1978). Vertical profiles of refractivity turbulence structure constant: comparison of observations by the Sunset Radar with a new theoretical model. *Radio Science*, 5, 819-829. doi: 10.1029/RS013I005P00819

VanZandt, T. E., et al. (1981). An improved model for the calculation of profiles of CN2 and ϵ in the free atmosphere from background profiles of wind, temperature and humidity. In *Proceedings of the 20th Conference on Radar Meteorology, Nov. 30-Dec. 3, 1981.* Recuperado de https://core.ac.uk/download/pdf/10395305.pdf

Vaucoleurs, G. (1964). Atmospheric Absorption at McDonald Observatory, 1960-64. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 77(465), 5-11. doi: 10.1086/128144

Vernin, J., & Muñoz-Tuñón, C. (1992). Optical seeing at La Palma Observatory. I -General guidelines and preliminary results at the Nordic Optical Telescope. *Astronomy and Astrophysics*, 257, 811-816. Recuperado de https://adsabs.harvard.edu/full/1992A%26A...257..811V

Vernin, J., & Muñoz-Tuñón, C. (1995). Measuring astronomical seeing: The DA/IAC DIMM. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 107, 265. doi: 10.1086/133549

Walker, M. F. (1971). Polar stars-trails observations of astronomical seeing in Arizona, Baja California, Chile and Australia. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 83, 401-422. doi:10.1086/129147

Walker, M. F. (1983). A Comparison of Observing Conditions on the Summit Cones and Shield of Mauna Kea. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 95, 903-918. doi: 10.40678258

Wilson, R. W., Bate, J., Guerra, J. C., Hubin, N. N., Sarazin, M., & Saunter, C. D. (2004). Development of a portable SLODAR turbulence profiler. *Proceedings SPIE*. doi: 10.1117/12.551258

Wang, H., Yao, Y., Liu, L., Qian, X., & Yin, J. (2015). Optical Turbulence Characterization by WRF model above Ali, Tibet. *Journal of Physics: Conference Series, 595*, 01203 doi: 10.1088/1742-6596/595/1/012037

Wolf, N. J. (1982). High Resolution imaging from the Ground. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 20, 367-398. doi: 10.1146/annurev.aa.20.090182.002055

Wolf, N. J., & Ulich, B. L. (1984). Gone with the wind, or sailing and seeing with a giant telescope". En *ESO Workshop on Site Testing for Future Large Telescopes* (163-182). La Silla, 4-6 October 1983.

Zago, L. (1995). *The effect of the local atmospheric environment on astronomical observations* (Tesis Doctoral). Ecole Polytechnique Fédérale de Lausana, Lausana.

Ziad, A., Gredel, R., Aceituno, J., Borgnino, J., Hoyo, F., Irbah, A., Martin, F., Thiele, U., & Pedraz, S. (2005). A site-testing campaign at the Calar Alto Observatory with GSM and DIMM instruments. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 362, 455-459. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.09299.x

APÉNDICE A

<u>CONTRIBUCIÓN DEL RMS DE CADA CAPA TURBULENTA AL FWHM</u> TOTAL

Diversos autores como Wolf y Ulich (1984) relacionan RMS parciales con la degradación integrada o total resultante como una aproximación:

$$Total FWHM2 = \Sigma (FWHMi)2$$
(1.1)

Por lo cual el FWHM o anchura de imagen a altura mitad de la distribución de energia de la mancha estelar telescópica no es la mera suma de los FWHM deducidos para cada estrato dado a partir del RMS de esa capa, sino la raíz cuadrada de la sumatoria de FWHM_i parciales de capa al cuadrado.

DEPENDENCIA DEL SEEING CON LA DISTANCIA ZENITAL

El tamaño de las imágenes, (disco de seeing) es dependiente de la refracción del aire y depende de la longitud de onda. Para telescopios de abertura grande, la imagen en el plano focal depende de las condiciones atmosféricas y tiene un tamaño angular $\underline{\alpha}$ que viene dado por:

$$\underline{\alpha} = 1.2^{*}206265 \ \lambda/r_{0}("); \quad donde \ r_{0}(\lambda) = r_{0}(\lambda_{0})^{*} (\lambda/\lambda_{0})^{1.2} \ ^{*}(\cos Z)^{0.6}$$
(1.2)

Donde la longitud de coherencia r_o (Parametro de Fried) el cual refleja el estado turbulento de la atmósfera. λ_0 referido a 500 nm. y Z la distancia cenital.

Para el disco de seeing úsese ro= 15 cm para λ =550nm. Puede consultarse también Chapter 4, The Point Design Section 4.5: Optics del 30-m Giant Segmented Mirror Telescope GSMT book.

En determinadas ocasiones y para simplificar puede usarse la aproximación:

$$\underline{\alpha} = (\operatorname{Sec} Z)^{0.6} \tag{1.3}$$

ESCALA DE ALTURA

Si consideramos que la variable dependiente (eje y) como la variación de 2,712 (e) respecto de la variable independiente (eje x) le hará corresponder a "y" una variación de altura que se llama "<u>escala de altura</u>". Las variaciones de muchos fenómenos

atmosféricos responden a esta ley logarítmica. Esta escala de altura tiene una altura típica para cada fenómeno físico considerado, y es diferente para diferentes gases, que puede extrapolarse a cualquier muestra de datos similares que provengan de diversas localizaciones. Por ello tiene un carácter predictivo dentro de los márgenes de error, según la bondad de los ajustes de regresión efectuados.

ESCALA EXTERNA DE TURBULENCIA (Longitud Lo)

Longitud de onda para la cual la densidad espectral de potencia longitudinal es igual a 0,05. La densidad espectral de potencia longitudinal es una magnitud adimensional definida en el anexo B de la Norma CEI 61400-1

La escala de longitud turbulenta se puede estimar como con L una longitud característica. Para los flujos internos, esto puede tomar el valor del ancho (o diámetro) del conducto de entrada (o tubería) o el diámetro hidráulico.

 L_0 (longitud de la escala externa) de las células convectivas que por definición es infinitamente grande y por tanto no afecta a las microcelulas medibles con el DIMM, que son de escasos centímetros de diametro. Por tanto, el DIMM es insensible a los cambios del L_0 .

Aunque teóricamente esta L_0 puede ser muy grande, en la práctica se considera que es de unos 10-30 metros como máximo y viene a coincidir con la longitud de las mayores parcelas de turbulencia identificables como homogéneas, causadas por estructuras de edificios y las rugosidades de gran tamaño de las cimas de la montaña.

La escala de la turbulencia disminuye a medida que disminuye la acumulación energética del espectro, esto se explica por el hecho de que al perder la fuente de perturbación (obstáculos naturales) los diámetros de los torbellinos van disminuyendo, hasta que estos desaparecen por completo y pasamos a un flujo laminar, o sea, la energía se disipa al perderse la fuente que la origina.

La información aquí presentada, puede consultarse a partir de los siguientes enlaces: https://es.abcdef.wiki/wiki/Turbulence_kinetic_energy https://doi.org/10.1093/MNRAS%2FSTS354

TURBULENCIA

En dinámica de fluidos se entiende por **turbulencia** a la de un flujo con baja difusión de momento, alta convección y variaciones espacio-temporales rápidas de presión y velocidad. Los flujos no turbulentos reciben la denominación de flujos laminares. El número de Reynolds define el carácter laminar o turbulento de un flujo.

Sobre un cuerpo con una configuración geométrica simple en forma de esfera un flujo de agua a baja velocidad tendría un carácter laminar (aunque pueda vincularse con vórtices de gran escala).

Conforme aumenta la velocidad las condiciones cambian y el flujo cambiará a turbulento en un determinado momento. Cuando aparece un flujo turbulento se presupone que surgen vórtices a distintas escalas que muestran interacción entre sí. De esta forma la fuerza de arrastre consecuencia de la fricción se incrementaría en la capa límite. Por ello, en ocasiones, aparece una reducción de la fuerza de arrastre global.

La escala integral de la turbulencia "L" proporciona una medida de la extensión de la región sobre la cual las velocidades están correlacionadas aproximadamente (ej.: el tamaño de los remolinos que llevan la energía del movimiento turbulento). De la misma manera, "T" provee una medida de la duración temporal sobre la cual las velocidades se mantienen correlacionadas (ej.: la duración de las vueltas de los torbellinos). Por razones obvias, la integral "T" es comúnmente llamada la integral de escala de tiempo de Euler. Asimismo, al realizársele la transformada de Fourier a la función de autocorrelación obtenemos la distribución energética presente en el espectro turbulento.



Disminución de la energía cinética al perder la fuente de perturbación.

La energía cinética puede expresarse por la ecuación:

$$\varepsilon \approx \frac{v^2}{\tau_K}$$
 (1.4)

Donde:

ε: Energía cinética

- *TK*: Escala de tiempo
- V: Velocidad del flujo.

La escala de la turbulencia disminuye a medida que disminuye la acumulación energética del espectro, esto se explica por el hecho de que al perder la fuente de perturbación (obstáculos naturales) los diámetros de los torbellinos van disminuyendo hasta que estos desaparecen por completo y pasamos al fluido laminar, o sea, la energía se disipa al perderse la fuente que la origina.

DIMM

DIMM o "Differential Image Motion Monitor". Con el tiempo este tipo de instrumento y algunas variantes se han convertido en un "Estándar" para la medida de campo de la calidad de imagen telescópica, donde no se posea aun, gran infraestructura o donde de manera rutinaria se desea monitorizar el seeing astronómico.

Hay varios autores que describen los detalles técnicos de versiones parecidas del DIMM por lo que remitimos entre otros muchos a: Giovanelli et al (2001); Muñoz-Tuñon et al (1997); Vernin, J., & Muñoz-Tuñón, C. (1995); Tokovinin, A. (2002); Sarazin & Roddier (1990).

<u>H-DIMM</u>

Propuesto por Bally et al (1996) utilizan una variante del monitor de seeing llamada H-DIMM pues en lugar de una cuña óptica en las subaperturas del telescopio, utilizan una máscara de Hartman, que dispone de una gran cantidad de aperturas en la entrada del telescopio

<u>G-DIMM</u>

Esta forma del DIMM es capaz de medir los más diversos parámetros que componen el seeing estelar tal como el tamaño o disco de seeing llamado \in , el Angulo isoplanatico, llamado θ_0 , el tiempo de coherencia o τ_0 , así como la escala externa de turbulencia \pounds_0 . Ver el trabajo de *Aristidi et al (2014)*

MASS-DIMM

"MAS/DIMM" expuesto por Kornilov et al (2010) es básicamente es un instrumento DIMM modificado, pues en lugar de dos sub-aperturas separadas unos 20 cm. entre ellas posee tres sub-aperturas y combinando la posición y los cambios de intensidad detectados es posible reconstruir unas "cuasi" completas características turbulentas de la atmosfera, al menos en el primer kilómetro sobre el lugar de medición.

Mascara de HARTMAN

Máscara de Hartmann (en la figura de abajo). Esta máscara se basa en que cuando un objeto está lo suficientemente alejado sus rayos se pueden considerar paraxiales. Por lo tanto, si abrimos dos o más aberturas en una máscara esta formará una imagen enfocada cuando todas las imágenes que la máscara produzca estén perfectamente superpuestas. En astronomía se utiliza no solo para enfoques de precisión del telescopio sino para numerosos experimentos que tienen que ver con la calidad de imagen y el seeing como el MASS-DIMM



C_T²

Es la varianza de la estructura de la temperatura de un sondeo atmosférico entre dos niveles dados y entre dos tiempos de integración. Normalmente se utiliza el RMS o dispersión de la Serie de valores (X_n Y_n) donde X representa el tiempo e Y los valores de temperatura, que pueden ser absolutos o diferenciales, en grados centígrados o en grados Kelvin, siendo lo usual trabajar con ^o Kelvin en las ecuaciones usadas. En caso de medidas microtermales puede usarse el diferencial de temperatura en ^oC. entre dos o más sensores separados espacialmente y que toman medidas simultaneas de la temperatura T. Se puede calcular como:

$$C\tau^{2} = [T(\underline{x}) - T(\underline{x} + \underline{r})]^{2} / r^{2/3}$$
(1.6)

Donde <u>x</u> y r son vectores de posición. La barra superior indica que se promedia durante un intervalo de tiempo. De este C_T^2 podemos derivar <u> C_N^2 . (r esta normalizado a 1</u> <u>metro) Por tanto nuestro RMS en forma integrada de los diferenciales de temperatura</u> <u>entre dos sensores</u> $T(\underline{x}) - T(\underline{x} + \underline{r})$ separados 1 m. (r)

$$C_{T}^{2} = RMS^{2} / r^{2/3} = \sigma^{2} / r^{2/3}$$
(1.7)

<u>El RMS ° C (en forma diferencial) puede ser entendido como la sigma σ del desplazamiento de la temperatura de las parcelas de aire separadas un metro.</u>

<u>Cn²</u>

Es la estructura de la variación del índice de refracción de las distintas capas de la atmosfera sondeadas mediante un sistema de medida térmico como puede ser un sensor microtermal Podemos derivarla de C_{τ}^2 mediante:

$$C_{\underline{N}^2} = C_{\mathcal{T}^2} * (80^* 10^{-6} \text{ P/T}^2)^2$$
(1.8)

Con P en hPa o milibares, T² en ^oKelvin y C_T² en ^oKelvin.

 C_T^2 podemos considerar que es la varianza de una serie X, Y de valores de temperatura o incrementos de temperatura entre los dos sensores microtermales separados un metro entre sí. En definitiva, es el cálculo de Varianza sobre el error típico de la serie de datos.

Nosotros aplicamos una fórmula de ERRORTIPICO.XY. de Excel, que obvia los posibles errores por cambios de pendiente de los componentes de muy baja frecuencia temporal y que típicamente son grandes con tiempos mayores de 5 segundos. Nosotros operamos a 10 Hz/Seg. para resultar operativos en la correcta estimación del valor de error típico o "estándar". El tiempo de muestreo de nuestras estimaciones de RMS es de entre 5 -10 segundos.

Nosotros medimos variaciones miligrado centígrado con nuestros sensores a bordo de drones que vuelan a alturas de hasta 150 m. sobre el suelo, permaneciendo estacionarios a esa altura entre 10 y 30 segundos y lo mismo en las capas de altura 120, 100, 50, 30, 20, 15, 10, 5 y 2,5 m sobre el terreno. Sobre cada una de estas se calcula un error típico RMS representativo de cada nivel de altura sobre el suelo. La sumatoria promediada de una serie de niveles da un RMS integrado entre el nivel más bajo y mas alto del vuelo efectuado.

Dichas integrales de las variaciones microtermales de temperatura son traducidas desde error típico XY (RMS) a varianza, o C_T^2 y finalmente a <u> C_N^2 </u> y r₀, para

deducir el valor aproximado de disco seeing θ , referido al FWH de la distribución de energía transversal, como es norma en medidores de seeing tipo DIMM.

Parametro de Fried ro (Longitud de coherencia atmosférica)

El parámetro de Fried o longitud de coherencia es una medida de la calidad de la transmisión óptica a través de la atmosfera. En la práctica, esto es debido a la pequeña inhomogeneidad en el índice de refracción del aire, al variar ligeramente la temperatura de células adyacentes a lo largo de todo el paso considerado. Las escalas espaciales van desde pocos mm. a cientos de metros, considerando que existen una serie de escalas de turbulencia desde las muy pequeñas a muy grandes, conteniendo las ultimas a las primeras. Ello fue descrito inicialmente por Kolmogorov.

El parámetro de Fried se expresa en cm. Se define como el diámetro de un área circular sobre la cual la aberración del frente de onda de la luz RMS es igual a 1 **radian.** Los valores típicos en astronomía están en el orden de pocas decenas de centímetros, dependiendo de las condiciones meteorológicas.

Para un telescopio de diámetro del punto más pequeño que se puede observar (imagen de difracción) viene determinada por la PSF o función de dispersión puntual del telescopio.

La turbulencia atmosférica aumenta la dispersión de la mancha más pequeña como D/r₀, referido a exposiciones largas. Para un telescopio de pequeño diámetro D< r₀ el efecto no tiene importancia, dado que la imagen de difracción del telescopio es ya de por si mayor que r₀. Para telescopios con D>> r₀ existirá una importante componente atmosférica en la PSF que limitará el poder resolutivo de un gran telescopio, siendo difícil separar objetos puntuales separados por menos de 1-2 segundos de arco.

Aunque no está especificado explícitamente, el parámetro de Fried (r_0) puede expresarse en términos de <u>"fuerza de turbulencia atmosférica"</u> (C_n^2), que es en realidad una función de las pequeñas fluctuaciones de temperatura a lo largo del paso atmosférico de la luz de un objeto puntual distante, como es una estrella. Siendo en el caso de observaciones al cenit:

$$\mathbf{r}_{0} = \left| 0.423k^{2} \int_{h_{0}} C_{n}^{2}(h) dh \right|^{-3/5}$$
(1.9)

En lugares seleccionados para observatorios los valores típicos de r₀ pueden variar entre los 5 y los 20 cm., para condiciones de seeing excelentes. En estas

condiciones las limitaciones vienen impuestas por la propia atmosfera, mientras que la resolución impuesta por el límite de difracción del telescopio varia con:

Siendo del diámetro de apertura en el telescopio, y λ = 0.5 micras. Dado que los telescopios profesionales tienen diámetros mucho mayores que D. solo pueden alcanzar todo su poder resolutivo mediante técnicas añadidas de corrección del frente de onda con óptica adaptativa (AO).

Aunque expresado formalmente abajo, podemos decir de manera apresurada que r_0 vendria a ser el tamaño de la célula imperturbada por efectos térmicos en una atmosfera real, asi para un seeing θ de 1"arco dicha célula debería tener un mínimo de 10 cm. de diámetro. En este caso un telescopio de 10 cm. de apertura llegaría fácilmente a su límite de difracción en la longitud de onda visible.

El parámetro de Fried o diámetro de coherencia (r₀) de la imagen que puede estimarse como:

$$\theta$$
 arcsecond ~ 10 cm/ r₀ (1.11)

El efecto del seeing a través de una capa atmosférica de altura H puede ser expresado como la función integral del coeficiente de estructura de refracción, llamado C_N^2 del cual podemos obtener alternativamente, el parámetro de Fried r_{0:}

$$\mathbf{r}_{0} = \left[0.12(2\pi/\lambda)^{2} SEC\gamma \int_{H} CN^{2}(Z)dZ \right]^{-3/5}$$
(1.12)

Donde Y es el angulo cenital en la dirección de observación y λ en m. A su vez el <u>FWHM</u> de la imagen estelar dada por un telescopio vendrá relacionada con r₀, según Dierickx (1992)

$$FWHM = 0.98\lambda/r_0$$
 (1.13)

Siendo λ la longitud de onda de la la luz en micras. Análogamente el <u>FWHM</u> (Rociado de θ del disco se seeing en segundos de arco) es dado por:

$$\theta = 1.085 \cdot 10^6 \,\lambda^{-1/5} \left[(\cos \gamma)^{-1} \int_{\mathcal{H}} C_N^2(z) dz \right]^{3/5} \tag{1.14}$$

Donde Y es el ángulo cenital en la dirección de observación.

Para una dirección de observación vertical y λ = 500 nm, el angulo θ *FWHM* es:

$$\theta = 2.0^* 10^7 \left[\int_H CN^2 \left(Z \right) dz \right]^{3/5}$$
(1.15)

Teniendo con esta última formula una versión muy simplificada para poder pasar de C_N^2 a FWHM del disco de seeing.

En caso de querer pasar directamente de C_T^2 a disco de seeing *FWHM* y para las condiciones de entorno habituales en una montaña (presion 770 mb, temperatura 10 C, podemos obtener de forma generalizada:

$$\theta = 0.91 \left[\int_{H} CT^{2} (Z) dZ \right]^{3/5}$$
(1.16)

El dz se expresa en metros. De esta fórmula es posible derivar la tabla de valores representativos de tamaño de imagen (Grafico inferior)

(Esta fórmula es muy adecuada a vuelos con globos meteorológicos, que rebasan todas las capas turbulentas existentes, pero no tanto al caso de vuelos con drones, limitados a 150 m altura, siendo preferible calibrar nuestros sensores microtermales con seeing DIMM a efectos de deducir un FWHM de la imagen estelar mínimamente fiable).

Tiempo de coherencia

Para una onda electromagnética, el tiempo de coherencia es el intervalo durante el cual la onda puede ser considerada coherente, esto es, su fase es, en promedio, previsible.

En sistemas de transmisión de larga distancia los tiempos de coherencia pueden ser reducidos por factores que afectan a la propagación como la dispersión, el scatering y la difracción.

El tiempo de coherencia, normalmente designado como *τ*, se calcula dividiendo la longitud de coherencia entre la velocidad de fase de la luz en un medio dado; y suele expresarse como:

$$T = \frac{1}{\Delta \nu} \sim \frac{\lambda^2 2}{c \Delta \lambda} \tag{1.17}$$

donde λ es la longitud de onda central de la fuente, $\Delta v y \Delta \lambda$ son el ancho espectral de la fuente en unidades de frecuencia y longitud de onda respectivamente, y c es lavelocidad de la luz en el vacío.

En el caso de la observación de estrellas con un telescopio se refiere al tiempo en que la imagen permanece cuasi-estática, no desplazada por efecto de la variación causada al frente de onda esférico de la luz estelar, la cual, al atravesar capas turbulentas de la atmosfera terrestre puede desplazarse. Cuanto mayor sea el tiempo de coherencia habrá menor turbulencia y por tanto mejor calidad de imagen.

Sensor Microtermal

Suele referirse a un dispositivo que mide las diferencias (usualmente milésimas de Kelvin) entre dos sensores térmicos separados una distancia (por norma 1 metro) que toman cada X tiempo un par de medidas, que son usadas para derivar parámetros atmosféricos muy útiles en el estudio de la turbulencia y la calidad de imagen, como son C_T^2 y de este derivar C_N^2 y de este último deducir_ro. Con ello y solo con la aportación de las medidas microtermales es posible llegar a un número que nos da una calidad de imagen estandarizada y aceptada actualmente por la comunidad astronómica, cual es el parámetro de Fried.

Su construcción está basada en resistores de hilo o película metálica, normalmente de platino, o bien en aglomerados del tipo NTC, todo ellos deben tener muy baja masa, en orden a poder detectar variaciones de temperatura ambiente con suma rapidez. Ciertamente debemos señalar que hay que extrapolar los valores del diferencial microtermal a parámetro de Fried con dos pasos adicionales de deducción teórica de la calidad de imagen. Ello puede llevar a que se tengan errores apreciables en la determinación del parámetro r₀

Una manera alternativa de soslayar este salto teórico es cruzar los datos de un sistema DIMM suficientemente calibrado y probado, con otros de su misma especie, con los datos microtermales de torres meteorológicas u otros obtenidos mediante drones o globos meteorológicos. También en este caso existe una indeterminación, que solo una muestra estadística robusta, permitirá minimizar. Este ha sido a la postre el sistema adoptado en nuestro trabajo, con independencia de que se puedan presentar los datos también a través del formalismo de obtención del parámetro de Fried r₀.

OA (Optica Adaptativa)

La óptica adaptativa es actualmente una tecnología madura que permite mejorar la resolución angular de las imágenes tomadas a través de grandes telescopios en tierra. Muchos de los mayores observatorios astronómicos ya disponen de ella y también está previsto instalarla en el telescopio extremadamente grande ELT de la ESA en Cerro Armazones, norte de Chile. Dada la notable complejidad de la técnica remitimos a Rigaut, (2015) para obtener una visión sintetizada de la tecnología OA.

https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2015PASP..127.1197R/doi:10.1086/6845 12.

RMS Y TRMS

El **RMS** (Root Mean Square) o **Valor Eficaz** es una medida que se utiliza para calcular la magnitud de una serie de valores. Se calcula como la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los valores (web de promax). La medida RMS es fiable cuando la onda sinusoidal es perfecta, porque esta medida solo tiene en cuenta el valor de pico de la forma de onda (web de promax).

"Por otro lado, el **TRMS** (True RMS) o Verdadero Valor Eficaz utiliza fórmulas matemáticas más complejas que permiten obtener un valor más aproximado a la realidad que los RMS. A diferencia de los medidores RMS, los TRMS son capaces de realizar operaciones matemáticas más complejas tomando en cuenta no solo los picos de tensión, sino también valores de la onda en varios de sus ciclos. Además de los valores de pico, toman varias muestras de los valores a lo largo de cada uno de los ciclos" (web de promax).

"Por lo tanto, la principal diferencia entre RMS y TRMS radica en su precisión al medir corrientes alternas. Los instrumentos con TRMS son mucho más precisos que los RMS midiendo corriente alterna" (web de promax).



Representación gráfica de σ

En la práctica podemos considerar que RMS es equivalente a +/- 1σ .

Scidar Generalizado

Una variante de monitor de seeing lo tenemos en el "Scidar Generalizado", Fuchs et al. (1998) que permite muestrear las distintas capas atmosféricas de manera remota, incluyendo la capa superficial. La técnica un tanto compleja, muestra los intentos de los astrónomos por determinar completamente el comportamiento atmosférico, capa a capa.

Stereo-SCIDAR

Sheperd et al. (2013) definen asi al nuevo instrumento, "Stereo-SCIDAR", que a través de un sistema óptico estereoscópico ve la figura de un sistema de estrella doble, incidiendo en dos sistemas ópticos y dos cámaras separadas entre sí. Separar las dos pupilas de imagen tiene varias ventajas, entre ellas un aumento de la relación señal/ruido (S/R) de hasta 16 veces en el caso de estrellas dobles de la misma magnitud y mejoras de dicha relación, notables aun, en caso de que la diferencia en brillo del sistema doble sea hasta de 3 magnitudes.

Polar Stars Trail"

(Ver Stars Trails). La técnica descrita se aplica en este caso, a los trazos dejados por la estrella Polar en una película fotográfica o en un detector electrónico del tipo CCD. (Véase Birkle et al,. (1976) y Walker (1971).

Centelleo (Scintillation)

Variación temporal de la intensidad luminosa del disco de seeing visto a través de un telescopio de apertura razonablemente grande (1 m. o más) Es uno de los componentes del seeing, frecuentemente asociado con la turbulencia en las capas altas de la troposfera entre 8-16 km. de altura.

SODAR

Una especie de radar acústico que puede emitir y recibir sonidos reflejados por las capas atmosféricas. Su aspecto es el de un altavoz gigante (1 m. o más). Este instrumento SODAR se ha es poco adecuado para medida de turbulencia en lugares con obstáculos altos y edificios cercanos al mismo.

<u>SLODAR</u>

Descrito por Wilson et al. (2004) como nueva y potente herramienta de análisis del seeing como el denominado al que denominan "SLODAR". Utiliza máscaras en el telescopio y estrellas dobles para determinar el perfil de turbulencia atmosférica, vía triangulación.

SNODARS

Sondeo acústico perfeccionado. Véase Bonner et al. (2010)

<u>SEEING</u>

Tomado de Giovanelli et al. (2001)

El Seeing astronómico es la distorsión del frente de onda de radiación de una fuente cósmica, producida por variaciones en el índice de refracción del aire. En las condiciones propicias para las observaciones astronómicas, las fluctuaciones de presión y de vapor de agua son insignificantes, por lo que las variaciones del índice de refracción resultan principalmente de las fluctuaciones térmicas asociadas al flujo de aire turbulento. La función de estructura de la temperatura de una capa atmosférica a una altitud sobre define h el suelo se en forma de covarianza:

$$D_T(r, h) = [\Delta T(r, h)^2]$$
 (1.18)

Donde Δ T (r, h) es la diferencia de temperatura entre dos puntos separados por una distancia r y al mismo nivel.

Esto es aplicable en en una amplia gama de escalas, entre un mínimo de unos pocos milímetros por debajo de la cual la turbulencia se amortigua y un máximo de unos pocos kilómetros, en la que se inyecta turbulencia, por ejemplo, por un obstáculo como una cadena montañosa y en el marco del tratamiento de Kolmogorov, generalmente podemos decir que:

$$D_{\rm T}({\rm r}) \propto {\rm r}^{\beta} \tag{1.19}$$

Donde $^{\beta}$ es ~2/3 (Tatarski 1961). La proporcionalidad en la ecuación es determinada por la escala independiente del parámetro de la estructura de temperatura (Roddier 1981):

$$C_T(h) = D_T(r) / r^{2/3}$$
 (1.20)

Lo cual se relaciona con el parámetro de la estructura del índice de refracción vía:

$$C_n^2(h) = C_T^2(h) [80 \times 10^{-6} P(h)/T^2(h)^2]$$
 (1.21)

Donde las unidades de C_n^2 , presion P(h), y temperatura se dan respectivamente en m^{2/3}, mb, y grados K. La escala de coherencia espacial de la turbulencia atmosférica se expresa mediante el parámetro de Fried r₀ (en metros):

$$r_{0} = \left[0.423k^{2} \sec(\text{ZA}) \int_{h_{0}}^{\infty} C_{n}^{2}(h) dh\right]^{-3/5}$$
(1.22)

Donde k es la longitud de de onda en metros, ZA es el angulo cenital de la linea de visión, siendo h₀, la elevación del telescopio sobre el suelo en metros. Finalmente, el (FWHM) de una imagen estelar a la longitud de onda λ es:

$$\theta_{\rm fwhm} = 0.98 \,\frac{\lambda}{r_0} \,. \tag{1.23}$$

Por esta razon con un telescopio de un diámetro dado D degrada la resolución de la imagen desde su límite de difracción con $\theta_{diff} \propto \lambda/D$ hasta el límite de difracción de

un telescopio de diámetro r₀ : lo que significa que $\theta_{fwhm} \propto \lambda/r_0$. Y dado que r₀ es proporcional a k ^{-6/5}, como se indica en la ecuación (5) y con $\lambda = 2 \underline{\pi}/k$; entonces:

$$\theta$$
 fwhm $\propto \lambda^{-0.2}$ (1.24)

Todas las capas de la atmósfera contribuyen al seeing, como se ilustra en la ecuación (5). La turbulencia que se origina en el enclave del telescopio se denomina seeing de cúpula. En nuestras mediciones in situ, el seeing de cúpula, así como la originada por las diferencias de temperatura entre el espejo y el aire, es nula, ya que nuestro telescopio tiene una capacidad térmica extremadamente pequeña y opera al aire libre. El seeing originado por los flujos convectivos entre el suelo y los pocos metros por encima de él, y por la turbulencia originada por el flujo de aire entre los edificios del observatorio, se conoce generalmente como seeeing de la capa superficial del suelo. El seeing originado por interacciones a gran escala entre el suelo y la atmósfera inferior, como el aire que fluye sobre irregularidades topográficas, se denomina seeing de capa límite. En lo sucesivo, nos referiremos al efecto conjunto de la capa superficial del suelo y la turbulencia de la capa límite como seeing de la capa límite. El espesor de la capa límite varía entre 200 y 2000 m, dependiendo de la topografía local, la latitud, la velocidad del viento, la amplitud del ciclo térmico diurno y otros parámetros ambientales. Los flujos catabaticos -vientos asociados al flujo descendente de aire más frío procedente de las cimas de las montañas- pueden considerarse un subconjunto del componente de la capa límite. Afectan principalmente a lugares situados en las laderas y cerca del pie de picos importantes. Por último, la contribución al seeing de la parte de la atmósfera que se encuentra por encima de la capa límite, en la que el flujo de aire se denominará seeing suele ser casi laminar, de la atmósfera libre.

La visión de los cuerpos celestes está muy afectada por la turbulencia atmosférica, pues la luz de estos atraviesa diversas capas de la atmosfera con ligeros índices de refracción que dispersa la luz en un círculo más o menos amplio dependiendo de la amplitud en la variación del índice de refracción Cn². A medida que la onda luminosa se propaga a través de la atmósfera turbulenta, experimenta fluctuaciones de amplitud y fase. La imagen que se forma al enfocar esta onda presenta fluctuaciones de intensidad, nitidez y posición que se denominan comúnmente centelleo, desenfoque de la imagen y movimiento de la imagen. Existen otros instrumentos, aparte de DIMM para estudiar características adicionales de la calidad de imagen y separar los distintos componentes del seeing, asi como determinar que capas atmosféricas contribuyen

especialmente en estos efectos, entre ellos cabe destacar el SODAR (Sound Detection And Ranging) o sondeo acústico que presenta varias formas instrumentales.

Se puede denominar "Seeing" a la visión observada por un telescopio en tierra donde contribuye toda la atmósfera atravesada por el frente de la onda luminoso y se distinguen tres causas principales de contribución:

- La turbulencia en la alta atmosfera, (FA) la cual es máxima en las cercanías de la tropopausa (12-16 Km.) Esta capa es, en particular, es responsable del efecto de borrosidad de la imagen también llamado Scintillation.
- 2. La turbulencia de la capa limite atmosférica (BL) variable (30-500 m.).
- La turbulencia de la capa superficial (GL) (entre la superficie y los 30-50 m. de altura) Esta turbulencia es provocada por la rugosidad del terreno, árboles y edificios. Suele ser muy intensa, sobre todo con condiciones de viento fuerte o la presencia de inversiones térmicas y células convectivas ascendentes.

Una cuantificación rigurosa del efecto del seeing depende también del tiempo de exposición. En la mayoría de los usos astronómicos el seeing es considerado para un tiempo de exposición largos (Varios minutos) en la cual el tiempo de exposición es mayor que aquel tiempo en que los desplazamientos del frente de onda pasan delante de la apertura del telescopio. En la práctica, para un gran telescopio de varios metros de apertura son usuales exposiciones de 10 a 30 segundos y por tanto aparece una mancha (blurring) al examinar la imagen obtenida en ese tiempo, que es una mezcla de desplazamiento espacial y de cambios de intensidad de las células de difracción, usualmente mucho menores que la apertura del telescopio.

"Existen diferentes métodos de medir o estimar el seeing. Con telescopios grandes se pueden hacer buenas estimaciones por la medida directa de la imagen utilizando la mayor resolución. Para tener un instrumento medidor de seeing, que sea transportable, la ESO ha desarrollado un sistema con un telescopio de 35 cm. de apertura, para probar la calidad de imagen en diferentes sitios este instrumento se denomina DIMM (Differential Image Motion Monitor) basado en un método en el cual el movimiento de la imagen, en exposiciones de corta duración, está relacionado con exposiciones más largas en telescopios de mayor diámetro".

Fuente: Sarazin, M., (1992) Caracterisation des propriétes optiques de la turbulence atmospherique: Application au choix du site du VLT de l'Observatoire Européen Austral *(ESO)*, thèse, Université d'Aix-Marseille.

El tamaño de imagen esta referido al FWHM del diámetro de la imagen. En este trabajo nosotros usaremos el FWHM del disco de seeing como unidad de medida del seeing.

Stars Trails (Trazos estelares)

Un trazo estelar es una forma de registro fotográfico que se obtiene con tiempos de exposición amplios para registrar el movimiento aparente de las estrellas durante la noche a causa de la rotación de la Tierra. Así, en estas fotografías aparece el trazo estelar de cada una de las estrellas observadas. Suele usarse la Estrella Polar. Las velocidades de obturación típicas para una exposición estelar oscilan entre 5 minutos y varias horas. Si se examinan con detenimiento y suficiente aumento, dichos trazos estelares muestran desplazamientos erráticos del centroide de la mancha luminosa. Estos desplazamientos son los que utilizan los modernos medidores de seeing como el DIMM en sus distintas modalidades para determinar la turbulencia atmosférica y la calidad de imagen en un momento dado en un lugar dado.

Numero de Reynolds

El número de Reynolds (Re) es adimensional y se utiliza en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido. Su valor indica si su régimen es laminar o turbulento.

Se puede representar un flujo turbulento, como una calle de vórtices alrededor de un cilindro. Esto ocurre para cualquier fluido, tamaño del cilindro u obstáculo y velocidad del fluido, siempre que tengan un numero de Reynolds comprendido entre 40 y 1000 puede considerarse laminar con ausencia de vórtices turbulentos.



"En problemas donde el fluido considerado es el agua, se ha demostrado mediante experimentación en laboratorio que entre un número de Reynolds de 2000 a 3000 se encuentra la etapa de transición laminar-turbulento en el flujo de la capa límite. Sin embargo, para efectos prácticos se considera":

Para que el flujo será laminar.

Numero de Richardson

En mecánica de fluidos, el número de Richardson (Ri) es un numero adimensional que expresa la relación entre la energía potencial y la energía cinética de un fluido. Sin embargo, es más usual utilizar el reciproco de la raíz cuadrada del número de Richardson (Ri), conocido como numero de Froude

$$\{Ri\} = mg h \setminus u^{2}\}$$
(1.27)

Donde:

Ri es el número de Richardson, g es la aceleración de la gravedad (m/s²), h la longitud característica vertical y u la velocidad característica del fluido.
APÉNDICE B

<u>MÉTODO ABREVIADO DEL CALCULO DEL DISCO SEEING DESDE</u> <u>MEDIDAS MICROTERMALES</u>

Este método breve esta tomado de Marks et al. (1996).

PRINCIPIOS DE MEDIDA DEL SEEING.

Los principios de la turbulencia atmosférica aplicado al caso del seeing astronómico están actualmente bien establecidos. (Roddier, 1981).

El parámetro de Fried (r₀) representa la apertura del diámetro de un telescopio para la cual la imagen del límite de difracción de dicha apertura iguala al FWHM de turbulencia atmosférica en un momento dado.

La relación entre este parámetro introducido por Fried en 1966 y la turbulencia atmosférica o "Seeing" es entonces:

$$r_0 = (16.7\lambda^{-2} \int_0^\infty C_N^2 (h) dh)^{-3/5}$$
 (2.1)

Donde h es la altura a través de la atmosfera, C_N^2 (h) es la estructura del índice de refracción de ese paso atmosférico y λ es la longitud de onda (normalmente 0.5 micras) Siguiendo el trabajo de Rodier, 1981, el tamaño angular en segundos de arco del FWHM del rociado de la imagen, es dada por Dierickx, (1992) como:

$$\theta FWHM = 0.98 \lambda/r_0 \tag{2.2}$$

Y, por lo tanto:

$$\theta$$
FWHM = 5.25 $\lambda^{-1/5} \left(\int_0^\infty C_N^2(h) dh \right)^{3/5}$ (2.3)

La estructura del índice de refracción puede expresarse, en este caso, como la contribución de la suma de las distintas capas turbulentas de toda la atmósfera. Esto se puede relacionar directamente con la estructura del índice de estructura de temperatura del paso atmosférico como:

$$C_n^2(h) = C_T^2(h) [80 \times 10^{-6} P(h)/T^2(h)^2]$$
 (2.4)

Donde P(h) es la presión y T(h) la temperatura.

El método usado para calcular C_n^2 involucra medidas de la función de estructura de temperatura $D_T(r, h)$ definido como la varianza media, de medidas de un par de sensores de temperatura separados a una distancia r, que se encuentra por norma a 1 m. distancia. Las medidas tomadas en el Polo Sur por Marks tenían una frecuencia de 1/seg. Y fueron integradas cada 60 seg. (el rango o número de medidas debe ser el suficiente para tener una varianza consistente, en nuestro caso son 100 medidas a lo largo de 10 segundos de muestreo).

Esto está relacionado con $C_T^2(h)$ por:

$$D_T(r, h) = C_T^2(h) r^{2/3}$$
 (2.5)

Hay que tener en cuenta que los resultados de cada nivel o capa θ FWHM no se suman linealmente para obtener la contribución total de las distintas capas, sino:

$$\theta Total = (\sum_{i} \theta_{i}^{5/3})^{-3/5}$$
(2.6)

<u>APÉNDICE C</u>

TABLA DE VALORES DE SEEING EN DISTINTOS OBSERVATORIOS

<u>LUGAR</u>	<u>EPOCA</u>	<u>METODO</u>	<u>MEDIA</u>	<u>MEDIANA</u>	<u>ALTITUD</u>	<u>NOTAS:</u>
			<u>(")</u>	<u>(") ARCO</u>		
			<u>ARC</u>			
			<u>0</u>			
<u>Mount Wilson</u>	1920	<u>VISUAL</u>	<u>1.4</u>			<u>Pease</u>
						<u>(1923)</u>
<u>Mount Wilson</u>	1920	<u>VARIOS</u>		<u>1</u>	<u>1750</u>	<u>Teare et</u>
	-		<u><1</u>			<u>al. (2002)</u>
	2000					
<u>Mount Graham</u>	1985	<u>FOTOGRAFICO</u>	<u>0.8</u>	<u>0.8</u>	<u>3250</u>	<u>Ulich y</u>
						<u>Davidson</u>
						<u>(1985)</u>
<u>Las Campanas</u>	1990	<u>CCD</u>		<u>0.6</u>	<u>2380</u>	<u>Persson et</u>
						<u>al (1990)</u>
SIERRA NEGRA	2000	<u>DIMM</u>	<u>0.78</u>	<u>0.7</u>	<u>4580</u>	<u>Carrasco</u>
<u>(Mex)</u>						<u>et al.</u>
						<u>(2003,2005)</u>
<u>ALI (CHINA)</u>	2010	<u>VARIOS</u>		<u>0.53</u>	<u>5050</u>	<u>Honqshuai</u>
	-					<u>Wang et</u>
	2015					<u>al. (2015)</u>
Abune Yousef	2019	<u>DIMM</u>		<u>0.73</u>	<u>3400</u>	<u>Mekuriaw</u>
(Etiop)						<u>(2019)</u>
<u>Hanle (INDIA)</u>	2014	<u>MICROTERMAL</u>		<u>0.7</u>	<u>4500</u>	<u>Dhananja</u>
						<u>y (2014)</u>
Sutherland (SWA)	2010	<u>DIMM</u>		<u>1.3</u>	<u>1200</u>	<u>Catala et</u>
						<u>al. (2013)</u>
OBS. SUDAFRICA	2000	<u>VARIOS</u>		<u>0.9</u>	<u>1750</u>	<u>Erasmus</u>
						<u>(2000)</u>

<u>Shatdzhatmaz(Rus)</u>	1990	<u>DIMM</u>		<u>0.96</u>	<u>2160</u>	<u>Gur'yanov</u>
						<u>et al.</u>
						<u>(1992)</u>
<u>Maidanak</u>		<u>DIMM</u>		<u>0.69</u>	<u>2580</u>	<u>Racine</u>
<u>(UzBekistan)</u>						<u>(2005)</u>
<u>Isla de la Palma</u>	1980	<u>Star trails</u>	0.8-1	7	<u>2400</u>	<u>Hartley et</u>
<u>(Esp)</u>						<u>al (1981)</u>
<u>Isla de la Palma</u>	2010	<u>DIMM</u>		<u>0.89</u>	<u>2400</u>	<u>Gurtabai</u>
<u>(Esp)</u>						<u>et al.</u>
						<u>(2013)</u>
<u>Ellesmere</u>	2010	<u>DIMM</u>	<u>0.85</u>	<u>0.76</u>	<u>1400</u>	<u>Steinbring</u>
<u>(Canada)</u>						<u>et al.</u>
						<u>(2013)</u>
<u>Dome C (Antartica)</u>	2005	<u>DIMM</u>			<u>3250</u>	<u>Aqabi et</u>
						<u>al (2006)</u>
<u>Dome C (Antartica)</u>	2005	<u>DIMM</u>		<u>0.54</u>	<u>3250</u>	<u>Aristide</u>
						<u>et al.</u>
						<u>(2005a-</u>
						<u>2005b)</u>
<u>Dome A (Antartica)</u>	2010	<u>SNODARS</u>		<u>0.3</u>	<u>4080</u>	<u>Bonner et</u>
						<u>al (2010)</u>
<u>Dome C (Antartica)</u>	2000	<u>DIMM</u>	<u>0.29</u>	<u>0.3</u>	<u>3250</u>	<u>Fossat</u>
	-					<u>(2011)</u>
	2010					
<u>Dome A (Antartica)</u>	2018	<u>DIMM</u>	<u>0.3</u>		<u>4080</u>	<u>YI HU et al</u>
						<u>(2018)</u>
<u>Cerro Tololo (Chile)</u>	2000	DIMM		<u>0.95</u>	<u>2200</u>	<u>Tokovinin</u>
						<u>et al.</u>
						<u>(2003)</u>
<u>Cerro Chico (Chile)</u>	2000	DIMM		<u>0.7</u>	<u>5150</u>	<u>Giovanelli</u>
						<u>et al (2001</u>

<u>Chajnantor (Chile)</u>	2000	<u>DIMM</u>	<u>1.1</u>	<u>5050</u>	<u>Giovanelli</u>
					<u>et al (2001</u>
<u>Cerro Tololo (Chile)</u>	2009	<u>DIMM</u>	<u>0.79</u>	<u>2200</u>	<u>ELS et al,</u>
					<u>(2009)</u>
<u>Cerro Tololo (Chile)</u>	2010	<u>DIMM</u>	<u>0.78</u>	<u>2200</u>	<u>Sánchez et</u>
					<u>al (2012)</u>
<u>Las campanas</u>	2008	<u>DIMM</u>	<u>0.71</u>	<u>2380</u>	<u>Thomas–</u>
(Chile)	-				<u>Osip et al.</u>
	2009				<u>(2012)</u>
<u>Las campanas</u>			<u>0.7</u>	<u>2380</u>	<u>Racine</u>
(Chile)					<u>(2005)</u>
<u>Mauna Kea (USA)</u>	1985	<u>DIMM</u>	<u>0.48</u>	<u>4205</u>	<u>Racine</u>
					<u>(2005)</u>
<u>Mount Graham</u>	1985	<u>DIMM</u>	<u>0.66</u>	<u>3250</u>	<u>Racine</u>
<u>(USA)</u>					<u>(2005)</u>
<u>Gaomeigu (China)</u>		<u>DIMM</u>	<u>0.77</u>	<u>3200</u>	<u>Racine</u>
					<u>(2005)</u>
		<u>STT</u>	<u>0.61</u>	<u>2800</u>	<u>Racine</u>
					<u>(2005)</u>
Apache Point (USA)		<u>DIMM</u>	<u>1.03</u>	<u>2790</u>	<u>Racine</u>
					<u>(2005)</u>
<u>Cerro Pachon</u>		<u>GSM</u>	<u>0.85</u>	<u>2740</u>	<u>Racine</u>
<u>(Chile)</u>					<u>(2005)</u>
<u>Cerro Paranal</u>		<u>DIMM</u>	<u>0.64</u>	<u>2600</u>	<u>Racine</u>
<u>(Chile)</u>					<u>(2005)</u>
<u>Cerro Paranal</u>		<u>DIMM</u>	<u>0.82</u>	<u>2600</u>	<u>Racine</u>
<u>(Chile)</u>					<u>(2005)</u>
<u>Cananea (Mexico)</u>	<u>2002</u>	<u>DIMM</u>	<u>0.91</u>	<u>2480</u>	<u>Racine</u>
					<u>(2005)</u>
<u>La Palma (España)</u>	<u>1999</u>	<u>DIMM</u>	<u>0.69</u>	<u>2400</u>	<u>Racine</u>
					<u>(2005)</u>

<u>LA PALMA</u>	<u>1990</u>	<u>DIMM</u>		<u>0.69</u>	<u>2400</u>	<u>Harris y</u>
						<u>Vrba</u>
						<u>(1992)</u>
<u>La Palma (España)</u>		<u>DIMM</u>		<u>0.61</u>	<u>2400</u>	<u>Muñoz</u>
						<u>Tuñon et</u>
						<u>al (1997)</u>
<u>La Silla (Chile)</u>		<u>DIMM</u>		<u>0.87</u>	<u>2330</u>	<u>Racine</u>
						<u>(2005)</u>
<u>Kitt-Peal (USA)</u>		<u>DIMM</u>		<u>0.83</u>	<u>2050</u>	<u>Racine</u>
						<u>(2005)</u>
<u>Siding Spring</u>		<u>DIMM</u>		<u>1.25</u>	<u>1130</u>	<u>Racine</u>
<u>(Austra)</u>						<u>(2005)</u>
<u>Kunming (China)</u>		<u>DIMM</u>		<u>1.02</u>	<u>1940</u>	<u>Racine</u>
						<u>(2005)</u>
<u>Javalambre (Esp)</u>	<u>2008</u>	<u>DIMM</u>		<u>0.71</u>	<u>1950</u>	<u>Moles et</u>
	<u>-</u>					<u>al. (2010)</u>
	<u>2009</u>					
<u>Gamberg (Namib)</u>	<u>1970</u>	<u>Star trails</u>		<u>0.8</u>	<u>2400</u>	<u>Birkle et al</u>
						<u>(1976)</u>
<u>Calar Alto (Esp)</u>	<u>1969</u>	<u>Star trails</u>		<u>1</u>	<u>2168</u>	<u>Birkle et al</u>
	<u>-</u>					<u>(1976)</u>
	<u>1971</u>					
<u>Calar Alto (Esp)</u>	<u>2001</u>	<u>DIMM</u>	<u>1.02</u>	<u>0.93</u>	<u>2168</u>	<u>Este</u>
	<u>-</u>					<u>trabajo</u>
	<u>2021</u>					
<u>Calar Alto (Esp)</u>	<u>2004</u>	<u>DIMM</u>		<u>0.9</u>	<u>2168</u>	<u>Sanchez et</u>
	Ξ					<u>al. (2007)</u>
	<u>2006</u>					
SIERRA NEVADA	<u>2003</u>	<u>DIMM</u>	<u>0.84</u>	<u>0.77</u>	<u>2890</u>	<u>Este</u>
	<u>-</u>					<u>trabajo</u>
	<u>2020</u>					

<u>PIC DU MIDI</u>	<u>2017</u>	<u>CCD</u>		<u>0.5</u>	<u>2880</u>	<u>Damian</u>
			<u><0.5</u>			<u>Peach</u>
						<u>(2017)</u>

Fuente: Este trabajo y_Racine, R., (2005), Altitude, elevation and Seeing, PASP.117: 401-410

APÉNDICE D

<u>Alfabeto griego</u>

A α Alfa A ;	B β Beta B;	$\Gamma \gamma$ Gamma G;	$\Delta \delta$ Delta D
E ε Epsilon ;	Z ζ Dseta Z;	Ηη Eta;	$\Theta \theta \vartheta$ Theta
Iι Iota I;	К к Карра К;	Λ λ Lambda L;	$M \mu M u M N v$
Nu N;	$\Xi \xi X Xi;$	O o Omicron;	Π π \$ Ρi Ρ
Pρ Rho R;	$\Sigma \sigma \varsigma$ Sigma S;	Tτ Tau T;	Y υ Ypsilon Y
$\Phi \phi \phi$ Phi Ph (f);	X χ Ji (chi) Ch ;	Ψ ψ Psi Ps;	Ω ω Omega

<u>APÉNDICE E</u>

Cálculos de la integral de θ en segundos de arco (contribución al seeing FWHM) en los primeros 150 m.en los lugares con vuelos del dron.

LUGAR Y FECHA	SAGRA	СІМА	MONTIL	.LA	OBSV.SAGRA		CALAR ALTO	
	RMS	ALTITUD	RMS	ALTITUD	RMS	ALTITUD	RMS	ALTITUD
ALTURA DE CAPA								
2	0.009539904	2.5	0.025943195	2.5	0.033118944	2.5	0.015639187	2.5
3	0.012302295	5	0.019275007	' 5	0.031067794	5	0.020167697	5
5	0.009538728	10	0.014208858	10	0.028884705	10	0.015637259	10
5	0.007640886	15	0.013610984	15	0.021726429	15	0.014	15
5	0.011152539	20	0.015681391	. 20	0.02439494	20	0.012526043	20
10	0.007724668	30	0.010740686	30	0.020013029	30	0.018282851	30
20	0.007983691	50	0.009790585	50	0.01790716	50	0.012663391	50
25	0.006521331	75	0.010434588	75	0.016614224	75	0.013088019	75
25	0.006186729	100	0.010029554	100	0.015074218	100	0.010690707	100
20	0.006730147	120	0.010009695	120	0.011731209	120	0.010142178	120
30	0.005090955	150	0.007879713	150	0.010630036	150	0.011033028	150
	CT2		CT2		CT2		CT2	
	9.10098E-05		0.000673049)	0.001096864		0.000244584	
	0.000151346		0.000371526	i	0.000965208		0.000406736	
	9.09873E-05		0.000201892		0.000834326		0.000244524	
	5.83831E-05		0.000185259)	0.000472038		0.000196	
	0.000124379		0.000245906	i	0.000595113		0.000156902	
	5.96705E-05		0.000115362		0.000400521		0.000334263	
	6.37393E-05		9.58555E-05	i	0.000320666		0.000160361	
	4.25278E-05		0.000108881		0.000276032		0.000171296	
	3.82756E-05		0.000100592	2	0.000227232		0.000114291	
	4.52949E-05		0.000100194		0.000137621		0.000102864	
	2.59178E-05		6.20899E-05	;	0.000112998		0.000121728	
	CT2 (Z)dz		CT2 (Z)dz		CT2 (Z)dz		CT2 (Z)dz	
	0.00018202		0.001346099)	0.002193729		0.000489168	2.5
	0.000454039		0.001114578	8	0.002895624		0.001220208	5
	0.000454937		0.001009458	8	0.004171631		0.001222619	10
	0.000291916		0.000926294		0.002360189		0.00098	15
	0.000621896		0.00122953		0.002975565		0.000784509	20
	0.000596705		0.001153623		0.004005213		0.003342626	30
	0.001274787		0.001917111		0.006413327		0.003207229	50
	0.001063194		0.002722016	i	0.006900811		0.004282406	75
	0.00095689		0.002514799)	0.005680801		0.002857281	100
	0.000905898		0.00200388	8	0.002752425		0.002057276	120
	0.000777535		0.001862697	7	0.00338993		0.003651831	150
INTEGRALES ^0,6		[CT2 (Z)dz]^0,6		[CT2 (Z)dz]^0,6		[CT2 (Z)dz]^0,6		[CT2 (Z)dz]^0,6
	0.007579815	0.05343123	0.017800085	0.089177079	0.043739246	0.152940594	0.024095154	0.106944344
RESOLUCION INTEGRAL								
0,91 ∫[CT2 (Z)dz]^0,6	0.048622		0.081151		0.1391759		0.0973194	

Fuente: Datos elaborados por el autor.

APÉNDICE F

PROPUESTA MONITOR DE SEEING ZENITAL EN SIERRA SAGRA



Esquema de bloques del hardware del monitor de seeing propuesto para el observatorio de la Sagra.

Existen dos modalidades posibles de estimar el tamaño de disco de imagen estelar (FWHM) basados en métodos que determinan el RMS del desplazamiento de la imagen en el campo, como efectúan los instrumentos basados en la técnica DIMM, o bien, mediante el método de medida de variación de intensidad de las estrellas del campo (escintilación estelar).

Los detalles del desarrollo están actualmente bajo diseños avanzados, incluyendo variantes, principalmente en lo referente a la toma de imágenes y reducción de las mismas.

APÉNDICE G

UN MODELO DE PREDICION SEEING A PARTIR DE MEDIAS MICROTERMALES

Gráfico 1: Ajuste entre la temperatura (RMS, nocturno) Eje X Personal Weather Station Dashboard | Weather Underground (wunderground.com) y el RMS microtermal de la torre en Loma Montilla, eje Y. (enero-Marzo 2023)



Fuente: Datos de la torre microtermal en la Loma Montilla.

Este ajuste, debe permitir en principio, el desarrollo de un modelo simple que permita determinar la contribución de la capa limite atmosférica a la calidad de imagen en un contexto de diámetro de imagen FWHM.

Debe permitir además el extrapolar las condiciones a todo el paso atmosférico, asumiendo un seeing de atmosfera libre de ~0.5" arco. Al que habrá que sumar el seeing deducido de los 150 primeros metros y el seeing entre 150-1500 m.

El paso de la turbulencia del nivel 3-12 m. a 150 m. debe hacerse de acuerdo con la distribución de turbulencia asumida para cada noche de acuerdo con los resultados obtenidos con el dron en anteriores campañas. De forma que:

Seeing total (FWHM) = seeing capa superficial (0-150 M.) + seeing capa limite (150-1500 M) + seeing atmosfera libre (>1500 M)

Esto facilitaría el conocer la calidad de imagen (de forma solo aproximada y en un contexto de valores promedio) de cualquier observatorio que disponga de registro nocturno de temperatura en formato digital.

El seeing de la capa limite (150-1500 m.) y la atmosfera libre (>1500 m.) habrían de derivarse de las condiciones del radiosondeo más próximo en tiempo y espacio. (alternativamente, prolongando el desarrollo de estas capas a partir del RMS de la capa superficial, aunque con notable incertidumbre). Ver figuras 112 y 113 y formula (1) para su determinación experimental.

Los datos de temperatura de una estación de superficie pueden usarse como base de los cálculos de la contribución al seeing de acuerdo con la calibración del grafico 8.1

CAPITULO VI

LOGÍSTICA DE LOS OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS

1 OBJETIVOS

Como objetivo general, se pretende analizar y poner de manifiesto, desde una perspectiva global, las necesidades logísticas generales ineludibles asi como otras más específicas vinculadas con la logística de los observatorios astronómicos.

Los objetivos específicos pretenden descubrir cómo afectan los factores logísticos por separado, discriminando entre los antrópicos y físicos.

Asimismo, entre estos objetivos específicos, se pretende esclarecer si existen particularidades entre los factores de ubicación de cada observatorio o "cluster" de observatorios.

También entre los objetivos específicos figura el de mostrar las potencialidades astronómicas del recientemente creado Geoparque de Granada, en el altiplano del NE granadino.

Adicionalmente, entre estos objetivos específicos, aparece lograr una primera aproximación acerca de la percepción que tienen los astrónomos sobre cada uno de los factores que influyen en la "logística" y ubicación de los observatorios.

2 INTRODUCCIÓN

Basados en una larga experiencia de funcionamiento, a lo largo de más de 150 años, los observatorios astronómicos modernos muestran una serie de particularidades, inherentes a su situación geográfica, altitudinal y a su entorno físico más inmediato, así como por su proximidad (o lejanía) respecto de los centros habitados. También los aspectos climatológicos, las relaciones con instituciones de otros países, los intercambios culturales, la salud y otros servicios personalizados, hacen que la logística de estos observatorios sea muy heterogénea y difícil de sistematizar. Nosotros hemos podido derivar algunos modos y claves que permitan entender y planificar la logística de estos centros de investigación. Nuestro trabajo, aunque básicamente recopilatorio, abarca todos los observatorios astronómicos históricamente importantes, y pertenecientes a las más diversas regiones y países.

En un sentido amplio, en la logística de los observatorios astronómicos se deben considerar una serie de aspectos, que sigan una línea lógica y aglutinante, sobre la idea general del establecimiento de nuevos "núcleos astronómicos": esto son, complejos de dimensiones considerables, integrados por los edificios y servicios de un gran observatorio. Su extensión puede ser de hasta varios kilómetros o aún más, en una región, abarcando cientos de kilómetros, entre instalaciones de una misma institución.

Podemos señalar que el establecimiento de un gran complejo astronómico no se decide de la noche a la mañana, sino que suele venir precedido por encuentros informales o formales de los científicos con más peso, dentro de las convenciones y simposios de la materia a nivel internacional.

Si hay una idea general que flota en el ambiente, algún objetivo difícil de atacar, o simplemente seguir las directrices de algún astrónomo relevante, premio nobel consagrado, etc., se reunirán varios de los llamados "popes", y tras numerosos encuentros y cabildeos, decidirán por dónde seguir. En estos encuentros no suelen faltar los representantes de los gobiernos implicados y la gran industria.

Si la cosa marcha se suelen organizar, paralelamente, una serie de simposios sobre el tema. En estos encuentros, destinados a los científicos y técnicos de segundo nivel de decisión, se expondrán las necesidades del proyecto, que deberán ser de nuevo refrendadas por los máximos representantes, en posteriores y discretas reuniones.

Con todo ello, se puede tener ya una idea del plan general de actuación, el tiempo y los recursos económicos y del personal que se necesitará, durante la construcción; y se avanzará en la puesta en marcha, fijando fechas tentativas, para empezar a amarrar un plan económico de mantenimiento del proyecto de explotación, a no menos de 20 años vista.

Un aspecto muy importante del proyecto, que es la elección del sitio, "site selection", estará determinada por el estudio de numerosas variables climáticas/ meteorológicas y logísticas, que sea posible reunir, condensar, interpretar y comparar con otros sitios. Las pruebas del sitio, específicas, se harán durante periodos de unos 3 a 10 años, donde ya se va confirmando la bondad del lugar y sus características principales, así como sus ventajas sobre sitios alternativos. En este paso ya es imprescindible que las medidas de campo estén estandarizadas y sean homologables, a fin de tener comparativas realistas entre lugares investigados.

Entre los aspectos logísticos, aparte de los puramente climatológicos, cabe destacar, la descripción de la red de comunicaciones, en especial carreteras, puertos y

aeropuertos, la disponibilidad de energía eléctrica y de agua y si los servicios sanitarios y técnicos están cerca para el soporte de emergencias. Hay que considerar, además, si el entorno es favorable, y la ausencia o presencia de industrias y poblaciones grandes, pues pueden interfieren en el proyecto. Los estudios geológicos y sísmicos son variables a tener en cuenta, en instalaciones tan sensibles a cualquier movimiento de la corteza terrestre, pues se puede comprometer su solidez estructural.

La selección final suele ser ejecutada por un comité, a veces designado por la comunidad de astrónomos y el gobierno o, en su caso, según un dictamen de una máxima autoridad, cosa hoy cada vez más infrecuente, dada la magnitud de los proyectos, que suponen inversiones de miles de millones de euros.

La astronomía europea ha sabido unirse en un sólido grupo eficaz y potente a través de la ESO (Observatorio Europeo Austral) para construir los más potentes telescopios y observatorios, en las inmediaciones del desierto de Atacama, Chile. Los norteamericanos, la otra gran potencia astronómica, siempre han estado divididos, al menos desde principios del siglo XX, en torno a dos núcleos o más de astrónomos, dependientes de universidades y estados diferentes. Esto les ha restado competitividad y liderazgo en grandes telescopios, si bien, actualmente, tienen tres proyectos con telescopios de 30 metros de diámetro, de los que se construirán dos como máximo: uno en el hemisferio sur (Chile) y otro en el hemisferio norte, en Hawái o en Canarias. ESO, por su parte, ha decidido volcarse en el hemisferio sur en Chile, con los observatorios de La Silla, Cerro Paranal (VLT) y Cerro Armazones (E-ELT), y las instalaciones radioastronómicas del Llano de Chanjnantor, (ALMA) a 5000 metros de altitud.

La selección del sitio conlleva que se cumplan todos los requisitos medioambientales y de respeto a los habitantes de las inmediaciones, que, de haberlos, mostrarán una fuerte reivindicación o protesta, a menudo de forma pintoresca, tal vez esperando alguna recompensa a cambio. Esto ha sido más fácil de manejar en lugares como Chile o Canarias, pero mucho más difícil en lugares como Hawái, donde los nativos isleños han mostrado una firme oposición al desarrollo de nuevos proyectos en la cima de Mauna Kea, lo que hace peligrar la instalación de un nuevo telescopio de 30 metros en el observatorio, ya operativo de todas maneras, que cuenta con telescopios de 1 a 10 metros de diámetro, ocupando ya gran parte de la cima del volcán del mismo nombre.

No debemos olvidar una gran potencia emergente en astronomía y radioastronomía, China, que ha construido y está proyectando observatorios de gran altitud en el Tíbet, entre 5000 y 6000 metros de altitud, y el radiotelescopio más grande del mundo, con 500 metros de diámetro, si bien en un lugar más bajo en el interior del país. Al ser China bastante autárquica, en todos los terrenos, prefieren mantener una

cierta distancia con occidente, lo cual no implica que no compartan sus descubrimientos y futuros proyectos, que pasan, no solo por el Tíbet, sino por la parte más elevada del casquete glaciar Antártico (Dome A), a unos 4100 m. de altitud. El lugar con peor logística frio y lejanía imaginable, en todo el planeta Tierra.

Cada lugar ofrece una logística y oportunidades diferentes, y es un asunto muy difícil de concretar, en tan breve exposición, por lo que nosotros solo podemos esbozar aquello que nos ha sido posible extraer de la literatura consultada, y de la experiencia profesional del autor, a través de un trabajo de tres décadas en distintos observatorios astronómicos y radioastronómicos.

3 VISIÓN HISTÓRICA DE LOS CONDICIONANTES LOGÍSTICOS

Las consideraciones logísticas de los observatorios astronómicos vienen de lejos: Lowell (1901), Curtis (1909), Hale (1915) o Joy (1927). En una época posterior a la Segunda Guerra Mundial aparecen los planteamientos asociados a los grandes observatorios que se estaban proyectando en Hawái (Hansen, 1960; Morrison, 1963; Riddle, 2011). En el SW de EE. UU destacan las consideraciones de Walker (1970). En el caso de Chile, los astrónomos empezaron a considerar las regiones próximas al desierto de Atacama para el establecimiento de observatorios en el hemisferio sur. Véanse, entre otros muchos, los trabajos de Ardeberg (1983), Enard (1984), Otarola (1998), Gilmozzi (2000), Zeew, (2014) o D'Odorico (2018).

El caso de la alta meseta Antártica ha sido un caso especial ya que, debido a sus especiales dificultades climáticas y de acceso, no se ha podido desarrollar hasta las dos últimas décadas (Storey, 2007; Storey el al., 2012; Xu, 2016).

En los encuentros y simposios astronómicos suelen exponerse unos objetivos y problemas astronómicos, no resueltos, que hay que abordar. En estas reuniones no suelen faltar los representantes de instituciones científicas, de la industria y de los gobiernos implicados (IAU, ESO, Ministerios de ciencia y tecnología de estos países, etc.).

El siguiente paso, suele ser, organizar una serie de simposios temáticos donde se debatirán las necesidades del nuevo proyecto (Ardeberg, 1983; Ardeberg y Lindgren, 1984).

Elegido un sitio, se puede tener ya una idea del plan general de actuación, el tiempo de desarrollo ("timeline"), y los recursos económicos y de personal que se necesitarán, durante la construcción y el tiempo de explotación, a no menos de 20 años vista.

Nuestro trabajo ha mostrado una marcada nucleación de observatorios cerca de los trópicos, en el SW de EE. UU y norte de Chile, con otros núcleos menores en Hawái, España, China, Sudáfrica y la Antártida (Figura 125). A este respecto, el advenimiento de las comunicaciones digitales, y el control remoto, han hecho posible implementar una serie de redes de observación más difusa y distribuida universalmente (Brown et al., 2013; Tian et al., 2016).

4 FUENTES Y METODOLOGÍA

Como podemos ver en la figura 124, ciertas áreas, como "site testing" y potencial climático, tienen múltiples conexiones con "accesos y comunicaciones", "localización de observatorios" e, incluso, su conexión con los observatorios exóticos. A su vez "accesos y comunicaciones" interrelaciona con las expediciones astronómicas o los "grandes núcleos astronómicos". Como entendemos que las variables de "site testing" están bien estudiadas en los diversos capítulos de esta tesis, no tienen aquí un desarrollo amplio. Por ello, particularizamos en el resto de los apartados y tópicos presentados en el diagrama.



Figura 124. Organigrama de flujo de la Logística de Observatorios astronómicos y de las relaciones entre áreas temáticas

Fuente: Elaboración propia.

4.1 FUENTES DE DATOS PARA ASPECTOS SOBRE PRUEBA DE SITIOS "SITE TESTING" Y APTITUD CLIMÁTICA.

Las fuentes utilizadas para el presente capítulo ha sido fundamentalmente las siguientes revistas o eventos científicos: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*; *Publications of The Astronomical Society of the Pacific*; *The Messenger*; Simposiums *de la IAU* (International Astronómica Union) o los Workshop y Conferencias de la ESO (European Souhtern Observatory). Además, los siguientes autores también ha sido fundamentales: Bikle et al. (1976); Ardeberg (1983, 1984); Sales et al. (1991); Storey (2012).

Nosotros proponemos dividir este capítulo en ocho apartados, siguiendo un orden mínimo, visualizado en la figura 124. Debemos hacer notar que algunos tienen un menor desarrollo, pues la cantidad de información que hemos podido adjuntar como "materia logística", más de un centenar de trabajos, no es homogénea para todos los temas específicos. A "grosso modo" proponemos la siguiente tabla 11 de síntesis general:

1769	Expedición naval astronómica francesa (d'Auteroche a Baja California).
1783	Los globos de los hermanos Montgolfier sobrevuelan Paris.
1891	M. Janssen asciende a la cima del Mont Blanc para medidas del oxígeno.
1902	Lowell busca localizaciones óptimas de observatorios en los trópicos.
1909	Curtis explora el desierto de Atacama en Chile. Destaca la necesidad de
	comunicaciones.
1905-1915	Hale y los observatorios en California en una visión general de su tiempo.
1927	Joy describe el observatorio de Mount Wilson, California.
1939	Anderson y la apertura del observatorio de Monte Palomar, California.
1953	J. Oort y W. Baade indican la conveniencia de un gran observatorio en el
	hemisferio sur. La gestación de la futura ESO (Observatorio Sur Europeo)
1958	Simons cita como el Cap. Kittinger alcanza los 96000 pies en globo.
	Preludio de los vuelos al espacio.
1960-1966	Hansen estudia los lugares de las Islas Hawái.
1970	Walker estudia lugares en SW de EE. UU. Nuevos observatorios.

Tabla 11. Hitos y autores destacables en nuestro estudio

1973	Morrison sobre las condiciones del observatorio de Mauna Kea, Hawái.
1976	Birkle estudia Calar Alto como lugar para el Observatorio Hispano-
	alemán. (CAHA).
1981	McInness estudia las condiciones astronómicas de las Islas Canarias.
1983-1984	Ardeberg y Enard sobre los lugares para el VLT europeo en norte de
	Chile.
1984	Foster y Cudaback, sobre los efectos del "mal de montaña" en los
	astrónomos.
1987	Woltjer Los trabajos de prospección en Cerro Paranal para el VLT.
2000-2005	Gilmozzi y Dierickx, El OWL, telescopio abrumadoramente grande.
2005	Cui estudia los lugares óptimos en la alta meseta del Tibet chino.
2006	España firma su adhesión al consorcio astronómico europeo de la ESO.
2007-2012	Storey describe los observatorios de la alta meseta antártica.
2009	Andersen describe las condiciones de Groenlandia para astronomía.
2011	Riddle estudia lugares candidatos para el gran telescopio de 30 metros
	TMT del CALTECH.
2013	Brown y las redes de observatorios "Las Cumbres"
2014-2017	Apogeo de vuelos astronómicos con globos a gran altitud.
2014-2016	Zeeuw sobre las perspectivas futuras de los observatorios de ESO VLT y
	ELT en Chile.
2016	Xu estudia las posibilidades astronómicas de Dome A, Antártica.
2018	D´Odorico sobre la trayectoria general de la ESO en Chile.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 LA DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS OBSERVATORIOS DE ESTE ESTUDIO

Como puede observarse en la figura 125, las instalaciones estudiadas en nuestro trabajo tienden a concentrarse en áreas de la superficie terrestre favorables para la observación astronómica, especialmente, en los trópicos y en la Antártica. Es notable la concentración en el Norte de Chile, SW de EE. UU, el área del Mediterráneo occidental, Canarias y, también, el Tíbet. Hay otros núcleos menores en Sudáfrica y en las Islas Hawái.



Figura 125. Distribución mundial de observatorios citados en este trabajo

Fuente: Trabajos citados y Base Blue Marble (Worldview). Elaboración propia.

4.2.1 La estadística de la literatura consultada por décadas.

En las primeras décadas, mostradas en la figura 126, hay un dominio por parte de la astronomía americana. No obstante, a partir de la década de 1970 gana mucha importancia la astronomía europea, en particular las referencias a los observatorios de la ESO en Chile.



Figura 126. Número de trabajos relacionados con la logística/ubicación de observatorios astronómicos por décadas

Fuente: Elaboración propia.

Tras un pico relativo de publicaciones con referencias logísticas, en el primer cuarto del siglo XX, la actividad, para la búsqueda de observatorios nuevos y su importancia, parece ralentizarse entre 1930-1960, y no parece aumentar sino a partir de la década de los 70 hasta nuestros días. La última década es de un alto interés, por el número de trabajos, su variedad temática y los refinamientos considerados. Podemos ver que el crecimiento de estas últimas décadas ha sido exponencial.

5 RESULTADOS DE NUESTRO ESTUDIO

5.1 DESCRIPCIÓN DE EXPEDICIONES ASTRONÓMICAS

Siguiendo un orden de tipo cronológico y temático, podemos indicar que este apartado quiere hacer mención, y recordar, aquellos exploradores decimonónicos que, en su afán por conocer y descubrir, abrieron el camino al establecimiento de importantes observatorios, en aquellas áreas que les cupo visitar.

Robert G. Cleland, en 1947, describe la primera expedición francesa a la zona de baja California en 1769, a la sazón, bajo dominio español. La expedición estaba bajo la dirección de Chappe d'Auteroche, un distinguido astrónomo francés. El objetivo de esta expedición fue observar un tránsito astronómico del planeta Venus frente al Sol. Adicionalmente, se hicieron otras observaciones sobre los habitantes y de la situación social y económica de aquella zona de la Nueva España. Las dificultades de acceso fueron enormes, y a duras penas ganaron la costa del golfo de Baja California. Además, una epidemia que asoló la población india de las misiones contagió fatalmente a la expedición francesa, muriendo poco después el propio d'Auteroche. A pesar de ello, Chappe d'Auteroche consiguió hacer las observaciones astronómicas programadas. Las dificultades logísticas se intuyen que fueron enormes, propias de los viajes por mar a lugares lejanos en aquella época.

Una expedición diferente es la de Grant en 1854. En la misma se describe, en una carta desde Calcuta, India, para la "Royal Astronómical Society", aspectos relacionados con las observaciones realizadas del planeta Marte (Figura 127); todo ello a través de un refractor acromático pequeño (1) y después con un telescopio mayor (2). Aquí se señala como las condiciones atmosféricas de la India, aún en situaciones de cielo despejado, no muestran excesivas ventajas para erigir un gran telescopio refractor, pues las condiciones de visión no mejoran ostensiblemente con un instrumento más grande.



Figura 127. Dibujos de Marte por J. W. Grant desde Calcuta, India, 1847

Fuente: Royal Astronomical Society (1854).

Las expediciones para observar eclipses de Sol en lugares remotos llevaron al profesor D. P. Todd (citado por Holden en 1889) hasta Sudáfrica. El interés de observar estos eclipses se debía a que los fenómenos solares coronales todavía eran poco conocidos. La expedición, numerosa, y bien pertrechada logísticamente, estaba compuesta por varios astrónomos, sus ayudantes, intérpretes, fotógrafos, mecánicos, farmacéutico, médico, biólogos, etnólogos, etc. Por la misma época, M. Janssen (citado por Holden en 1891), ascendió a la cima del Mont Blanc (4750 m), en los Alpes franceses, a fin de realizar observaciones espectroscópicas de la atmósfera solar. Las dificultades logísticas de subir a la cima con instrumentos fueron enormes, y fue llevada a cabo en dos días y medio, con guias especializados y porteadores, que llevaron a Janssen, en una silla y con escaleras de cuerda, hasta la cumbre. El descenso fue aún más peligroso, y puso de relieve la dificultad de pretender colocar un observatorio permanente a semejante altitud en los Alpes. Janssen sugirió establecer dicho tipo de observatorios de altura en lugares más accesibles, como Pike's Peak (4300 m.), en Colorado, accesible buena parte del año por ferrocarril.

Siguiendo las rutas exóticas, Fleming (1892) organiza una expedición al Perú, para fotografiar las estrellas que difícilmente se pueden ver desde la latitud de Harvard, en Estados Unidos. También se hicieron medidas fotométricas desde un lugar reputado de extrema sequedad, como era el desierto de Atacama, en Chile. Debido al potencial astronómico de las áreas desérticas del norte de Chile, Duerbeck, en 1999, rememora los 100 años de la expedición del astrónomo americano Curtis, con la pretensión de encontrar un lugar en el hemisferio sur. Deducimos que en esta época se consideraba de vital importancia la logística, no solo un clima muy seco, sino la existencia de actividades como las mineras, que impulsaran las comunicaciones de ferrocarril y la existencia de puntos de agua. El mismo Curtis ya señala, en 1909, la escasez de observaciones astronómicas en el hemisferio sur, y los pocos observatorios

astronómicos existentes. Por su parte, Evershed, en 1915, se centra en describir sus andanzas viajeras, a lo largo del imperio colonial británico de principios del siglo XX, en diversos lugares de la India (Valle del Kaskmir), e indicando que las condiciones del valle son algo mejores que en las montañas adyacentes.

En otro orden de fiebre expedicionaria, Lowell, en 1902, da instrucciones a los observadores que han de buscar los mejores lugares para futuros observatorios astronómicos. Los lugares para buscar se situarán en las latitudes próximas a los trópicos de Cáncer y Capricornio, donde los climas desérticos hacen más probable tener buenas condiciones atmosféricas para la observación astronómica a lo largo del año.

Ya mediado el siglo XX, Irwin, en 1951, describe como un gran avance el llegar por vía aérea desde Nueva York a Sudáfrica, después de dos días de viaje y varios reabastecimientos o escalas.

La era verdaderamente moderna de las expediciones comienza en torno a 1960 en EE. UU y Chile, siendo Hansen (1966), respecto a Hawái, uno de los más reconocidos. En California y SW de EE. UU mencionaremos a Walker (1970), que comienza una serie de exploraciones sobre nuevos sitios, para el desarrollo de nuevos observatorios. Los resultados de este programa de exploración parecen indicar que los mejores lugares astronómicos estarían cerca de la costa de California.

Aparte de ellos, mencionaremos a Birkle et al. (1976) para la búsqueda de un gran observatorio alemán en territorio europeo, siendo el lugar elegido Calar Alto, en la Sierra de los Filabres, en Almería.

También se mostró muy activo McInness (1981) sobre Canarias, aunque el astrónomo involucrado más directamente en estas exploraciones fue Jürgen Stock's, citado por Blaauw (1991). Su sentido de la exploración pionera, además de su conocimiento del idioma español, le permitieron acceder a los Andes con seguridad y rapidez. Stock fue el explorador astronómico de AURA (Asociación de las Universidades Americanas para Astronomía). Sus trabajos son referencia para cualquiera que quiera familiarizarse con la problemática de la búsqueda de lugares remotos para observatorios.

5.2 LOCALIZACIÓN DE OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS

De forma general, en este apartado debemos mencionar aquellas iniciativas representativas, y que, en unas ocasiones, llevaron a la construcción de nuevos observatorios, mientras que otras quedaron desestimadas, por falta de presupuesto, logística o riesgos.

5.2.1 Hasta la época de la construcción de Monte Palomar, en California. EE. UU.

Sin duda, Hale (1915a, 1915b) es uno de los astrónomos más relevantes de principios del siglo XX. En sus trabajos expone los requisitos instrumentales de un moderno observatorio astronómico.

Douglas, en 1917, en la búsqueda de un sitio adecuado para el observatorio Steward, en Tucson (Arizona), señala varias consideraciones para tener en cuenta, como los accesos al observatorio, la elevación respecto al terreno circundante, así como las problemáticas ligadas a las inversiones térmicas y los vientos desfavorables para la calidad de imagen durante la noche:

"A new observatory should start with an equipment designed for productive work in the immediate future, and further development of the institution should follow along evolutionary lines to meet definite requirements as they are foreseen; any other plan is likely to lead to the founding of a museum rather than an observatory."

Joy (1927) nos describe el observatorio de Mount Wilson, en California, a solo 8 millas, en línea recta, de Pasadena. La montaña se eleva a 5704 pies sobre el nivel del mar, y es fácilmente accesible con vehículos a motor. La carretera hasta la cima fue construida expresamente por la necesidad de subir suministros e instrumental hasta el observatorio. Los astrónomos viven en la ciudad y pueden subir rápidamente al observatorio cuando es su turno de observación.

Entre las anécdotas más destacables del personal de apoyo logístico de Mount Wilson tenemos la figura de Milton Humason que, junto con Hubble, determinó la famosa ley de Hubble-Humason, referente a la velocidad de alejamiento de las galaxias distantes. Humason tenía muy poca formación académica cuando empezó a trabajar en el observatorio en 1909. Empezó de conductor de una recua de mulas que abastecía el observatorio desde el valle. Dos años después se casó con una hija de un ingeniero del observatorio. Más tarde trabajó como portero, electricista y, finalmente, como ayudante de observación. De hecho, realizó sus primeras observaciones con tal destreza y pulcritud que le fue adjudicado el puesto fijo de ayudante de astrónomo.

Slipher (1927) señala que el observatorio Lowell fue fundado en 1894 por Percival Lowell; el mismo mantuvo la dirección de sus operaciones y continuó tenazmente las observaciones, en especial de Marte, siguiendo las observaciones de Schiaparelli en 1893, tratando de observar lo que se consideraron, en su día, canales de agua.

La idea de establecer un observatorio astrofísico con un telescopio reflector de 200 pulgadas es descrita por Anderson (1939). Esta fue una idea afortunada, que se tuvo ya en 1928, pero la "Gran Depresión" retrasó mucho la disposición de fondos

gubernamentales y de las instituciones científicas, para un proyecto como éste, muy costoso. A pesar de ello, la bajada de costes en la construcción facilitó, finalmente, la edificación de la gran cúpula del monte Palomar. Asimismo, la compañía de fundición de cristal "Corning Glass" se avino a fabricar el material del que partiría el tallado de la gran pieza del primario, con más de 5 metros de diámetro, a un precio razonable.

5.2.2 El área SW de EE. UU.

Ya a mediados de siglo XX se vio la necesidad de apartarse de las grandes ciudades de la costa del Pacífico y adentrarse en las zonas desérticas del SW de Estados Unidos. Por ello, mencionaremos a Whitford (1956) que, en una breve exposición, detalla la necesidad de que la "National Science Foundation" (NSF) tome el control y designe un comité que estudie los emplazamientos de nuevos telescopios, en la zona sur y oeste de Estados Unidos.

Merril (1984) estudia las localizaciones óptimas para nuevos y potentes telescopios, como el Telescopio de nueva Tecnología (NTT). Este autor se centra en el área W de los Estados Unidos, Hawái y el Norte de Chile.

5.2.3 El Caso especial de Mauna Kea (Hawái)

Siendo Hawái un lugar excepcional para la moderna astronomía, sobre todo la infrarroja, se decidió apostar por este archipiélago, tanto para observaciones estelares, como solares y climatológicas. Entre los primeros en describir estos emplazamientos están Morrison et al. (1973), que presentan los datos del sitio de Mauna Kea, Hawái, basados en la experiencia de cuatro años de pruebas. Los autores detallan que el 56% de las noches son fotométricas, y un 20% adicional espectroscópicas, como García y Yasukawa (1983) midieron la radiación solar directa desde el observatorio de Mauna Loa (Hawái), antes y durante la emisión volcánica de 1982. Los resultados mostraron una disminución del orden del 25% de la intensidad de la radiación solar, reflejando como, ocasionalmente, estos observatorios, tan cercanos a un punto de emisión volcánicos, pueden verse perturbados. Esto desaconsejó instalar un observatorio para el óptico en la cima de Mauna Loa.

5.2.4 El Norte de Chile

El norte de Chile, aclamada como la mejor zona del planeta para la observación astronómica, ha sido estudiado en incontables trabajos. Señalaremos algunos de los cuales hemos considerado relevantes, desde el punto de vista logístico. Aunque el interés ya fue expuesto por Curtis, en 1909, hubo que esperar a la década de los 70, para iniciar una nueva era de febril actividad en esta área (Sanduleak, 1967; Fehrenbach, 1981).

Autores como Ardeberg (1983), Ardeberg y Lindgren (1984) o Enard (1984) hacen un detallado resumen de las características astroclimáticas que reúnen los lugares preseleccionados en el norte de Chile para el establecimiento de los observatorios astronómicos. Siendo la selección del lugar para el Very Large Telescope (VLT) un asunto de la máxima prioridad. En este nivel de estudio, ya se apunta la posibilidad de instalar el VLT en el cerro Paranal o el cerro Armazones. Se indica la conveniencia de situar estos observatorios a la mayor altitud posible, y al mismo tiempo lo más cercano a la costa, definiendo un intervalo de altitudes desde 2,200 m. a 4,500 m. de altitud, como los más convenientes.

5.2.5 El fallido OWL

El Overwhelmingly Large Telescope (OWL) es un caso de delirios de grandeza de determinados astrónomos, en este caso, principalmente europeos, y de la ESO. Citaremos solo a Gilmozzy y Dieririckx (2000), que exponen el concepto del telescopio OWL, con un diámetro de 100 metros en su espejo principal, unos 150 metros de altura y un coste estimado de 1,000 millones de euros corrientes del año 2000.

Para Gilmozzi (2005), la segunda década del tercer milenio es la que verá una nueva generación de telescopios, de entre 30 y 100 metros de diámetro, y en todos los casos recurrirán a la óptica adaptativa, para sacar partido de su enorme diámetro, y superar las limitaciones impuestas por la turbulencia de la atmósfera terrestre.

5.2.6 La localización de las Islas Canarias

Es sin duda la zona más favorable de España y de dominio europeo, aunque, geográficamente, esté cerca de la costa del NW de África. Se ha descrito a estas islas ya desde la época de MacInnes (1981) o McInnes y Walker (1974), sobre la selección de lugares astronómicos en Tenerife y La Palma.

5.2.7 El caso de China

Siendo un país autárquico, y un tanto hermético, no siempre es fácil acceder a información fiable, pero mencionamos a Cui (2005), que nos expone el proyecto de estudio sobre el W de China. Muchos lugares de esta área están a una gran altitud (>5000 m.), gozan de clima seco y tienen escasa nubosidad, lo que los hace apropiados para los nuevos observatorios astronómicos, como el "ELT" chino.

5.2.8 El caso de la Antártida y las regiones polares

Son numerosos los investigadores que han descrito lugares para localizar observatorios en la alta meseta Antártica. De ellos seleccionaremos a Storey et al. (2007), Storey (2012) y, especialmente, a los chinos Yang et al. (2009), que describen las extremas condiciones climáticas de la remota base china de Dome A (4080 m. de altitud), en el casquete de hielo Antártico. De acuerdo con los registros meteorológicos y climáticos, este lugar no tiene rival en determinadas longitudes de onda para observaciones astronómicas en el lejano infrarrojo. No obstante, los problemas logísticos y técnicos que han de superarse son abrumadores. La extrema lejanía, gran altitud y bajísimas temperaturas, que pueden alcanzar los -80° C, son los principales escollos. La expedición china compuesta de 17 miembros tardó 22 días en llegar a Dome A, desde la estación costera china en la Antártida.

Storey describe la estación de Dome C (Figura 128) su funcionamiento y las medidas climatológicas y astronómicas en curso en dicha estación, a 3250 m de altitud, en el casquete de hielo antártico.



Figura 128. Estación francoitaliana Concordia en la alta meseta Antártica (Dome C)

Fuente: Storey (2012).

Los lugares de la meseta Antártica, como Dome A, Dome C o el Polo Sur, tienen características únicas, como observatorios astronómicos, especialmente en el infrarrojo, dado los bajos niveles de agua precipitable y poca turbulencia. Lo extremo de las temperaturas, de hasta -70°C, obliga a la construcción de entornos de soporte vital ligeros y resistentes, que han de ser transportados mediante orugas desde la costa, o bien en aviones, adaptados al aterrizaje en pista de hielo.

Andersen et al. (2009) describen la estación de medidas de seeing mediante la técnica del DIMM y colocando el detector a una altura de 40 metros sobre la superficie del hielo, en el punto más elevado de Summit (base americana y europea), en la parte más elevada de la isla de Groenlandia, a 3221 m. de elevación.

Algo más cerca del Polo Norte tenemos la isla Ellesmere. Sus posibilidades astronómicas son descritas por Steinbring et al. (2010).

Un trabajo de síntesis es el de Lombardi (2010). Este autor nos describe los principales parámetros que definen la turbulencia atmosférica (seeing), y los procedimientos llevados a cabo por los astrónomos para su medición, así como las

circunstancias climatológicas, topográficas, altitud, etc. que influyen en su intensidad y valor, a lo largo del tiempo.

5.3 GRANDES NÚCLEOS ASTRONÓMICOS

Dado que en la literatura consultada nuestro concepto de "núcleo astronómico" aparece definido de las más diversas formas, hemos considerado, dentro de tal categoría, incluir aquellas instalaciones y observatorios, no distantes entre sí, más que unos pocos cientos de kilómetros. Estos núcleos comparten muchas características entre sí, como la climatología, las comunicaciones a larga distancia y el soporte técnico y científico, entre otros. Por tanto, se pueden considerar como zonas meso-escalares.



Fuente: D'Odorico (2018).

De entre los núcleos más destacados, a principios del siglo XX, tenemos el de el W de EE. UU, en la costa californiana, descrito por Hale en 1905 y 1915. Este, en una extensa exposición, enumera las ventajas de los observatorios, situados en un entorno como el de California, frente a lugares del este del país.

Hay que esperar a mediados de siglo para que se consideren nuevos observatorios. Steiger y Little (1958), por ejemplo, estudian la factibilidad de instalar un gran observatorio solar en la isla Hawái.

Un ejemplo de "núcleo astronómico" se fue consolidando en el norte de Chile a partir de los años 70, con el observatorio de La Silla, cuyo plano general podemos ver en la figura 129.

En esta época se empezaron a considerar otros lugares, más hacia el norte, en pleno desierto de Atacama. Para su estudio podemos consultar, entre otros, a Enard (1984), que señala que uno de los lugares más prometedores para instalar el Very Largue Telescope (VLT) en el norte de Chile se encuentra en el cerro Paranal, con una elevación de 2650 m., y solo a 15 Km de la costa, cercana a Antofagasta.

Figura 130. Recreacción artística del ELT en CerroArmazones (Chile) El tamaño de los vehículos da una idea del gigantismo de esta instalación astronómica, la más grande del mundo



Fuente: Zeeuw (2016).

En un sentido amplio, Woltjer (2012) diserta sobre la celebración de los 50 años de la ESO, que inicialmente tenía una única ambición, más bien modesta, el construir un telescopio de 3.6 m de apertura en el hemisferio sur, destinado a estudiar la vía láctea desde aquellas latitudes. Con ello se trataba de demostrar que la astronomía de Europa podía ser independiente. Pero poco después se vió que la ESO podía acometer grandes y nuevas realizaciones astronómicas, dado el éxito inicial. Otros miembros de la ESO, como Zeeuw (2014, 2016), nos describe el panorama completo de la organización de la ESO, en el contexto de la investigación astronómica actual. Se detiene en la construcción del telescopio de 39 metros de diámetro ELT, en el cerro Armazones (Figura 130), máximo exponente, quizá, durante décadas, de las posibilidades de la astronomía con base en tierra. Como ejemplo, baste decir que con este telescopio será posible visualizar directamente exoplanetas del tamaño de "Super Tierras" (solo algo mayores que la Tierra).

También D'Odorico (2018) rememora la trayectoria de la ESO, y su programa de instrumentación a lo largo de más de 40 años. Las actividades para el desarrollo de

instrumental se iniciaron a finales de los años 70. Estos pioneros han llevado a construir una nueva gama de instrumentos astronómicos, tanto para el visible como para el infrarrojo, destinados para la Silla, como para el VLT de Paranal.

Para Gabriel Rodríguez García-Huidobro (2017), Chile es una plataforma astronómica global y una gran oportunidad diplomática. El gobierno chileno siempre ha sido receptivo para albergar nuevos proyectos astronómicos en su territorio.

Aunque muchos chilenos no son conscientes de ello, en los últimos cincuenta años su país ha pasado de ser un lugar donde la astronomía apenas existía a convertirse en una "plataforma astronómica", un verdadero "núcleo astronómico", que alberga más de la mitad de la infraestructura mundial de observación óptica y radioastronomía. Dentro de sus fronteras, Chile alberga, actualmente, casi todos los grandes telescopios europeos y, quizás, el 50% de la capacidad de observación de países como Estados Unidos, Canadá y, cada vez más, Japón (García-Huidobro, 2017). Esta tendencia continuó en 2013, con la inauguración del complejo radioastronómico Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), operado por un consorcio de universidades norteamericanas, japonesas y europeas (García-Huidobro, 2017).

Chile es, actualmente, un polo científico, donde se investiga sobre diversos temas astronómicos, incluyendo el origen y formación del universo, la identificación de "exoplanetas" donde podrían encontrarse rastros de vida, así como la composición del universo y las leyes que rigen su comportamiento.

Huidobro da una descripción de los cuatro pilares de la política y estrategia astronómica de Chile y, posteriormente, ofrece una revisión de los grandes proyectos astronómicos construidos en Chile, en base a esta estrategia.

Es importante señalar que Chile está llevando a cabo acciones para proteger los "cielos oscuros, limpios y silenciosos", y que está abordando para el futuro una diplomacia astronómica más amplia. Entre los laboratorios naturales destacados de Chile se encuentran los océanos, las tierras áridas, la región antártica, los volcanes, la energía geotérmica, la actividad sísmica y las concentraciones de biodiversidad mediterránea y subantártica. Sin embargo, hay un laboratorio natural con características especialmente raras: los cielos despejados y secos del norte del país, entre las latitudes 21°S y 32°S. En conjunto, estas condiciones atmosféricas permiten una observación astronómica excepcional, y explican el interés de la comunidad internacional por construir grandes centros de observación en este país.

Para atraer inversión extranjera en astronomía se necesita un entorno económico, jurídico y político estable; políticas de apoyo fiscal, que eximan a los observatorios de muchos impuestos y tasas; estatus diplomático para los investigadores, con todos los privilegios y exenciones que ello implica, lo que favorece

el acceso a la administración y simplifica las aduanas; inversión chilena en infraestructuras, como carreteras y transmisión eléctrica y de datos. Cabe destacar iniciativas como, por ejemplo, la reciente creación de una reserva astronómica en el desierto de Atacama.

Un tipo de "núcleo astronómico" especial es aquel que se distribuye universalmente, pero queda nucleado a partir de la web, u otro sistema de comunicación remota, como es el caso expuesto por Brown et al. (2013). Estos autores describen un proyecto llamado "Las Cumbres Observatorio Global Telescopio Network". Con el mismo se pretende situar los telescopios en 3 nodos en el hemisferio sur de la Tierra, separados por husos horarios, de unas 8 horas, y en 4 nodos en el hemisferio norte, separados entre sí por 6-8 horas, de forma que sea posible observar todo el cielo en todo el tiempo. Se han elegido latitudes cercanas a los trópicos para mayor cobertura del cielo y garantía de tiempo sin nubes altas. En este mismo sentido, Tian et al. (2016) nos describen la red de telescopios SONG, que involucra a numerosos países de todo el mundo. Se han planeado cuatro nodos de telescopios en cada hemisferio de la Tierra, de forma que la cobertura estelar sea completa durante las 24 horas del día. Uno de los nodos, en China, seria instalado en el Tíbet (Qinghai-Tibetan Plateau).

Existen otros núcleos menos definidos, como el eje Canarias- Península Ibérica-Alpes, con observatorios importantes (Tenerife y La Palma); o el SE español, con Calar Alto y Sierra Nevada; más al norte tenemos Javalambre, Pic Du Midi y algunas instalaciones en los Alpes franceses e italianos.

Para el caso de la meseta o "PlaTO" Antártico mencionaremos a Hu et al. (2014), que consideran que Dome A (la mayor elevación del casquete de hielo Antártico a 4.089 m.), es un excelente lugar para observación astronómica, en un amplio rango del espectro electromagnético. En la misma meseta Antártica, consideraremos la base Concordia, de Francia, Italia y Australia, entre otros (Storey et al 2007; Storey, 2012 y Lawrence et al., 2012).

5.4 ACCESOS, ENERGÍA, COMUNICACIONES, RIESGOS GEOFÍSICOS Y CLIMÁTICOS

Los accesos fáciles y las comunicaciones rápidas, son un plus añadido a un lugar, escogido para un observatorio astronómico, y a ello apunta Joy en 1927, describiendo como el observatorio de Mount Wilson, en California, que a solo ocho millas en línea recta de Pasadena, es de los observatorios mejor comunicados.

En cuanto a accesos problemáticos, tenemos el caso de uno de los observatorios más antiguos de la época moderna en Europa, el de Pic du Midi, en los pirineos franceses (Lyot, 1945). Enclavado en lo más alto de uno de los picos más agudos y excéntricos de la cordillera, a 2870 m. de altitud, solo puede accederse en telesférico, servicio que actualmente se presta casi todo el año. Recomendamos ver la historia de este observatorio en nuestra "Sinopsis Histórica".

Como caso llamativo, asociado a las ventajas de tener una logística de accesos y transportes adecuados, vemos como Richardson (1947) describe el traslado del espejo de 200 pulgadas del telescopio reflector de monte Palomar. El convoy partió desde el taller óptico de Pasadena, California, a la cumbre de Palomar, distante 160 millas. El transporte se efectuó en un camión pesado, el 16 de noviembre de 1947, y tardó solo 17 horas en el recorrido.

Para facilitar el transporte de grandes piezas mecánicas se abrió una amplia pista en el desierto de Atacama, hasta la cima de cerro Paranal, lo cual es expuesto por Woltjer en 1987. Este autor describe los primeros trabajos en este lugar. La elección de Paranal, para ubicar el gran telescopio VLT, se debió a una serie de campañas de prueba de sitios, que mostraron que aún era posible mejorar las características astroclimáticas de la Silla, reputado como de los mejores lugares del mundo para la observación astronómica.

Respecto a los posibles riesgos inherentes a una localización, tenemos varios ejemplos, como el caso expuesto por García y Yasukawa (1983), sobre los riesgos de tipo volcánico de la montaña de Mauna Loa en Hawái (aún activo), por lo que consideran desestimar en este lugar la instalación de un gran observatorio. Un aspecto poco considerado en la logística de observatorios, el relativo a los terremotos, es abordado por Coughlin et al. (2015). Por ello se debe dotar al observatorio y a la zona de un sistema de alerta temprana ante el riesgo de estos eventos catastróficos. Cualquier tipo de interferómetro óptico, o gravitacional, sufrirá las consecuencias de la actividad sísmica, por pequeña que esta sea.

Otro tipo de riesgo es el de los trabajos a gran altitud en un observatorio moderno, como los de los Andes chilenos. Por ello, los trabajos de Foster (1984), Cudaback (1984), Böcker y Vogt (2007) y Böcker et al. (2009) son de interés. Las consecuencias de la falta de oxígeno se traducen, generalmente, en una pérdida de habilidades y de atención, a las complejas tareas que han de ejecutarse. Por tanto, es deducible que exista un protocolo de seguridad y salud estrictas, en un entorno tan hostil como este. A gran altitud, como señala Grenon (2007), el paisaje vegetal es desolador en los Andes chilenos. La adaptación de las plantas al fuerte viento, la poca humedad,

la alta insolación y las bajas temperaturas hacen que las plantas crezcan en horizontal, y con muy poca altura sobre el suelo.

Weilenmann (2012) nos describe las necesidades de energía eléctrica de las instalaciones del VLT y anexos logísticos inmediatos, como la residencia a escasos km. de la instalación del telescopio. Este autor considera que los observatorios, en lugares remotos, como Paranal, deben contar con fuentes de energía renovable, ante el elevado precio de la misma. Con ello no solo se evita una factura comercial elevada, sino que se contribuye a mitigar la huella de carbono de una instalación científica. También considera un sistema de enfriamiento de las cúpulas, basado en energía solar. Más en el futuro se puede pensar en instalar placas fotovoltaicas, y quizá algún generador eólico, para las demandas energéticas de VLT en Paranal. La distribución porcentual de necesidad energética de las distintas instalaciones de Paranal quedan reflejadas en la figura 131. Como puede observarse, 2/3 de la energía se consume en la zona de los telescopios.



Fgura 131. Necesidades de energía en VLT-Paranal.

Otro riesgo relativo a la extrema lejanía y ambiente extremadamente frio, es descrito por Storey et al. (2007). Estos autores describen la estación de Dome C, atendiendo a su funcionamiento y registros climáticos y astronómicos en dicha estación, a 3250 m. de altitud, en el casquete de hielo antártico. Lo extremo de las temperaturas, de hasta -70°C, obliga a la construcción de entornos de soporte vital ligeros y resistentes, que han de ser transportados mediante orugas desde la costa, o bien en aviones adaptados al aterrizaje en pista de hielo.

Fuente: Weilenmann (2012).

Lawrence et al. (2012), discutiendo sobre las prometedoras condiciones de las bases en la alta meseta Antártica, a pesar de sus riesgos, señalan que las condiciones extremas de altitud y temperatura requieren desarrollar sistemas robustos de control remoto y sistemas autónomos, para operar en cualquier entorno. Algunas de estas estaciones solo pueden ser atendidas durante el verano antártico, por lo que la fiabilidad operativa es primordial. Todo ello puede resumirse en unos requisitos que enumeran como:

- a) La estación debe tener su generación autónoma de energía (Hasta 3 KW.)
- b) Calefacción del instrumental, generalmente sobre la temperatura ambiente
- c) Un sistema de control redundante, con múltiples sistemas que se auto arranquen, controlados por un ordenador central.
- d) El sistema de comunicaciones con la base debe ser fiable y robusto. Debe poder guardar los datos y poder enviarlos con seguridad.
- e) El observatorio debe cumplir con los requisitos logísticos, en especial con los medios de transporte que lo mantienen. El tamaño es una restricción importante.

De acuerdo con Fehrenbach (1981), las primeras ideas de construir un observatorio europeo en el hemisferio sur partieron de dos reputados astrónomos en 1953: J. Oort y W. Baade. Pronto tuvo buena acogida por la comunidad astronómica europea, especialmente entre los franceses, Bourgeois y Danjon. Así, Bourlon (1991) menciona las condiciones "casi perfectas" del emplazamiento geográfico del cerro Paranal, desde un punto de vista geológico, geotectónico y climático. El estudio geológico del lugar, para la construcción de un gran observatorio, como es el VLT, es fundamental, dado que la estabilidad del terreno, impacto de terremotos y riesgos de tipo estructural deben ser completamente evaluados. Siguiendo en el norte de Chile, Sarazin (2005) considera una estrategia para poder seleccionar una lista corta de lugares óptimos, destinados a albergar el futuro gran telescopio europeo "ELT". Para ello se desarrolló una herramienta de análisis de tendencia climática por la Universidad de Friburgo (http://archive.eso.org/friowl), que usa un sistema de entrada de datos de nubosidad, agua precipitable y aerosoles, entre otros, para construir mapas donde queden reflejados estos parámetros, pudiendo definirse entonces, una serie de áreas adecuadas a albergar observatorios como ELT.

Un caso especial es el del gran telescopio del CALTECH, o TMT, con una serie de trabajos, como los del "TMT Site Selection Team" (2008), donde se describen las características que debe reunir el nuevo telescopio americano de 30 metros (TMT), que se pretende erigir en el norte de Chile, o en Mauna Kea (Hawai), donde hay una gran oposición, por parte de los nativos de la isla.

El caso del TMT también es expuesto por Riddle (2011) en una presentación o informe gráfico, muy sintético, donde se describen tanto los lugares candidatos para el telescopio TMT, como los instrumentos y software estándar para las campañas de medición en los distintos lugares considerados. La logística es ciertamente problemática en algunos de ellos, por dificultad de accesos, altitud, etc.

5.4.1 Hawái

Hansen et al. (1966) nos describen los detalles de selección de lugares para observación solar y estelar en las islas Hawái, considerando las bases de archivos meteorológicos de las estaciones próximas, y fijando los lugares en las cumbres de la isla principal (Hawái), con los sitios de Mauna Loa y Mauna Kea (ambos cercanos a 4,200 m de altitud). La excelente logística, acceso, comunicaciones y clima de las islas, también ha hecho de estos lugares una especie de meca para instalar observatorios astronómicos.

5.4.2 Norte de Chile. El medio árido óptimo para observación astronómica

Sarazin (1997) trata el fenómeno el Niño (SOI), Oscilación del índice del Pacifico Sur, desde la perspectiva del aparente perjuicio que supone la aparición de esta anomalía, propia del Pacifico tropical. Se ha observado, empíricamente, que el número de noches fotométricas disminuye sensiblemente (entre un 10% y un 20 % anual) en los observatorios de Paranal (Figura 132) y La Silla en Chile, por un aumento de la nubosidad y las precipitaciones, en toda la zona costera de Perú y Chile. Un cuasi periodo de cuatro años es la duración estimada de esta anomalía, pero mantiene mucha irregularidad en su duración e intensidad. El fenómeno SOI continúa siendo bastante impredecible.
Figura 132. Acceso a Cerro Paranal. Febrero 1987



Fuente: Madsen (1987) citado en Woltjer (1987).

El Large Southern Array (LSA) es uno de los proyectos de más alta prioridad entre la comunidad europea (Otárola et al., 1998). En concreto, se trata de instalar un gran conjunto de radiotelescopios que operan en frecuencias milimétricas y submilimétricas. El lugar elegido está en un entorno muy favorable del llano de Chajnantor, a 5000 m. de altitud, en la cordillera andina de los volcanes.

Varela et al. (2014) presentan las principales variables meteorológicas para tener en cuenta en la selección del lugar, para la construcción del E-ELT (Telescopio Europeo Extremadamente Grande), así como para el TMT, o Telescopio de 30 metros, de los americanos. El estudio parece concluir que las mejores condiciones meteorológicas y de apoyo logístico estarían en el entorno del observatorio del cerro Paranal (Chile).

García-Lorenzo et al. (2005) sugieren considerar la velocidad media del viento, al nivel de los 200 milibares, como indicador aceptable para elección de lugares que necesiten de una alta resolución espacial (seeing), dado que se ha encontrado una razonable correlación entre el seeing para el conjunto de la atmósfera y la velocidad del viento en altos niveles.

5.4.3 Canarias, España y Europa

Lombardi et al. (2006 y 2007) describen las características meteorológicas y logísticas para el observatorio de la Isla de la Palma (Canarias, España). Centran su estudio en la serie de observaciones de temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y viento, considerando una serie de unos 20 años. Además, analizan la estructura vertical de la atmósfera. Las observaciones de radiosondeo muestran que la

llamada "capa de inversión" se situá, típicamente, entre los 800-1,200 m de altitud; hecho también señalado por McInnes y Walker (1974).

El caso del "site testing" del SE de España fue acometido por Birkle et al. (1976). El autor estudió las condiciones en la Sierra de Los Filabres, para el observatorio Hispano-Alemán de Calar alto. Algo después, Moles y Quesada (en un informe interno) seleccionaron un lugar en el sur de Aragón (Sierra de Javalambre). Aquí se efectuaron pruebas para instalar el observatorio JAO (Moles et al., 2010). Este lugar fue seleccionado en base a un exhaustivo estudio de nubosidad, a partir de fotografías LANDSAT, de resolución 250 m/píxel, en la época 1983-1988. Esto permitió elegir finalmente el Pico del Buitre, a 1957 m. altitud, en la parte SE de dicha sierra, como lugar más adecuado, por su logística, topografía y por las ventajas y el soporte con el que contaba de instituciones científicas cercanas, en Madrid, Zaragoza, Valencia y Barcelona. En los Alpes occidentales italianos, Damasso et al. (2010) consideran factible establecer observatorios de tipo medio en lugares accesibles dentro de Europa, donde la cercanía logística, hacen convenientes aún lugares que solo disponen del 39% de noches despejadas, y un 18% adicional de noches con nubosidad parcial.

5.4.5 La Antártida

Las bases antárticas del Polo Sur estadounidenses, a 2830 m., la francoitaliana de Concordia, en Dome C (3250 m.), y las estaciones menores de Vostok (Rusia), Dome A (China) y Dome F (Japón), cercanas a los 4000 metros de altitud, en el casquete polar Antártico, son un claro ejemplo de establecimiento de la observación astronómica en condiciones extremas por frio, altitud y aislamiento geográfico. Algunos aspectos generales de la meteorología de esta zona de la Tierra pueden consultarse en Geissler y Masciadri (2006). Estas bases han de ser abastecidas en la época del verano austral, bien con avión adaptado a pista de hielo, o mediante convoy de tractores oruga "ratrack" que, partiendo de las bases de la costa, han de recorrer unos 1500 km. o más, antes de llegar a las bases citadas. Las travesías pueden durar varias semanas. Los movimientos han de ser muy medidos y calculados. Cualquier emergencia en la época invernal y de obscuridad podría acarrear consecuencias catastróficas, dado lo extremo de la logística en todos los aspectos.

Las condiciones climáticas extremas de la base remota china en Dome A, a 4080 m. de altitud, en el casquete de hielo antártico, pueden deducirse de la experiencia de medición de parámetros atmosféricos y climáticos deducidos por Yang et al. (2009). De acuerdo a las medidas instrumentales, y a las determinadas por modelos climáticos, este lugar no tiene rival para la observación astronómica en determinadas longitudes de

onda del lejano infrarrojo. No obstante, los problemas logísticos y técnicos que han de superarse, para operar cualquier instrumento, en semejante entorno, son muy difíciles. La extrema lejanía, altitud y bajísimas temperaturas, que pueden alcanzar los -80° C, son los principales escollos. La expedición china compuesta de 17 miembros tardó 22 días en llegar a Dome A, desde la estación costera china de Zhongshan, en la Antártida, y permaneció allí dos semanas durante el mes de enero de 2008, llegando a instalar la estación multidisciplinar PLATO. El resto del tiempo la estación estuvo inhabitada, aunque muchos de los instrumentos permanecieron activos, aún en el invierno antártico (Figura 133).





Fuente: Mapa cortesia del Australian Antartic Data Center.

Carlstrom et al. (2011) describen el telescopio de radio milimétrico de 10 metros de apertura (SPT), erigido en la base norteamericana de Scott, en el Polo Sur. Su objetivo es aclarar aspectos cosmológicos y relativos al estudio de galaxias en bandas de radio. La logística de esta base americana es excelente, considerando el lugar donde se encuentra, ya que está atendida por personal muy numeroso y entrenado. Las comunicaciones con la base de la costa Antártica son regulares, así como la comunicación vía aérea hasta América del Sur o Australia.

Saunders et al. (2009) discuten las características comparativas entre varios lugares del casquete de hielo Antártico. En particular comparan los Domos A, B, C, y F, así como algunos lugares próximos a estos y el propio Polo Sur. Aunque todo ellos

reúnen condiciones superiores para el infrarrojo y el radio submilimétrico, las condiciones en la parte visible se ven minoradas, respecto a los observatorios en climas más tropicales, por el efecto negativo de las auroras y el "airglow", así como por la escasez de horas de periodo de obscuridad astronómica anual.

Storey (2012) y Ashley (2012), respecto de las condiciones de la alta meseta Antártica para la observación astronómica, únicas, en especial la correspondiente al lejano infrarrojo y radio submilimétrico, indican que este lugar, a pesar de las enormes restricciones logísticas, no tiene rival en ningún lugar del planeta. La idea de morir congelado y muerto de hambre es algo que se nos viene a la mente con solo recordar el destino de los exploradores polares del siglo XIX y XX. Recordemos solo algunas de las características astro-climáticas de dicho continente:

- El cielo es unas 50 veces más obscuro en el infrarrojo lejano que en los lugares templados de la Tierra.
- El agua precipitable (PWV) es unas 10 veces más bajo que en lugares de similar altitud en latitudes templadas.
- El seeing puede ser al menos la mitad, considerando que estamos hablando sobre unos 20-30 m sobre el suelo.
- El ruido estelar (scintillation) es 2.5 veces inferior.
- El contenido de aerosoles es una 50 veces menor.
- El cielo se mantiene obscuro varios meses seguidos al año.

Xu et al. (2016), mediante modelos estudian los efectos del viento sobre una cúpula plegable, para un telescopio óptico de 2.5 m. de apertura, que ha de mantener sus características de calidad de imagen, y que está previsto instalar en la cima del casquete glaciar Antártico (Dome A, a 4080 m.).

5.4.6 Oriente Medio, India, China

En el ámbito de oriente medio y el SE asiático, Aksaker et al. (2015) realizaron una selección de lugares para un nuevo observatorio en Turquía. Para estudiar una localización óptima elaboran cartografía, de tipo multicriterio (MCDA) haciendo uso de un Sistema de Información Geográfica (GIS) e imágenes de satélite, en las que se destaca las representaciones de la cobertura nubosa, la contaminación lumínica, los aerosoles, el viento, el PWV y un modelo de elevación digital de terreno. De este estudio se desprendió que la región más favorable de Turquía se sitúa en una banda que cruza el país desde el SW al NE, con algunos puntos en la zona SE.

Dhananjay (2014), en la figura 134, nos muestran un sistema prototípico de medidas meteorológicas, microtermales y de turbulencia óptica atmosférica, mediante

monitor de seeing, concretamente el Solar Differential Image Motion Monitor (SDIMM). El equipo se desplegó en el nuevo sitio astronómico de la India, en el Tíbet, denominado Hanle, a 4500 m. de altitud, en la zona de Cachemira, y situado en lo que se considera ya meseta tibetana.



Figura 134. Disposición típica de instrumental durante una campaña de evaluación de un nuevo observatorio astronómico

5.4.7 El caso de la red CTA

La selección de lugares de conveniencia logística y climática, para el proyecto de telescopios de la red CTA (The Cherenkov Telescope Array), es expuesta, de manera prolija, por Castro-Almazán y Muñoz-Tuñón (2018). CTA es un proyecto de la "Nueva Astronomía de Rayos Gamma", y sus requerimientos espaciales y geográficos son especiales, así que ha de estar en lugares del mundo estratégicamente distribuidos, en ambos hemisferios, y que tengan una altitud y una climatología adecuadas, al objetivo de sus observaciones.

5.5 OBSERVATORIOS EXÓTICOS, GLOBOS, AVIONES BARCOS Y DRONES

El sistema de medidas meteorológicas y astronómicas desde globo, sea tripulado o no, es bastante antiguo, y se remonta al siglo XVIII, con los inicios de la navegación aérea de los hermanos Montgolfier (Figura 135). Estos pioneros, con simples globos ligeros, de papel y textil, se elevaban con aire caliente. El 4 de junio de 1783 realizaron la primera demostración pública, y el 21 de diciembre, del mismo año, tuvo lugar la primera ascensión tripulada de la historia. El globo sobrevoló París durante 25 minutos, y tomó tierra a unos 9 kilómetros de distancia.

Fuente: Dhananjay (2014).

Figura 135. Imagen recreada del globo aerostático de los hermanos Montgolfier (1783)



Un siglo después, concretamente en 1899, el Reverendo J.M. Bacon, realizó varios ascensos en globo, tanto diurnos como nocturnos, con el objeto de comprobar si aumentaba la radiación ultravioleta con la altura y poder tomar fotografías, aún una técnica incipiente, así como comprobar los distintos estados del tiempo sobre Inglaterra. Encontró que la bruma nubes y niebla raramente sobrepasaron los 4000 a 6000 pies de altura.

Ya a mediados del siglo XX, los militares toman la iniciativa, con Simons en 1958. Este autor describe los vuelos en globo de gran altitud, con cápsulas y trajes presurizados, hasta unos 32 km. de altura. El objeto era probar las respuestas fisiológicas a la gran altitud, y si el hombre podía resistir la radiación presente a esas altitudes. Todo el objeto de estos vuelos era, sin duda, preparar la inminente salida del hombre al espacio, y su adaptación al entorno de extremo vacío y soledad. El récord de altura fue establecido el 2 de junio de 1957, por el capitán Joseph Kittinger, que en una cápsula presurizada, elevada con globo, alcanzó los 96.000 pies de altura sobre Nuevo México.

En Europa, Blackwell et al. 1959 mencionan los vuelos tripulados realizados en globo, en 1956 y 1957, hasta unos 6000 metros de altitud, sobre Meudon (Francia). En este caso portando telescopios refractores, de unos 25 cm., montados en la góndola del aparato, y con el objeto de estudiar la granulación solar, a la máxima resolución y contraste posible. Se pudo observar una paulatina mejora, ya en los primeros cientos de metros, con una perturbación muy pequeña o remanente a los 6 km. de altitud, por lo que se dedujo que aún hay efectos de inhomogeneidad a mayores alturas que las de estos vuelos tripulados.

Bastante más tarde, tenemos los experimentos en globo que tratan de resolver aspectos cósmicos u atmosféricos muy especializados (Sales et al., 1991). Estos autores describen el instrumento de la agencia espacial francesa (CNES), AROME; siendo este un tipo de espectrofotómetro, enfriado a 4º Kelvin, que vuela a bordo de globos de gran altitud (30 Km.) y volumen (400000 m³). El primer vuelo sobre el Mediterráneo se realizó en agosto de 1987, hasta una altura de 20-30 km., donde se estabilizó la góndola, para efectuar las medidas infrarrojas, durante periodos de hasta 15 horas. Ya en esta época, el instrumental a bordo de los globos, y los propios globos, constituían una seria impedimenta logística, que requerían el desplazamiento de equipos de personas a bordo de coches, barcos y aviones, para seguir un experimento de apenas unas horas de duración.

Azouit y Vernin (2005) presentan una técnica que computa la función estructural de la temperatura con la altitud. Se trata de medir las microvariaciones del campo de temperatura a distintas alturas sobre el suelo. El equipo, compuesto por unas sondas especiales y otros instrumentos meteorológicos auxiliares, se hace volar en globos meteorológicos estándares, hasta una altura de 20 Km. o más.

Rinehart et al. (2014) nos presentan el diseño del Balloon Experimental Twin Telescope for Infrared Interferometry (BETTII): un complejísimo y avanzado experimento de detección de fuentes débiles del infrarrojo lejano, que se efectua desde la estratosfera, y a bordo de un globo de gran capacidad de carga y tiempo de permanencia en el vuelo científico.

Fesen (2015) propone un sistema de globos aerostáticos de gran altitud que se mantienen casi estables, merced a un sistema de vientos cruzados, entre la baja y la alta estratosfera.

Finalmente citaremos a Borden et al. (2017). Estos autores describen otro sistema de instrumental complejo, destinado a volar en globos de gran capacidad de carga y altitud de vuelo. En concreto, se trata del proyecto STABLE (Subarcsecond Telescope And Balloon Experiment), financiado por la NASA y el CALTECH (Instituto de Tecnología de California). En el mismo se trata de estabilizar el telescopio mediante un sistema de guiado estelar. Se pretendía que la carga del instrumento, de unos 150 Kg., pudiera volar toda la noche, a una altura de 35 Km.

Pasando al avión, mencionaremos a Haas y Pfister (1998), Horn and Becklin (2001) y Erickson (1998). Estos autores son los que detallan los pormenores del Observatorio Infrarrojo Estratosférico de Estados Unidos (SOFIA). Este instrumento, caro y complejo, fue ideado para elevar un telescopio infrarrojo de 2.5 metros de apertura hasta los 14 Km. de altura, donde puede realizar observaciones estratosféricas, en el infrarrojo medio y lejano (2.5-100 micras de longitud de onda). Se eleva a bordo

de un Boeing 747 modificado, hasta donde las perturbaciones atmosféricas son mínimas, y donde es posible explorar el cielo en estas ventanas, prohibidas desde la superficie terrestre.

Entre las pocas referencias que hemos encontrado de mediciones desde dron, citaremos a Wrenger y Cuxart (2017). Estos autores realizan medidas de temperatura sobre un rio, tratando de determinar los gradientes de temperatura, no solo en un plano horizontal, sino a distintas alturas. Sus resultados ofrecen el campo de temperaturas sobre la zona, en una especie de cartografía tridimensional.

5.6 SALUD SEGURIDAD Y SERVICIOS PERSONALES

Este apartado se centrará solo en algunos aspectos vitales y recurrentes en la vida, y quehacer, de los astrónomos y el personal que trabaja en observatorios astronómicos. Al respecto, podríamos citar algunas patologías infecciosas recogidas en el número 26 de la revista The Messenger, propias de los países tropicales, y de Hispanoamérica en particular, como el "*mal de chagas*" o "American tripanosomiasis". Ésta es transmitida por un insecto vector, llamado "vinchuca", siempre que esté infectado de un protozoó llamado "*Trypanosoma cruzi*". La vinchuca no inyecta el parasito al picar, sino cuando defeca sobre la piel o una herida del sujeto, eliminando el protozoó infeccioso con la defecación. Aunque frecuente en el medio rural de los países tropicales de América del Sur, esta afección afecta raramente a los lugares que dispongan de medios para combatir o alejar esta plaga, no siendo un motivo de preocupación alarmante. Existen medicinas para su tratamiento, pero la enfermedad, después de una fase aguda las primeras semanas, remite, aunque algunos síntomas pueden aparecer a lo largo de la vida del paciente.

Debemos también mencionar el caso del llamado "*mal de montaña*" ("mountain sickness"), que es tratado, de manera muy específica, por Foster (1984) y Cudaback (1984). La hipoxia parece ser la responsable de este trastorno, que en casos graves conlleva aparición de edema cerebral o pulmonar. A pesar de ello, la mortalidad registrada es muy baja. Todo ello debe seguirse en publicaciones médicas especializadas, como *Mountain Medicine*.

Obviamente, deben cumplirse una serie de condiciones logísticas para trabajar a tan elevada altitud. Aparte de los nativos chilenos, mejor adaptados al entorno árido, frio y con baja opresión parcial de oxígeno a grandes altitudes, los europeos y norteamericanos, deben de seguir periodos de aclimatación, en estaciones intermedias, a unos 3000 metros de altitud. Las consecuencias de la falta de oxígeno se traducen, generalmente, en una pérdida de habilidades y de atención en el desarrollo de las

417

complejas tareas que han de ejecutarse. Por ello es deducible que exista un protocolo de seguridad y salud estrictas, en un entorno tan hostil como este.

Una vez en la montaña, los visitantes y cualquiera del personal del observatorio, deben alertar de cualquier síntoma, como mareos, malestar, vómitos, visión borrosa etc; síntomas éstos específicos del mal de montaña. Se atribuye a una falta de oxigenación del organismo, y solo cabe descender al afectado, salvo que se disponga de oxigenación con mascara, cámara bárica, u otro apoyo médico-logístico conveniente. La mayoría de los casos son leves, pero, en caso de no remitir con rapidez durante el primer día, debe actuarse y descender al paciente, en todo caso, a niveles donde se observe una recuperación. En caso contrario el peligro de muerte es considerable.

Figura 136. Distribución de la edad de fallecimiento de 489 miembros de la AAS en grupos de 5 años. Las barras de error son la raíz cuadrada de los números. Los datos han sido ajustados a una regresión polinomial de 4º orden, teniendo un pico en torno a 85.2 años



En un entorno de gran altitud y distancia a los núcleos urbanos, es esencial contar con unos servicios de trasporte, alojamiento y restauración adecuados al entorno. Este es un aspecto que los astrónomos valoran mucho; si bien pocas veces queda explicitado, creemos que por motivos de corrección política.

Abt. (2015) seleccionó los datos sobre las vidas de 489 astrónomos, miembros de la AAS (American Astronomical Society). Extrajo los datos de obituarios publicados entre 1991-2015, más otros no publicados, hasta un total de 674 casos (Figura 136).

Los datos muestran que el periodo de vida más frecuente está en torno a 85 años, de los 674 decesos conocidos. Los astrónomos que vivieron 90 años o más representan un 11%. En comparación con los astrónomos, el público americano en general, en esta época, vivió de media 77 años, o sea, 8 años menos que los astrónomos.

Uno puede pensar las razones por las cuales los astrónomos viven más que el público en general. Una de ellas es que su ocupación es poco peligrosa. Una segunda razón podría ser la gran actividad que suponía la observación, antes de la era digital, que podemos situar en torno a 1980. Ello hacía que mantuviesen un estilo de vida saludable, normalmente pasando frio en las cúpulas astronómicas. Una tercera razón podría asociarse con que es una actividad poco estresante, comparado con la gran mayoría de otras profesiones. En todo caso, lo limitado de los datos de este estudio hace que deban tomarse los resultados obtenidos con cautela, por falta de verdadera significación estadística.

5.7 RELACIONES CULTURALES, ACUERDOS INTERNACIONALES Y DIVULGACIÓN

Estos aspectos son raramente expuestos por los astrónomos en sus artículos científicos, y es preciso recurrir a boletines y periódicos de las propias instituciones científicas, para encontrar datos. Al ser una información tan variada es muy difícil sistematizarla, sino es con un interés sobre un hecho en particular. Por ello, solo daremos unas pinceladas extraídas de los boletines de la revista *The Messenger*, si bien existen otras muchas publicaciones de tipo divulgativo.

Así, remontándonos a finales del siglo XIX, tenemos a Hussey (1897), quien considera la relación de la astronomía y los astrónomos con el público en general. Menciona como el astrónomo ha de responder a las preguntas que un público inteligente pueda formular, y como las sociedades astronómicas y científicas han de devolver a la ciudadanía parte de lo recibido, en forma de conocimiento y servicio de divulgación. El trabajo del astrónomo es poco entendido por el público, y aunque las relaciones entre ambos son cordiales, la gente tiende a preguntarse lo siguiente: ¿un astrónomo sirve para algo?

Antropología y entorno cultural

Es un hecho muy común que, ante la menor propuesta de construcción de un nuevo observatorio, se movilice, con rapidez, una cohorte de grupos ecologistas, indigenistas y seres de toda posición y condición, que reclaman que no se haya de generar ningún daño al medio ambiente y que, en todo caso, cuente con su beneplácito. Con esto deben lidiar, en primera instancia, los promotores de nuevos desarrollos astronómicos. Nosotros suponemos que hay varias maneras de solucionar estas cuestiones, si bien en algunos casos los nativos ofrecen una oposición tenaz, al punto de tener que buscar ubicaciones en otro lugar, como es el caso del TMT en Hawái.

Para Argandoña y Mirabel (2007), la construcción del Radio observatorio de ALMA, cercana a la villa de San Pedro de Atacama, está contribuyendo a impulsar otras ciencias, no solo a la astronomía. En esta región de Chile, hace más de 10000 años, se instalaron los primeros humanos, en el entorno del desierto y la cordillera de los Andes. Durante muchas generaciones, estos pobladores lucharon contra un entorno hostil, dando lugar a culturas y tradiciones únicas, cuyo origen y evolución están aún en investigación histórica y antropológica. Por ello, ALMA ha propiciado la construcción de un museo etnográfico y cultural de la zona, situado en las inmediaciones de los edificios de soporte del observatorio, a 3200 m de altitud. El museo recrea de forma realista una de las veinte viviendas descubiertas en la zona, las cuales están dispersas entre los 2800 y 4000 m. de altitud, en esta área desértica.

Ya en 1981, Fehrenbach señaló que la idea de construir un observatorio europeo en el hemisferio sur partió de los reputados astrónomos J. Oort y W. Baade, en 1953, y pronto tuvo acogida, como una buena idea por la comunidad astronómica europea, especialmente entre los franceses, Bourgeois y Danjon.

Hanuschik (2013) señala que es posible observar, desde observatorio Paranal, y con claridad durante todo el año, el distante cerro o volcán de Llullaillaco, que está a 190 Km. de distancia, signo de la gran transparencia atmosférica de la zona. Cerro Llullaillaco se eleva hasta los 6739 m., en la frontera chileno-Argentina. Existen una veintena de cimas volcánicas, entre los 6000 y 6800 m de altitud en la zona, aparte de algunas mesetas elevadas, en torno a 4000-5000 m. Todas ellas susceptibles de futuros desarrollos, y que explicitamos en el capítulo "Propuestas a Futuro" (Capítulo VIII).

Se cree que Llullaillaco está inactivo actualmente, siendo su última erupción en 1877. Es reputado como ser el volcán más alto del mundo. Durante gran parte del año la cima aparece con nieve y con pequeños glaciares con nieves permanente a 6500 m. de altitud (quizá también la cota de nieve permanente más alta del mundo). Oficialmente, este volcán fue escalado, por primera vez, en 1952; pero históricamente se sabe que los incas depositaron momias de niños en su cima hace siglos, tal vez en un ritual o ceremonia religiosa desconocida, y que fueron descubiertas en 1999. Con ello es también el lugar arqueológico más elevado del mundo.

De acuerdo con la información recogida en el número 123, de 2006, de la revista *The Messenger*, España firmó muy tarde el acuerdo de adhesión a la organización

astronómica europea ESO; concretamente en Julio de 2006. Considérese que la ESO fué fundada por Bélgica, Francia, Alemania, Holanda y Suecia el 5 de Octubre de 1962. Es necesario advertir, en este mismo sentido, que el desarrollo de la astronomía y la astrofísica en España ha sido fulgurante durante las últimas décadas, con la constitución de importantes institutos de astrofísica, como los de Canarias y Andalucía.

España es el octavo país en el ranking mundial de producción e investigación astrofísica. El clima es muy favorable, particularmente en Andalucía y Canarias. Las notables condiciones de seeing y agua precipitable, entre otras variables astroclimáticas importantes, son estudiadas por Birkle et al. (1976) y Quesada (1989), los cuales señalan las excelentes condiciones de los observatorios astronómicos de la Sierra de los Filabres (Calar Alto) y Sierra Nevada.

Finalmente, citaremos a Worth (2016), que describe la particular guerra entre comunidades de astrónomos de diferentes instituciones americanas, cuyo ejemplo más paradigmático es la rivalidad por construir el telescopio óptico más grande. Esta lucha intelectual se manifiesta entre la Institución Carnegie de Washington, con un proyecto llamado GMT, o Telescopio Gigante Magallanes, de 30 metros de diámetro, listo para instalar en Chile, y el CALTECH (Instituto de Tecnología de California),con otro proyecto de telescopio gigante, de unos 30 metros, denominado TMT, que se pensó instalar en Mauna Kea. Ambos proyectos rivalizan a su vez con el gran telescopio europeo E-ELT de la ESO, a instalar en el cerro Armazones (norte de Chile).

Estas rivalidades se dan en casi todos los países, si bien casi nunca se conocen los detalles de estas diferencias entre científicos e instituciones. Los comportamientos a veces son poco deportivos. Aquí la belleza intrínseca de la astronomía tiene un velo un tanto oscuro.

6 DISCUSIÓN

En la logística de observatorios astronómicos, una de las necesidades más ineludibles es la de la facilidad de acceso y las comunicaciones, a la par de la inexistencia de riesgos climáticos y geológicos (sísmicos y volcanológicos), aunque sean poco probables. Las necesidades de energía y agua son un tema crucial, y se debe tener independencia y seguridad en el suministro. Debe conocerse y destacarse cual es el nivel de desarrollo de las redes de comunicaciones, en especial carreteras, puertos y aeropuertos; así como si los servicios sanitarios y técnicos están cerca, para el soporte de emergencias. El tema de la salud, la seguridad y los servicios personales no suele reflejarse en las publicaciones científicas. No obstante, los trabajos de Foster (1984) y

Cudaback (1984) reflejan, en publicaciones científicas, el grave problema de salud que ocasionalmente puede conllevar la hipoxia, por realizar el trabajo a gran altitud y los efectos de "mal de montaña"

Los observatorios importantes tienden naturalmente a agruparse en grandes instalaciones, con múltiples cúpulas astronómicas, radioastronómicas, redes de telescopios, y otros servicios anexos o remotos. Es lo que hemos denominado "núcleo astronómico". Todo ello con el fin de optimizar costes y aprovechar sinergias logísticas, especialmente servicios comunes, comunicaciones, accesos, servicios de hospedaje, etc.

Aunque, en lo esencial, el globo aerostático apenas ha tenido modificaciones en los últimos dos siglos, sin embargo, hoy es posible elevar cargas medias con globos de nueva tecnología, hasta una altura de unos 35 km., y con un coste razonable, respecto a cualquier vuelo espacial. Desde un punto de vista económico y logístico, los pequeños globos de helio son ideales para pequeñas cargas instrumentales de menos de 250 gramos de peso.

El caso de los "drones" es especial, aunque no sean más que helicópteros y aviones no tripulados. El hecho de que tengan tantas limitaciones legales y de seguridad obedece, sin duda, a que el estamento militar y de inteligencia de los diversos países ven en ellos un instrumento peligroso, sobre todo en manos enemigas y de terroristas. El "dron" parece abrirse camino recientemente en la toma de datos meteorológicos y sondeos de precisión en la baja atmósfera. Los drones son más fáciles de operar que un avión y mucho más baratos. Su futuro sin embargo es muy prometedor también en astronomía.

El emplazamiento de un observatorio fue fijo hasta la década de los años 70 del siglo XX, después ya pudieron hacerse móviles, a bordo de todo tipo de vehículos. El ámbito geográfico de los observatorios clásicos estaba normalmente inscrito en las grandes ciudades, Paris, Londres, Berlín etc. Pero a mediados de los años 60 del XX se produce una "onda expansiva" de los emplazamientos, buscando lugares cada vez más lejanos, y sin contaminación industrial o lumínica, llegando, en la actualidad, a colonizar los sitios más inhóspitos, como las cimas de los Andes, El Tíbet o la alta meseta Antártica.

Mencionaremos a una gran potencia emergente en astronomía y radioastronomía, China, que ha construido, y está proyectando, observatorios a gran altitud, en el Tíbet, entre 5000 y 6000 metros de altitud. Al ser China bastante autárquica, en todos los terrenos, prefieren mantener una cierta distancia con occidente. Sus proyectos abarcan desde el Tíbet a la Antártida, en la parte más elevada del casquete

glaciar (Dome A), a unos 4100 m. de altitud: probablemente el lugar con peor logística, más frio y con la soledad más absoluta de todo el planeta Tierra.

La idea de los telescopios gigantes no es nueva, y el caso del fallido OWL es paradigmático (Ver Gilmozzi y Dierickx, 2000; Gilmozzi, 2005). Ya en la década de los 70 se impuso la idea de que podían abordarse, inicialmente, con aperturas de 8-10 m. de diámetro; y ya en los años 80 y 90 se consideró construir telescopios de la clase 25-50 metros de diámetro, como algo totalmente realizable, desde el punto de vista económico y óptico-mecánico. Pero el asunto de un telescopio de 100 metros de diámetro es algo diferente. El OWL estaba condenado por su gigantismo. Su extremada dificultad y costo llevarían, poco después de exponerse públicamente, a su abandono, en especial tras la crisis económica de 2007-2008, y los abrumadores costes y dificultades técnicas que se deberían resolver.

Mientras la astronomía europea ha sabido unirse en un sólido grupo, eficaz y potente, a través de la ESO (Organización del Observatorio sur europeo), para construir los más potentes telescopios y observatorios, en las inmediaciones del desierto de Atacama, Chile, los norteamericanos, la otra gran potencia astronómica, siempre han estado divididos (Worth, 2016). ESO, por su parte, ya tiene finalizados o casi finalizados los observatorios de la Silla, VLT, E-ELT, así como las instalaciones radioastronómicas en el llano de Chajnantor, a 5000 metros de altitud.

Sobre el caso de la adhesión de España a la organización ESO, cabe mencionar que fue muy tardía, y que mediaron factores que explican el retraso, sobre todo los de tipo político.

7 CONCLUSIONES

Hemos podido constatar, por la literatura citada, que en entornos de alta montaña, y extrema lejanía (Antártida) o elevada altitud (Andes y Tíbet), se imponen importantes limitaciones en el desarrollo y tamaño de las instalaciones astronómicas.

Así, las dificultades logísticas y presupuestarias hicieron desistir del telescopio OWL "Telescopio Abrumadoramente Grande", de 100 metros de diámetro, seguramente destinado al entorno del desierto de Atacama, pero que finalmente fue reducido o minorado, a una apertura de 42 metros (E-ELT), para construir en el mismo lugar, y que, actualmente (2022), se encuentra en fase de construcción avanzada.

Por otro lado, el tiempo en que un observatorio astronómico permanece en la "cresta de la ola" por su relevancia suele estar en torno a 30-50 años. Después suele decaer, hasta convertirse en museo; eso con suerte. La causa de esta limitación de vida útil puede ser multifactorial, pues la adaptación del instrumental y el personal a las nuevas exigencias de la moderna investigación astrofísica es un tanto difícil. Por otro lado, las exigencias crecientes de las características de observación, en determinadas longitudes de onda o resolución espacial y temporal, pueden requerir inversiones que no sean realistas. Actualmente, las realizaciones científico-astronómicas son impresionantes, en cuanto a tamaño y coste de las instalaciones, aparte de asociarse a una enorme complejidad técnica. Esto ha llevado a constituir grandes centros o "núcleos de observatorios", con decenas de instalaciones independientes, pertenecientes a varias instituciones científicas, dentro del área de una montaña o grupo de montañas cercanas. Ello permite abaratar costes de operación e infraestructuras críticas, optimizado el rendimiento por la inversión realizada.

Las zonas de la Tierra con grandes núcleos astronómicos tienden a distribuirse entre latitudes de 20 a 40 grados norte y sur, en torno a dos grandes bandas tropicales, y en las zonas polares, especialmente, en el continente de la Antártida. Ello obedece a la presencia de altas presiones permanentes y baja nubosidad y PWV, durante gran parte del año.

De alguna manera, se intuye que los límites geográficos y de altitud están próximos a alcanzarse, y cualquier intento de mejora requerirá inversiones, probablemente inasumibles. Así, podemos realizar esta reflexión final: "Muchos astrónomos desearían conocer los últimos extremos climáticos y logísticos sobre determinados lugares, aparentemente inaccesibles, pero temían preguntar".

Sobre la idea de un Parque astronómico en el SE península Ibérica

A raíz de la declaración del Geoparque de Granada por parte de la UNESCO, en las comarcas de Guadix, Baza, Huéscar y Puebla de Don Fadrique, creemos que sería de utilidad, y complemento a dicha figura de divulgación, reforzar la actividad educativa y divulgativa en astronomía observacional y remota en este mismo espacio, en colaboración con el observatorio de La Sagra, que actualmente está en desarrollo. Para ello habría que aprovechar las sinergias de ambos entes, más cercanos entre si de lo que sus temáticas parecen abordar. El potencial astronómico de la zona es muy alto, como a lo largo de esta tesis se ha podido deducir.

No es fácil establecer aquí un límite práctico para la tecnología y presupuestos corrientes de las instituciones españolas, parte del cual se deriva a organismos supranacionales, como la ESA y ESO, pero que, en convenio con las mismas, quizá, sea posible plantear para la zona un telescopio de la clase 16-30 metros.

Nuestro capitulo "PROPUESTAS DE FUTURO" ilumina algunos de los caminos

que llevan a los lugares más prometedores dentro de la península Ibérica.

BIBLIOGRAFÍA

Abt, H. A. (2015). The Lifetimes of Astronomers. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific,* 127:713-715. doi: 10.3847/2515-5172/ab3043

Aksaker, N, et al. (2015). Astronomical site selection for Turkey using GIS techniques. *Experimental Astronomy*, 39, 547-566. doi: 10.1007/s10686-015-9458-x

Andersen, M. I., Pedersen, K., & Sørensen, A. N. (2009). Site testing on the Greenland Ice Cap. *Highlights of Astronomy*, 15, 634-635. doi: 10.1017/S1743921310010847

Anderson, J. A. (1939). The 200-Inch Telescope. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 51, 24-26. doi: 10.40710971

Ardeberg, A., & Lindgren, H. (1984). "Some possible sites in Chile". En Very Large Telescopes, their Instrumentation and Programs (pp. 417-430). Proceedings of the IAU Colloquium No. 79. Garching, April 9-12.

Ardeberg, A. (1983). En Workshop on ESO's Very Large Telescope (pp. 217-254). Cargese, Corse, France, May 16-19, 1983.

Argandoña, G., & Mirabel, F. (2007). New ALMA Site Museum Preserves Valuable LocalCulture. TheMessenger,125,55-56.Recuperadodehttps://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.125-sep06/messenger-no125-55-56.pdf

Ashley, M. C. B. (2012). Site characteristics of the high Antarctic plateau. *Proceedings* of the International Astronomical Union, 8(S288):15-24. doi: 10.1017/S1743921312016614

Azouit, M., & Vernin, J. (2005). Optical Turbulence Profiling with Balloons Relevant to Astronomy and Atmospheric Physics. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 117, 536-543. Recuperado de https://iopscience.iop.org/article/10.1086/429785/pdf

Bacon, J. M. (1899). On the value of possible Observation from Free Balloons. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 59, 176. doi: 10.1093/mnras/59.3.176

Birkle, K., Elsasser, H., Neckel, Th., & Schnur, G. (1976). Seeing Measurements in Greece, Spain, Southwest Africa, and Chile. *Astronomy and Astrophysics, 46*, 397-406. Recuperado de https://adsabs.harvard.edu/full/1976A%26A....46..397B

Blackwell, D. E., Dewhirst, D. W., & Dollfuss, A. (1959). The observation of solar granulation from a manned balloon. I. Observational Data and measurement of contrast. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 119, 98. doi: 10.1093/MNRAS/119.2.98

Borden, M., et al. (2017). Thermal, Structural, and Optical Analysis of a Balloon-Based Imaging System. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 129, 035001. doi: 10.1088/1538-3873/129/973/035001

Brown, T. M., et al. (2013). Las Cumbres Observatory Global Telescope Network. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125, 1031-1055. doi: 10.1086/673168

NASA (s.f.). Worldview. Recuperado de https://worldview.earthdata.nasa.gov/

Blaauw A. (1991). *ESO'S early history European Southtern Observatory*. Recuperado de https://www.eso.org/public/archives/books/pdfsm/book_0044.pdf

Bourlon F. (1991). A Geological Description of Cerro Paranal or Another Insight Into the "Perfect Site for Astronomy. *The Messeger*, 67, 64-67. doi: 10.18727/0722-6691/5117

Carlstrom, J. E., et al. (2011). The 10 Meter South Pole Telescope. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 123, 568-581. doi: 10.1086/659879

Castro-Almazán, J.A., & Muñoz-Tuñón, C. (2018). Climatological Study for the Cherenkov Telescope Array North Site at the Canary Islands I: Temperature, precipitation, and Relative Humidity. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 130, 115002. doi: 10.1088/1538-3873/aadf77

Cleland, R. G. (1947). The French Expedition to Lower California in 1769. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 47, 74-75. Recuperado de https://iopscience.iop.org/article/10.1086/125905/pdf

Coughlin, M., et al. (2015). Real-time earthquake warning for astronomical observatories. *Experimental Astronomy*, 39, 387-404. <u>doi</u>:10.1007/s10686-015-9454-1 Cudaback, D. D. (1984). Four Km altitude effects on performance and health. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 96, 463-477. doi: 10.1086/131365

Cui, X. (2005). Present and future Chinese large telescope projects. Proceedings of the International Astronomical Union, 1(S232), 391-396. doi: 10.1017/S1743921306000998

Curtis, H. D. (1909). Astronomical problems of the Southern Hemisphere. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 21(129), 231-244. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40693004

Damasso, M., et al. (2010). Photometric Transit Search for Planets around Cool Stars from the Western Italian Alps: A Site Characterization Study. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 122, 1077-1091. doi: 10.1086/656048

Dhananjay, K. (2014). Site evaluation study for the Indian National Large Solar Telescope using microthermal measurements. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 437, 2092-2105. doi: 10.1093/mnras/stt1985

D'Odorico, S. (2018). 140 + Years of Instrumentation for the La Silla Paranal Observatory. *The Messenger*, 171, 2-7. doi: 10.18727/0722-6691/5061

Douglass, A. E. (1917). The Steward Observatory of the University of Arizona. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 30, 326-330.

Duerbeck, H. W., et al. (1999). Halfway from La Silla to Paranal – in 1909. *The Messenger*, 95, 34-37. Recuperado de https://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.95-mar99/messenger-no95-34-37.pdf

Enard, D. (1984). Visit of STC to Possible Sites for the VLT in Northern Chile. *The Messenger*, 38, 1-2. Recuperado de https://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.38-dec84/messenger-no38-1-2.pdf

Erickson, E. F. (1998). Effects of Telluric Water Vapor on Airborne Infrared Observations. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 110, 1098-1105. doi: 10.1086/316218

Evershed, J. (1915). Note on the atmospheric conditions required for astronomical observations. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 27, 179-183. doi: 10.1086/40711387

Fehrenbach, C. (1981). The First Steps of the European Organization. *The Messenger*, 24, 1-4.

Fesen, R., & Yorke Brown. (2015). A method for establishing a long duration, stratospheric platform for astronomical research. *Experimental Astronomy*, 39, 475-493. doi: 10.1007/s10686-015-9459-9

Fleming, M. (1892). Harvard College Observatory astronomical expedition to Peru. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 4, 58-62. Recuperado de <u>https://adsabs.harvard.edu/full/1892PASP...4...58F</u>

Filippi, G. (2010). Enabling Virtual Access to Latin-American Southern Observatories. *The Messenger*, 142, 2-3. Recuperado de https://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.142-dec10/messenger-no142-2-3.pdf

Forster, P. J. G. (1984). Health and work at high altitude: A study at the Mauna Kea observatories. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 96, 478-487. doi: 10.1086/131366

Garcia, C. J., & Yasukawa, E. A. (1983). Mauna Loa sky conditions—benchmark and present. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 95, 520-526. doi: 10.1086/131201

Rodríguez García-Huidobro, G. (2017). Chile: Global Astronomical Platform and Opportunity for Diplomacy. *Science & Diplomacy*, 6(2). Recuperado de http://www.sciencediplomacy.org/article/2017/chile-global-astronomical-platform

García-Lorenzo, B., et al. (2005). Astronomical site ranking based on tropospheric wind statistics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 356, 849-858. doi: 10.1111/j.1365-2966.2004.08542.x

Geissler, K., & Masciadri, E. (2006). Meteorological Parameter Analysis above Dome C Using Data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 118, 1048-1065. doi: 10.1117/12.672299

Gilmozzi, R., & Dierickx, P. (2000). OWL Concept Study. *The Messenger*, 100, 1-10.

Gilmozzi, R. (2005). Science, technology and detectors for extremely large telescopes. *Experimental Astronomy*, 19, 5-13. <u>doi</u>: 10.1007/s10686-005-9007-0

Grant, J. W. (1854). On the influence of climate upon the Telescopic appearance of a Celestial Body. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 14, 165-166. doi: 10.1093/mnras/14.5.165

Grenon, M. (2007). Nature Around the ALMA Site – Part 1. The Messenger, 127, 59-63.

Grenon, M. (2007). Nature Around the ALMA Site – Part 2. The Messenger, 128, 57-61.

Haas, M. R., & Pfister, L. (1998). A High-Altitude Site Survey for SOFIA. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 110, 339-364. doi: 10.1086/316132

Hale, E. (1905). The development of a new observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 17, 101. doi: 10.1086/40691202

Hale, G. E. (1915a). The work of a modern observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 27, 161-177. doi: 10.1086/40711386

Hale, G. E. (1915b). Progress of Work on the 100-inch Telescope. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 27, 235-236. doi: 10.1086/40710529

Hansen, R. T., Hansen, S. F., & Price, S. (1966). An example of meteorological considerations in selecting an observatory site in Hawaii. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 78, 14-29. doi:10.1086/40674420

Hanuschik, R. (2013). Llullaillaco and Paranal's Skyline. *The Messenger*, 151, 58-61.

Holden, H. D. (1891). Scientific Expedition to the Summit of Mount Blanc by M. Janssen. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 3, 50-53. doi: 10.1086/40666823

Holden, H. D. (1889). American Eclipse Expedition to Africa (December 21, 1889). *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1(5), 125-126. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40666897

Horn, J. M. M., & Becklin, E. E. (2001). High-Latitude Observations on SOFIA. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 113, 997-1008. doi: 10.1086/322916

Hussey, W. J. (1897). Astronomy and astronomers in their relations to the public. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 9(55), 53-64. doi: 10.1086/121170

Hu, Y. I., et al. (2014). Meteorological Data for the Astronomical Site at Dome A, Antarctica. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 126, 868-881. doi: 10.1086/678327

Information on Vinchucas and Chagas Disease. (1981). *The Messenger*, 26, 31-32. https://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.26-dec81/messenger-no26-31-32.pdf Irwin, J. B. (1951). An astronomical visit to South Africa. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 63, 111-120. Recuperado de https://adsabs.harvard.edu/full/1951PASP...63..111I

Joy, A. H. (1927). The Mount Wilson Observatory of the Carnegie Institution of Washington. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 39, 9-19. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/pdf/40668657.pdf

Lawrence, J. S., Ashley, M. C. B., & Storey, J. W. V. (2012). Autonomous observatories for the Antarctic plateau. In M. G. Burton, X. Cui, & N. F. H. Tothill (Eds.), *Astrophysics from Antarctica, Proceedings IAU Symposium No. 288* (pp. 1-10).

Lombardi, G., et al. (2006). El Roque de Los Muchachos Site Characteristics. I. Temperature Analysis. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 118, 1198-1204. doi: 10.1086/507344

Lombardi, G., et al. (2007). El Roque de Los Muchachos Site Characteristics. II. Analysis of Wind, Relative Humidity, and Air Pressure. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 119, 292–302. doi: 10.1086/513079

Lombardi, G. (2010). Astronomical site testing in the era of Extremely Large Telescopes: evaluating the image quality degradation induced by the Earth atmosphere. *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía*, 53, 325-330. doi: 10.48550/arXiv.1001.1234

Lowell, P. (1902). Expedition for ascertaining the best location of observatories. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 63, 42-43. Recuperado de https://adsabs.harvard.edu/full/1902MNRAS..63...42L

Lyot, B. (1945). Lunar Photographs taken by B. Lyot on the Pic Du Midi. *Astrophysical Journal*, 57(339), 310-311. <u>doi</u>: 10.1086/125761

McInnes, B., & Walker, M. F. (1974). Astronomical site testing in the Canary Islands. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 86, 529-544. doi:10.1086/129641

McInnes, B. (1981). Site testing on Hawaii, Madeira and the Canary Islands. *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 22, 266-271. doi: 10.1093/qjras/22.3.266

Merril, K. M. (1984). The 15-meter New Technology Telescope site evaluation program. In *Workshop on Site Testing for Future Large Telescopes, La Silla, Chile, October 4-6, 1983, Proceedings* (pp. 129-144). Garching, West Germany: European Southern Observatory. doi: 10.1117/12.937971

Moles, M., et al. (2010). Site Testing of the Sierra de Javalambre: First Results. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 122, 363-372. doi: 10.1086/651084

Morrison, D., et al. (1973). Evaluation of Mauna Kea, Hawaii as an observatory site. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 85, 255-267. doi: 10.1086/129449

Otarola, A., et al. (1998). European Site Testing at Chajnantor: a Step Towards the Large Southern Array. *The Messenger*, 94, 13-20.

Quesada, J. A. (1989). Precipitable water vapor content above Pico Veleta. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 101, 441-444. doi: 10.1086/132454

Rejkuba, M., et al. (2018). Should I stay, or should I go? Service and Visitor Mode at ESO's Paranal Observatory. *The Messenger*, 173, 2-6. doi: 10.18727/0722-6691/5090

Richardson, R. S. (1947). The 200-Inch mirror goes to Palomar Mountain. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 59, 310-313. doi: 10.1086/125974

Riddle, R. (2011). *The Thirty Meter Telescope Robotic Site Testing System for the TMT*. Recuperado de http://tfa.cfht.hawaii.edu/presentations/Riddle_tfa_3Mar2011.pdf

Rinehart, S. A., et al. (2014). The Balloon Experimental Twin Telescope for Infrared Interferometry (BETTII): An Experiment for High Angular Resolution in the Far-Infrared. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 126, 660-673. doi: 10.1086/677402

Rouel, J. (1974). New Electric Power Plant at La Silla. The Messenger, 1, 5-5.

Sales, N., et al. (1991). AROME, a balloon-borne instrument for astronomical near infrared spectrophotometry. *Experimental Astronomy*, 1, 1-26. doi: 10.1007/BF00396637

Sanduleak, N. (1967). Sky conditions at Cerro Tololo. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 79, 495-496. doi: 10.1086/128761

Sarazin, M. (2005). Site considerations for ELTs. In P. Whitelock, M. Dennefeld, & B. Leibundgut (Eds.), *Scientific Requirements for Extremely Large Telescopes, Proceedings IAU Symposium No.* 232 (pp. 34-39). doi: 10.1017/S174392130600024X

Sarazin, M. (1997). A Cloudy Night Again? Blame El Niño! A study of the impact of El Niño on the cloud cover above ESO Observatories in Chile. *The Messenger*, 90, 5-7. Recuperado de https://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.90-dec97/messenger-no90-5-7.pdf

Saunders, W., et al. (2009). Where Is the Best Site on Earth? Domes A, B, C, and F, and Ridges A and B. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 121, 976-992. doi: 10.1086/605780

Simons, D. G. M. (1958). Manned balloon capabilities for astronomical observations. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 70, 69-74. doi: 10.1086/127971

Slipher, V. M. (1927). The Lowell Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 39, 143-154. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/40692674

Steinbring, E., et al. (2010). First Assessment of Mountains on Northwestern Ellesmere Island, Nunavut, as Potential Astronomical Observing Sites. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 122, 1092-1108. doi: 10.1086/656285

Storey, J. W. V. (2012). Review of Antarctic astronomy. In M. G. Burton, X. Cui, & N. F. H. Tothill (Eds.), *Astrophysics from Antarctica, Proceedings IAU Symposium No. 288*.

Storey, J. W. V., Lawrence, J. S., & Ashley, M. C. B. (2007). Site-Testing in Antarctica. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias)*, 31, 25-29. doi: 10.1017/S095410200500297X

Struve, G. (1932). On the astronomical observing conditions at Lick Observatory on Mount Hamilton. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 44, 105-110. doi: 10.1086/124971

Tian, J. F., Deng, L. C., Zhang, X. B., Lu, X. M., Sun, J. J., Liu, Q. L., Zhou, Q., Yan, Z. Z., Xin, Y., & Wang, K. (2016). Optical Observing Conditions at Delingha Station. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 128(968), 105003. doi: 10.1088/1538-3873/128/968/105003

United States' Astronomical Expedition to Chile. (1849). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 9, 219-220. doi: 10.1093/mnras/9.9.219

Varela, A. M., et al. (2014). European Extremely Large Telescope Site Characterization III: Ground Meteorology. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 126, 412-431. doi: 10.1086/676135

Walker, M. F. (1970). The California site survey. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 82, 672-698. doi: 10.1086/128945

Weilenmann, U. (2012). Renewable Energy for the Paranal Observatory. *The Messenger*, 148, 39-41. Recuperado de https://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.148-jun12/messenger-no148-39-41.pdf

Whitford, A. E. (1956). The plan for a new American observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 68, 115-117. doi: 10.1086/126892

Woltjer, L. (1987). A Time for Change. The Messenger, 48, 1-2.

Woltjer, L. (2012). Reflections from Past Directors General. Three Threads through Time. *The Messenger*, 150, 3-6. Recuperado de https://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.150-dec12/messenger-no150-3-6.pdf

Worth, K. (2016). La guerra de los telescopios. Investigación y Ciencia, 34-39.

Wrenger, B., & Cuxart, J. (2017). Evening Transition by a River Sampled Using a Remotely Piloted Multicopter. *Boundary-Layer Meteorology*. doi:10.1007/s10546-017-0291-9

Xu, J., et al. (2016). The Effects of the Foldable Dome of KDUST on the Observation Based on CFD Method at Dome A. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 128, 125004. doi: 10.1088/1538-3873/128/970/125004

Yang, H., et al. (2009). The PLATO Dome A Site-Testing Observatory: Instrumentation and First Results. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 121(876), 174-184. doi: 10.1086/597547

Zeeuw, T., Tamai, R., & Liske, J. (2014). Constructing the E-ELT. *The Messenger*, 158, 3-6. Recuperado de https://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.158-dec14/messenger-no158-3-6.pdf

Zeeuw, T. (2016). Reaching New Heights in Astronomy — ESO Long Term Perspectives. *The Messenger*, 166, 2-27. Recuperado de

https://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.166-dec16/messenger-no166-2-27.pdf

APÉNDICE A

ENCUESTA SOBRE LAS CONDICIONES ASTROCLIMATICAS EN LOS OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS Y SU INCIDENCIA EN LOS RESULTADOS OBSERVACIONALES.

Muestra limitada a 12 respuestas de cuestionario sobre la ponderación de 1-10 de las variables climáticas astroclimaticas y logísticas de los observatorios astronómicos.

ENCUESTA PARA LOGISTICA (0-10)

Nubosidad nocturna % anual	8	9	9	8	8	10	10	10	9	8	8	8	8.75
Polución luminosa	10	8	9	10	9	10	10	8	10	7	7	7	8.75
Inversion termica noche	10	7	9	10	9	10	8	8	8	8	8	10	8.75
Topografia montaña	9	7	8	8	7	8	6	3	7	8	7	10	7.33
PWV (Agua Precipitable)	8	6	6	5	9	9	7	2	7	8	6	5	6.5
Altitud observatorio	10	6	8	7	8	10	6	5	8	9	7	5	7.42
Latitud/longitud	8	5	5	8	5	9	6	1	7	6	5	2	5.58
Logistica. Accesos, energia etc	9	6	4	5	3	10	5	3	5	6	5	3	5.33
													7.3
promedio individual	9	6.75	7.25	7.63	7.25	9.5	7.25	5	7.6	7.5	6.63	6.25	
desviación unitaria (Sesgo)	1.698	-	-	0.32	-	2.2	-0.1	-2.3	0.3	0.2	-	-1.1	
		0.55	0.05		0.05						0.68		

Los investigadores y astrónomos pertenecen a las siguientes instituciones astronómicas españolas:

Instituto de astrofísica de Canarias, Instituto de astrofísica de Andalucía, Observatorio de Calar alto, Universidad de alicante, Universidad de Valencia y Universidad de Barcelona. Esta encuesta se realizó entre 1985 y 1990.

La tabla 1 permite determinar con claridad, a pesar de lo pequeño de la muestra, que los astrónomos consideran muy relevantes los efectos de la nubosidad nocturna, la contaminación lumínica y las inversiones térmicas sobre nel observatorio. La media de estas variables se situó en 8.75 puntos sobre 10.

Promedio

Las condiciones topográficas de la montaña, el agua precipitable y la altitud del observatorio se ponderaron en un nivel intermedio alto en torno a 6.5-7.4 sobre 10.

Finalmente, las condicionantes de tipo de situación geográfica y las diversas situaciones logísticas se ponderaron relativamente a la baja con puntuaciones en torno a 5 sobre 10.

Atendiendo a los promedios de cada investigador vemos un amplio recorrido entre un mínimo de 5 y un máximo de 9 sobre 10. El sesgo también es amplio con desviaciones desde 1.7 a -2.3 puntos.

Las variables consideradas en esta encuesta están referidas a varias de las más importantes estudiadas en esta tesis. La muestra se realizó sobre 8 variables, mostrando como las consideradas de mayor peso, con puntuación en torno a 8.75 puntos sobre diez, muestran una mayor consistencia muestral, con menor desviación en el +/- sigma (cajas), respecto a la de peso intermedio, en torno a un valor de 7 puntos y aquellas de baja puntuación, en torno a 5-6 puntos sobre diez, que muestran mayor recorrido en las respuestas y una sigma mayor.

Curiosamente la variable logística está muy poco considerada, como factor o variable de peso, por la comunidad de astrónomos consultados, lo que a nuestro juicio puede ser un error de apreciación grave, pues la realidad ha demostrado que la logística tiene tanto peso o más que muchas variables consideradas aquí a las que se asigna consensualmente mucho mayor peso. Esta encuesta, aun limitada da valiosa información acerca de las preocupaciones de los astrónomos en sus observaciones en el universo de las condicionantes astroclimaticas y logísticas.



Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO VII

CAMBIO CLIMÁTICO Y OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS

RESUMEN

En el presente capítulo se realiza un análisis de las dinámicas térmicas donde existen observatorios astronómicos importantes a escala global. Partiendo de una revisión histórico-geográfica inicial, sobre la situación climática de estas áreas, se recurre, a continuación, a técnicas que involucran la elaboración de mapas temáticos de cambio climático, partiendo de bases de datos bien consolidadas, con aportaciones de los últimos 70 años, procedentes de ERA 5 (ECWMF) y otras fuentes "in situ" (procedentes de observaciones meteorológicas), con una larga línea de base temporal. Se incluye de manera especial un estudio de casos, donde, de manera pormenorizada, se estudian algunas características de los observatorios de la península Ibérica y Canarias. La técnica consistió en aplicar análisis tendenciales, considerando los promedios decadales de los años 1950-1959 y 2010-2019 en el caso de ERA 5. La información del ERA 5 se muestra a partir del uso de cartografía para grandes ámbitos regionales del planeta. Estos mapas son generados con herramientas GIS-QGIS. Estos mapas regionales han aportado claras evidencias de que, en efecto, se ha producido un notable incremento de las temperaturas medias en las zonas donde se ubican los principales observatorios astronómicos.

1 OBJETIVOS

El objetivo general del presente capítulo se vincula con aportar referencias y análisis sobre el cambio climático y si el hombre tiene o no una incidencia significativa.

Por ello, entre los objetivos específicos figuran:

Realizar una amplia revisión histórica con conexión con el tópico discutido en este capítulo, limitado a los registros climáticos que más inciden en la observación astronómica. Otro de los objetivos específicos es evaluar a escala planetaria, cual ha sido el cambio de la variable de temperatura, de las medias de las máximas y mínimas, en un contexto temporal multidecadal, señalando, además, algunas anomalías puntuales.

También entre los objetivos específicos figura el analizar la evolución de la temperatura en algunos de los observatorios astronómicos radicados en la península Ibérica y Canarias.

2 INTRODUCCIÓN

Como quiera que sobre "cambio climático" se han vertido ríos de tinta, nosotros solo podemos dar algunas pinceladas al tema, y siempre en un contexto que se refiera a las condiciones cambiantes del clima en los observatorios astronómicos desde que se tienen registros, y en épocas anteriores mediante modelizaciones y tendencias, tanto hacia el pasado como hacia el futuro. La discusión sobre el cambio climático está a menudo muy influenciada por la retórica de las partes enfrentadas (Hewitson et al. (2017). "Tanto los científicos como los encargados de la formulación de políticas piden con frecuencia la eliminación de la retórica de los debates sobre la ciencia del clima. Estas llamadas delatan algunos malentendidos, fundamentales sobre el arte de la retórica, de 2500 años de antigüedad. Una vez que estos se disipan, se hace evidente que lo que necesitamos para un debate eficaz entre el clima y la ciencia es más sensibilidad hacia el marco político dentro del cual se desarrolla cada debate, y cómo ese marco da forma a la deliberación. Una mayor conciencia de los valores y supuestos no declarados que respaldan las declaraciones hechas por todas las partes. También se necesitan más formas de vincular el clima con la vida cotidiana, los valores y las decisiones de las partes interesadas"

Las conclusiones de los distintos informes del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), auspiciado por la Naciones Unidas, no dejan lugar a dudas acerca del progresivo calentamiento de la atmósfera y los océanos terrestres, o el aumento de sequias de ciertas áreas. Ciertamente, señalan un futuro preocupante en los peores escenarios de las modelizaciones utilizadas. No todas las regiones se van a ver afectadas con la misma intensidad, pero en nuestro caso, la especial ubicación de los observatorios astronómicos, casi siempre a gran altitud, y ya de por sí, con climas muy extremos, no parece añadir, en principio, motivo de especial preocupación, dado que las variables astroclimaticas más determinantes de dicho cambio climático no

influyen apenas en la estadística anual del potencial climático-astronómico en los observatorios, como no sea, en todo caso, favoreciendo la situación observacional, al preverse menor nubosidad. Las demás variables astroclimáticas tienen poca variación, aún en escenarios de cambio climático muy pesimistas. Quizá el PWV, o la altura de la capa límite planetaria, puedan sufrir un ligero incremento estadístico, pero no de manera tan drástica como para poder arruinar las condiciones de observación.

Debemos indicar que las observaciones "in situ" permiten un posterior reanálisis, de acuerdo con los modelos climáticos y las proyecciones futuras, o tendencias de las variables climáticas estudiadas. Esto posibilita, a su vez, afianzar la confianza en los modelos climáticos al uso, como los del IPCC.

Queremos subrayar que es importante, para los observatorios astronómicos, archivar observaciones realizadas en superficie que se caractericen por su continuidad temporal y calidad y homogenidad. Así será posible no solo analizar el clima pasado sino también el del futuro, dentro del margen de error de los modelos climáticos. Hemos constatado que, muy pocos observatorios mantienen observaciones continuas y estandarizadas, y que sean accesibles fácilmente a través de internet. Como ejemplo IPCC informes del la podemos consultar los en web: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC AR6 WG1 SPM Spanish. pdf.

Podemos resumir indicando que las escalas temporales compatibles al cambio climático son medidas por siglos, cuando no por milenios, por cuestiones que tienen que ver con parámetros orbitales de la Tierra, y que son muy superiores a las de la vida útil de un observatorio, que podemos cifrar en unos 50 años.

Debemos señalar que la mayoría de los modelos climáticos, en especial los que presentan tendencias futuras, están sujetos a muchas incertidumbres (Haslebacher et al., 2022). Por tanto, un escenario preciso de las condiciones a 50 años vista de un observatorio concreto es, actualmente, poco realista, pues a la incertidumbre regional, se une otra más de carácter estrictamente local. Estas consideraciones pueden seguirse también en los informes del Grupo de trabajo I del IPCC: IPCC (Cambio Climático: Bases Físicas GUÍA RESUMIDA DEL QUINTO INFORME DE EVALUACIÓN DEL IPCC GRUPO DE TRABAJO I), disponible en:https://www.miteco.gob.es/.../cambio-climaticobases-fisicas.aspx. Para el 6º informe del IPCC, podemos seguir lo expuesto por el I trabaio Grupo de en: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish. pdf.

2.1 NUESTRA MODESTA APORTACIÓN A UN PROBLEMA COMPLEJO

Este capítulo versa sobre uno de los temas más controvertidos de nuestro siglo. Se trata de determinar si el hombre tiene o no una incidencia significativa en el cambio climático observado. Modestamente, no estamos en condiciones de hacer grandes aportaciones, y estas, solo en nuestro campo, limitadas a los registros climáticos que más inciden en la observación astronómica. En nuestra opinión, sí hay cambio climático, y no menor en varios parámetros, como temperatura o nubosidad, pero, hasta donde nosotros podemos deducir, el efecto es principalmente natural, quedando abierta la hipótesis de que el hombre puede contribuir con un porcentaje indeterminado y variable a este efecto.

3 FUENTES Y METODOLOGÍA

Nuestra metodología se resume en la figura 137. Partiendo de un contexto histórico-geográfico, se aborda un examen de la literatura, que pudiese aportar datos y métodos, para elaborar nuestra propuesta para acercarnos al problema del calentamiento global, en los observatorios astronómicos de las más diversas regiones del mundo. Las series particulares, tomadas en los propios observatorios, a menudo adolecen de falta de calibración cruzada con estaciones de la red nacional meteorológica, también suelen ser series cortas (diez años o menos), claramente insuficientes, para abordar el problema de incremento de temperatura o los cambios en la nubosidad o precipitación a largo plazo.



Figura 137. Organigrama de flujo de información en el apartado de cambio climático

La información extractada de la literatura nos conduce a unos supuestos que nosotros modelizamos, en forma de mapas regionales, donde existen importantes conglomerados de observatorios astronómicos. Bases de datos sistemáticas, ya reprocesadas, como las de ERA 5 son de gran utilidad. Se han utilizado también las series largas de meteorología del observatorio de Calar Alto (Almería) y de Izaña (Tenerife). Nosotros nos centraremos en el estudio de los incrementos de temperatura, dejando al margen el estudio de la variación de precipitaciones. Esto nos permite elaborar modelos de representación propios, generando mapas de temperatura media, gráficos u otros pertinentes. Se incluye estudios de casos de observatorios astronómicos, muy particularizados, con la idea de reforzar y comprobar la validez de nuestros supuestos modélicos, que no son otros que el supuesto cambio hacia el aumento de temperaturas. Nosotros hemos preferido utilizar las medias decadales. El supuesto de que la década inicial ha de ser más fría que la final, es lo que nos lleva a presentar mapas de diferencias térmicas entre la temperatura media decadal inicial y final. Los mapas y gráficos generados son sometidos a un criterio de aceptación, que llevan a reciclar la información en caso de discrepancias. Finalmente aceptados, todo el flujo se sintetiza en un documento final con conclusiones, principalmente en lo relativo a los cambios de temperatura que se hayan podido constatar, tanto en los mapas como en los gráficos.

Fuente: Elaboración propia.

4 UN BREVE RECORRIDO HISTÓRICO GEOGRÁFICO

4.1 LOS PRECURSORES

Uno de los primeros astrónomos en señalar la posible incidencia del CO₂ en el calentamiento atmosférico fue S. Arhenius a finales del siglo XIX. Este autor señaló la conexión entre épocas glaciales y cálidas en el pasado de la Tierra, y el aumento de temperatura provocada por la concentración del citado gas en la atmósfera.

McAdie, en 1911, ya nos informa sobre los mecanismos radiativos del Sol y la intercepción de dicha radiación por la atmósfera de la Tierra. Revela, también, como la especial disposición de esta atmósfera, y sus gases constituyentes, regulan una suerte de rangos de temperatura, que hacen posible la vida.

Hacia 1932, Nicholson, desde el observatorio de Monte Wilson, perteneciente a la Institución Carnegie, discute los posibles efectos del ciclo solar de 11 años en el cambio climático. Concretamente analiza la posible relación entre la variación de la radiación solar y la temperatura media. Este ciclo fue descrito por primera vez por Rudolf Wolf en 1847.

A pesar de lo espectacular del cambio del ciclo solar, en cuanto al número y extensión de las manchas en su superficie, lo cierto es que, el cambio, en cuanto a la cantidad de radiación recibida por la Tierra, varía muy poco. Su correlación con el tiempo meteorológico, y el clima a largo plazo, es, por tanto, muy cuestionable, pues la indeterminación de las correlaciones entre precipitaciones y temperaturas, con el ciclo solar, es muy baja o baja. De hecho, Nicholson concluye que las conexiones entre el ciclo solar y el tiempo son muy difíciles de establecer; y que las predicciones del tiempo a futuro, basadas en las manchas solares, no tienen apenas valor práctico.

Williams Herschel dijo, en 1801, que para averiguar el clima pasado había que mirar más bien el precio del trigo que las manchas solares y, por lo que sabemos hoy en día, la situación no ha mejorado apenas, si solo consideramos la aproximación por las manchas solares.

4.2 TRABAJOS RECIENTES Y EFECTOS ANTROPOGÉNICOS

En tiempos mucho más recientes, Martin-Vide y Bustins (2006) tratan de correlacionar un índice del Mediterráneo occidental, con acrónimo (WeMO), con aquel otro más conocido, que es el de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO). Estos autores encuentran que el índice NAO se correlaciona pobremente con las precipitaciones otoñales e invernales en la zona mediterránea de la península Ibérica, siendo WeMO más adecuado. También con este índice es posible llegar a prevenir posibles episodios de lluvias torrenciales, de nefastas consecuencias en toda la región. Aunque de utilidad relativa, este índice puede llegar a ser provechoso en la caracterización de los observatorios astronómicos de la península Ibérica y el sur de Francia.

Desde una perspectiva milenaria y a escala planetaria, Alley et al. (1999) exponen los efectos del aumento de la radiación solar en la deglaciación del hemisferio norte en los últimos miles de años, con el consiguiente aumento de temperatura media y ascenso del nivel del mar. Se exponen los diferentes mecanismos de realimentación en el transporte de energía a gran escala. Estos autores parten de testigos de hielo recogidos en distintos lugares, con glaciares permanentes, en el hemisferio norte. Estos testigos de hielo proporcionan uno de los más valiosos registros de la temperatura del planeta en los últimos cientos de miles de años, siendo las variaciones muy superiores en magnitud a las que estamos considerando actualmente, en lo que se ha dado en denominar "Cambio Climático", que se refiere, casi siempre, a la etapa con registros instrumentales fiables, y que podemos cifrar que va desde 1850 a la actualidad; es decir, poco más de un siglo.

New et al. (2000) reconstruyen el clima terrestre mediante mapas ráster, con un píxel de 0.58° de lado. Se estudian múltiples variables climáticas, entre ellas temperatura, precipitación y heladas al nivel del suelo, en el periodo 1901/1996. También presentan una serie de mapas con las anomalías climáticas observadas en este largo periodo.

Maechel et al. (1998) estudian las posiciones y características de los centros de acción sobre el Atlántico desde 1881, encontrando oscilaciones anuales y otras no periódicas, que tienden a desdibujar las tendencias a largo plazo de las distintas variables climáticas. Los autores concluyen que las variaciones a largo plazo, de las características de la circulación atmosférica, son muy difíciles de atribuir a un efecto causado por el hombre a través de los gases de efecto invernadero, emitidos en la época industrial.

Un autor que realiza un estudio sobre una larga serie de precipitaciones, en la península Ibérica, en los últimos 500 años, es Rodrigo (2008). Este investigador

encuentra que hay largos periodos secos, así como húmedos, al tiempo que se discute su posible relación con el índice NAO, y con el número de manchas solares, durante el mínimo de Maunder. Los resultados parecen indicar que las oscilaciones actuales no son significativamente diferentes de las del pasado; con lo que nosotros podemos concluir que la estabilidad secular, en el promedio de precipitaciones, es bastante constante en la región.

La importancia del forzamiento radiativo natural en los climas de los últimos 2000 años es expuesta por Duncan et al. (2008). Señalan que este forzamiento viene determinado por la presencia y potencia de los ciclos ENSO (El Niño) y NAO (Oscilación del Atlántico Norte). Respecto a la anómala tendencia al aumento de temperatura del hemisferio norte en la segunda mitad del siglo XX, concluye que solo puede explicarse mediante un forzamiento antropogénico.

Sobre la base de las temperaturas medias, máximas y mínimas, sobre la meseta del Tíbet, You et al. (2016) examinan el calentamiento de la misma en los últimos decenios. Sus resultados muestran una tendencia creciente, especialmente desde 1980. Los modelos climáticos, y las observaciones en tierra, mostraron un grado de correlación aceptable, con un r>0.5.

Como ejemplo de detección de cambios climáticos, obtenidos mediante testigos, podemos citar el trabajo de Schittek et al. (2016). Los autores usaron las turberas de la Puna, del NW de Argentina, situadas a gran altitud, próximas al llano Chajnantor, lugar de excelencia astronómica en la actualidad. Estos autores encuentran que en los últimos 2100 años se han producido cambios notables en el clima local, debido al probable desplazamiento de la zona de convergencia intertropical, resultando evidente una serie de periodos multidecadales o aún seculares, con predominio de condiciones húmedas o secas. Los registros de turberas son útiles para estudiar cambios climáticos de origen natural, aunque, en los últimos siglos la actividad humana puede tener un notable impacto en su composición, alterando los resultados naturales.

Utilizando la técnica de crecimiento de anillos de los árboles, Fenbiao et al. (2002) examinan la precipitación de la estación fría en el SW de EE. UU., durante los últimos 1000 años. Se encontraron periodos húmedos en la década de 1330 DC. y principios del siglo XX. Las sequías más acusadas se muestran en torno a 1500 DC y en la década de 1950. Los cambios repentinos de seco a húmedo no eran infrecuentes a través del milenio, tal como ocurrió alrededor de 1600 y 1900. Por tanto, los cambios ostensibles en las precipitaciones pueden variar en pocas décadas, pero pueden estar espaciados cientos de años.

4.3 MODELIZACIONES CLIMÁTICAS

Brewer et al. (2000) estudian, mediante complejas simulaciones informáticas, los registros reales de precipitaciones y las sequías en la región Mediterránea, en los últimos 500 años. Los resultados mostraron que ningún modelo simulaba exactamente los cambios reconstruidos sobre las medidas reales, pero todas las simulaciones mostraron una mejora, con respecto al uso del clima promedio como referente. Se encontró una buena coincidencia después de 1650 con un modelo que tuvo en cuenta los cambios en el forzamiento por el vulcanismo, la irradiancia solar y el efecto de los gases de efecto invernadero.

Terink et al. (2013) nos presentan el estudio y los resultados del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, sobre la tendencia en la precipitación, en el norte de África y Oriente Medio, para las próximas décadas. La región de Oriente Medio y Norte de África (MENA) puede ser considerada como la zona donde el agua escasea más a nivel mundial. En períodos futuros, la suma anual de precipitaciones disminuirá para la mayoría de los países, con disminuciones de 15-20%, para el último período (2040-2050), aunque, para algunos países al sur de la península Arábiga, se encontró un aumento de las precipitaciones, de hasta un 20%. El análisis espacial mostró que las mayores disminuciones de precipitación se encuentran en el sur de Egipto, Marruecos, el centro y la costa de Argelia, Túnez, el centro de Libia, Siria y el centro y este de Irán. Un estudio de caso para Marruecos reveló que el déficit potencial de agua, que ya es evidente para el clima actual, se hace aún mayor para el clima futuro (Terink et al., 2013).

Gil et al. (2018), a través de una serie de modelos climáticos, proyectan varios escenarios futuros, acerca de la radiación solar sobre la península Ibérica. Parten de la base estadística acumulada por las observaciones de las últimas décadas. Las proyecciones apuntan a un incremento general de la radiación solar peninsular en las próximas décadas, si lo comparamos con el periodo 1981-2000, como periodo normal. El análisis está orientado a encontrar los lugares de la península con menor variabilidad de la radiación solar, con vistas a optimizar el emplazamiento de plantas de energías alternativas y asegurar su funcionamiento estable.

4.4 LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE ORIGEN NATURAL

En el "National Research Council 1995. Natural Climate Variability on Decadeto-Century Time Scales" se evidencia la complejidad y la dificultad de homogeneizar series de datos climáticos, sobre todo cuando son anteriores a la época instrumental (mediados del siglo XIX), y sobre regiones o épocas de las que solo se dispone de aproximaciones (proxy data), que tienen un laborioso proceso de calibrado, y unas incertidumbres altas. Entre los métodos más estudiados están los anillos de crecimiento de los árboles, el análisis de sedimentos lacustres o marinos y los testigos de hielo glaciar. Todos ellos han evidenciado un progresivo calentamiento atmosférico desde la época preindustrial hasta nuestros días.

Se señala que es necesario estudiar las envolventes de la variación a largo plazo, desde décadas a siglos, para limar el ruido intrínseco de las variables climáticas, en este caso la temperatura del aire y del agua del mar.

Todo el conjunto planetario parece mostrar este calentamiento, particularmente el Ártico y el hemisferio norte, donde se observan fenómenos climáticos de aumento de intensidad de los episodios extremos, no quedando claro si son más o menos frecuentes que en tiempos pasados de los cuales no se disponen de registros instrumentales.

Katie Thomas (2014), en una monografía sobre el calentamiento de las latitudes árticas, nos presenta una serie de hipótesis, observaciones y conclusiones, sobre este importante efecto climático. El calentamiento del Ártico, y la disminución del espesor del hielo en el mismo, han experimentado grandes cambios, y es objeto de debate, por las conexiones de este efecto con las condiciones climatológicas de las latitudes medias, gobernadas, en buena medida, por la potencia y situación del "Jet Stream" (corriente en chorro). Los distintos participantes del congreso mostraron una situación en la que se evidencia la infancia de las investigaciones climáticas, sobre un sujeto tan extenso y difuso, siendo aventurado emitir conclusiones al respecto, dado que los modelos climáticos, las observaciones y las proyecciones futuras están aún en curso.

Igualmente, Colose et al. (2016) presentan un estudio sobre las composiciones isotópicas de sedimentos en América del sur, para el último milenio. Estos autores encuentran que dichos isótopos pueden indicar las tendencias en la circulación atmosférica, sobre todo aquellas que coinciden con grandes erupciones volcánicas en la región.

Otro ejemplo de utilización de composición de sedimentos lo encontramos en la investigación de Egerer et al. (2016), sobre la conexión entre los sedimentos marinos próximos y los cambios en el paisaje del desierto del Sáhara en el periodo Holoceno. Estos autores tratan de reconstruir los ciclos de emisión y deposición del polvo del desierto, llegando a algunas conclusiones interesantes:

"Los registros de sedimentos marinos revelan un aumento abrupto y fuerte en la deposición de polvo en el Atlántico norte al final del período húmedo africano, hace aproximadamente 4.9 a 5.5 ka. (miles de años). El cambio en el flujo de polvo se ha atribuido a la variación de la superficie terrestre sahariana. Alternativamente, la mayor

acumulación de polvo está relacionada con el aumento de los vientos superficiales y la consiguiente intensificación de la surgencia costera y que los flujos de deposición de polvo del Holoceno medio en el Atlántico Norte fueron de dos a tres veces menores en comparación con los flujos preindustriales. Identificamos las características de la superficie terrestre sahariana como el principal control del transporte de polvo desde el norte de África hasta el Atlántico norte. Llegamos a la conclusión de que el aumento de la acumulación de polvo en los núcleos marinos está directamente relacionado con una transición del paisaje sahariano durante el Holoceno" (Egerer et al., 2016)

Turner et al. (2006) también muestran que las retroalimentaciones debidas a cambios naturales y efectos antropogénicos son especialmente fuertes y mal entendidas en latitudes muy altas, como la de la Antártida y el Ártico. Por ello la modelización a escala regional es algo que debe ser mejor estudiado.

El impacto social de los cambios del clima actuales es resumido por Hay et al. (2016). Según estos autores se debe cuidar el tipo de medidas y la concienciación pública, por parte de los responsables de las mismas. Todo ello es importante, por la necesidad de concienciar a la población sobre los riesgos de los climas extremos, que pueden variar espacial y temporalmente en escalas muy grandes. Estos conocimientos aumentan la capacidad de gestionar los riesgos asociados a estos eventos y, por lo tanto, reducen las consecuencias que la sociedad podría sufrir, si las autoridades actúan de forma correcta.

Diodato et al. (2018), en un trabajo histórico-climático, presentan las condiciones cambiantes del clima en la región del mediterráneo central. Ello en base a una extensa recopilación de datos de referencias escritas acerca de las nevadas, desde el año 800 a 2017. Los registros sugieren que el actual decaimiento de las nevadas en la región no tiene precedentes, ni tan siquiera en el anómalo periodo cálido de la Edad Media, entre 800-1300 aproximadamente. Durante la Pequeña Edad de Hielo (1300-1860) el clima se puede asociar preferentemente con una tendencia del índice del atlántico Norte o NAO, hacia valores negativos. Para este contexto histórico-climático, a medio y largo plazo, es evidente una mejoría temporal en las condiciones de nubosidad y disminución de nevadas en el área mediterránea, donde existen un buen número de observatorios astronómicos y radioastronómicos.

Gómez-Navarro et al. (2015), en un estudio regional sobre Europa, reconstruyen las condiciones de temperatura y precipitaciones entre 1500 y 1990, dividiendo el espacio en nueve subregiones climáticas. Estas reconstrucciones se comparan con modelos climáticos. El acuerdo entre reconstrucciones y modelos es aceptable, pero los modelos parecen tener más problemas, en caso de considerar situaciones climáticas extremas.
Una región de enorme interés astronómico es el norte de Chile, para la cual Meseguer-Ruiz et al. (2019) encuentran como es uno de los lugares más secos del mundo, y que el periodo de precipitaciones es muy breve y escaso, ocurriendo en las altas cumbres entre diciembre y marzo.

La variabilidad de las precipitaciones es muy grande sobre esta región, y los autores tratan de aplicar índices de variabilidad de las precipitaciones, como los propuestos por Martin-Vide en 2004, al que denominaron índice CI, o Índice de Concentración, para normalizar los resultados de observaciones, en diferentes lugares del mundo. Este trabajo nos sirve como referente a nuestro propósito para señalar que, aún en las áreas más áridas del mundo, si existen elevaciones importantes, donde están localizados los observatorios normalmente, estas crearán un clima algo más húmedo y, por tanto, nuboso, que el territorio a su alrededor, que en este caso es totalmente árido.

En el caso de cambios en la cobertera nubosa ocasionados por el aumento de temperatura, Hentgen et al. (2019), utilizando modelos de proyección de la nubosidad, "cloud cover" sobre Europa, encuentran, entre otros resultados, que, a largo plazo (2079-2088), es probable un escenario de aumento de temperatura y con aumento de emisión de gases de efecto invernadero. Este escenario presentaría una disminución de las nubes bajas y medias, y un aumento de las nubes altas, sobre el centro del continente, si bien con diferencias entre regiones, pues, en la zona sur de Europa se aprecian pocos cambios respecto al presente.

Esto nos sugiere que la evolución del "cloud cover" a largo plazo, sobre los observatorios de Europa continental, no parece amenzar las condiciones de observación actuales; si bien las condiciones locales pueden variar en cada caso.

El estudio sugiere un aumento de la radiación a lo largo del periodo, y una disminución del "cloud cover" sobre Sudáfrica. El fenómeno de aumento tendencial de radiación y disminución de cloud cover es particularmente notable entre los paralelos 20° y 30° Sur.

Esta zona del continente es especialmente apropiada para observaciones astronómicas, cuando se requiera un posicionamiento en el hemisferio sur, y una longitud geográfica equidistante con Sudamérica y Australia, pues es una zona de la tierra con pocas masas de tierra emergida. El desierto costero de Namibia, y las áridas y extensas mesetas del interior del continente de estas latitudes, son un lugar óptimo para la instalación de infraestructuras astronómicas que requieran mucho tiempo claro, aunque las elevaciones apenas sobrepasen los 1000-1600 metros.

Un ejemplo novedoso donde se enfatiza la importancia de disponer de lugares con clima benigno y poco nuboso es el proyecto radioastronómico del SKA (Square Kilometre Array). Enclavado en Sudáfrica y Australia, dispondrá de un enorme conjunto de radiotelescopios, que sumaran una superficie de 1 Km². Con este conjunto de instrumentos será posible observar el cielo en longitudes de onda de radio, con la intención de caracterizar los núcleos activos de las galaxias y la detección de planetas extrasolares, hasta varios miles de años luz de distancia.

Egli et al. (2017) nos dan una visión de la evolución de la nubosidad de tipo bajo constituida por nieblas y estratos sobre Europa (FLS), correspondientes al periodo 2006-2015, y considerando las imágenes del Meteosat Segunda Generación (MSG) como base de estudio. Este satélite posee la ventaja de tener un intervalo de solo 15 minutos entre imágenes consecutivas. Como hecho más significativo, para nuestro estudio, cabe señalar como las tendencias de disminución de este tipo de nubosidad se dan con preferencia en invierno, en amplias zonas del continente europeo, parte central, costas del norte y zonas del SE. Siendo más indeterminada la evolución en otras estaciones del año. Este tipo de nubosidad obedece claramente a un gradiente latitudinal determinado por ajuste lineal entre latitud y estaciones de muestreo, con un $R^2 = 0.53$ y gradiente de 0.29 horas por grado de latitud. Los datos de las estaciones provienen del METAR (Meteorológical Aviation Routine).

4.5 ESTUDIOS SOBRE RADIACIÓN SOLAR

De entre los numerosos estudios sobre radiación solar podemos citar al de Wild et al. (2012; 2015; 2018). Estos autores estudian la intensidad de la radiación sobre Europa, en términos de potencia fotoeléctrica, para una larga serie de datos, tomados en Potsdam, Alemania, entre 1937 y 2014.

Los gráficos presentados por estos autores parecen mostrar tendencias a muy largo plazo, de 30 años o más. Sus resultados muestran claramente un cambio de tendencia de intensidad en torno a 1971, donde se pasó de un continuo disminuir ("dimming") a un continuo aumento de la radiación ("brightening").

Según una media de 40 modelos climáticos, usados por el IPCC, las áreas donde se proyecta mayor subida de la irradiación solar son la cuenca mediterránea y el este de China. Atribuyéndose estos cambios a efectos de los gases de efecto invernadero y a la emisión de aerosoles, jugando la variación verdadera de la radiación solar en la cima de la atmósfera un papel minoritario. Por el contrario, las áreas en altas latitudes, en ambos hemisferios, verían disminuir la radiación solar, con aumento progresivo de la nubosidad. En concreto, esta dinámica parece estar de acuerdo con una tendencia a largo plazo de disminución de la nubosidad en el área del Mediterráneo, con subida de temperaturas y aumento de los días soleados. Un amplio estudio sobre tendencia de la radiación de onda corta (SSR) sobre Europa continental es el presentado por Sánchez-Lorenzo et al. (2015). Este estudio abarca numerosas estaciones meteorológicas, con datos desde 1939 a 2012. Se encontró que, en promedio, para todas las estaciones la oscilación interdecadal puede variar tanto como en 6 W/m². De los gráficos presentados, parece deducirse un periodo de ~30 años superpuesto a otro, más definido y de mayor potencia, de ~60 años. Pero la larga periodicidad de estos ciclos, sobre la base total de 70 años, no permite determinar la verdadera consistencia de estos periodos interdecadales. A largo plazo no parecen mostrarse tendencias significativas en el cómputo de la radiación global.

De igual forma, se observa como el periodo primaveral es el que parece mostrar un mayor incremento, al menos desde 1980, aproximadamente en casi todas las series, seguida del otoño. Sin embargo, en verano e invierno no se aprecian grandes cambios. Todo esto parece sugerir, en todo caso, un alargamiento del verano boreal, en cuanto a cantidad de radiación recibida promedio, lo cual permite, en cierta manera, extrapolar que también el "total cloud cover" puede haber disminuido de manera significativa, como ha quedado evidenciado por nosotros, en una serie de nubosidad de 45 años, para el caso de la Sierra de los Filabres, Almería (España) (Moreno-Quesada y Martínez-Ibarra, 2018). En la misma se aprecia una tendencia significativa a la baja de la nubosidad total y estacional, principalmente en primavera. Esta tendencia fue deducida por nosotros a partir de las noches claras y los días despejados de la estación meteorológica del observatorio de Calar Alto. Todo ello se cotejó, además, desde 2000-2017, con imágenes de alta resolución, de los satélites Terra y Aqua (MODIS), para el periodo citado (Moreno-Quesada y Martínez-Ibarra, 2018).

Podemos deducir, por lo expuesto arriba, que el incremento de la radiación y el "Total Cloud Cover" (TCC) deben ser simétricos y opuestos, en buena medida, por lo que un aumento de la radiación solar debe de implicar un menor TCC.

5 ANÁLISIS REGIONALES Y LOCALES EN EL ENTORNO DE LOS OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS MÁS IMPORTANTES

5.1 CAMBIOS DETECTADOS EN TEMPERATURA A PARTIR DE DATOS DE ERA 5

Como se observa en la figura 138 aparece un incremento térmico mundial de los valores máximos medios absolutos en los últimos 70 años de 1.3 °C. Además existen dos años anormalmente anómalos, que son 1964 y 1966. La causa de este "bump" debería investigarse, pues nunca ha vuelto a alcanzarse en la base de datos de ERA 5. Es curioso que este máximo ocurre un solo año, después de la gran erupción del volcán

Agung en Asia. Un análisis de regresión de grado 4 no mostró periodos de modulación de importancia o significativos, más allá de una insinuación de largo periodo de 30 años o más.



Figura 138. Evolución de las temperaturas máximas absolutas medias para el conjunto del planeta

En la figura 139 aparece la evolución de las temperaturas mínimas absolutas para el conjunto del planeta. Los datos reflejan su valor medio anual. En la figura se observan unas temperaturas acordes a un calentamiento gradual, con un incremento global de 2.4 grados. El mínimo absoluto anual, del año 1960, debería ser investigado más en profundidad.

Un análisis de regresión grado 4 muestra un efecto modulador, con periodo del orden de 40 años. Este efecto, debido a su longitud temporal, es difícil de estudiar por mínimos cuadrados y sólo series largas, de más de un siglo, podrían permitir su determinación con mayor seguridad. Se puede observar que la evolución global de las mínimas absolutas ha sufrido un incremento mayor que el de las máximas.



Figura 139. Evolución de las temperaturas mínimas absolutas medias para el conjunto del planeta

Fuente: ERA 5 (ECWMF). Elaboración propia.

5.2 LA REGIÓN DEL MEDITERRÁNEO Y NORTE DE ÁFRICA

En la figura 140 aparece el diferencial de temperatura media entre las décadas de 1950-1959 y 2010-2019 sobre la región mediterránea, norte de África y Atlántico oriental. Es posible observar un mayor incremento en el interior de las masas emergidas, efecto asociable a la continentalidad y a la presencia de grandes cordilleras. Estos máximos de incremento diferencial de temperatura vienen a coincidir cerca de los lugares donde se hallan ubicados los observatorios astronómicos más importantes de la actualidad. Se observa que sobre los océanos se han determinado incrementos mucho menores que sobre los continentes.



Figura 140. Diferenciales de temperatura media en la región del mediterráneo y norte de África interdecadales (1950/1959) y (2010/2019)

Fuente: ERA 5 (ECWMF). Elaboración propia.

5.3 LA REGIÓN DEL NORTE CHILE-ARGENTINA

En la figura 141 mostramos el diferencial de temperatura media °C, entre las décadas de 1950-1959 y 2010-2019, sobre la región del norte de Chile, norte de Argentina y el altiplano boliviano. Se observa un moderado incremento, de alrededor de 0.5°C, en la zona de los observatorios del VLT y ELT. Este diferencial es algo mayor en la región del Chajnantor (ALMA), con 1.5°C, y en la cordillera de los volcanes, entre Chile y Argentina. Se observa un descenso de las temperaturas medias decadales, de alrededor de 0.5°C, en la latitud de los 28° a 30° Sur. En esta zona se encuentran observatorios de primer nivel, como son La Silla, Las Campanas y cerro Tololo, en la zona costera del centro de Chile. Existe un mayor incremento en el interior de la masa continental, muy elevada de los Andes y el Altiplano. Efecto asociable a la presencia de grandes cordilleras. Estos máximos de incremento diferencial de temperatura están relativamente alejados de los actuales emplazamientos de los grandes observatorios de la región, no incidiendo de manera especial en su funcionamiento.



Figura 141. Diferenciales de temperatura media interdecadales (1950/1959) y (2010/2019)

Fuente: ERA 5 (ECWMF). Elaboración propia.

5.4 LA REGIÓN DEL SW DE EE. UU.

En la figura 142 aparece el diferencial de temperatura media (°C), entre las décadas de 1950-1959 y 2010-2019, sobre la región del SW de EE. UU. Se observa un moderado incremento, de alrededor de 0.5°C, en la zona de S. Pedro Mártir, en la baja California (México), y un incremento del orden de 1.5°C, en los observatorios de Kitt-Peak y M. Graham, en Arizona, siendo éste del orden de 1°C en Sunspot (Nuevo México), y de poco más de 1°C en monte Palomar (California). En un contexto mundial, estos incrementos están en orden con la media registrada en gran parte de la zona templada norte del planeta. No se han observado efectos adversos por este incremento de temperatura en los observatorios citados. Como en las restantes regiones consideradas en este estudio, la continentalidad parece jugar un papel clave en el incremento de temperatura interdecadal.



Figura 142. Diferenciales de temperatura interdecadales (1950/1959) y (2010/2019)

Fuente: ERA 5 (ECWMF). Elaboración propia.

5.5 LA REGIÓN DEL TÍBET

En la figura 143 podemos apreciar los cambios notables en el diferencial de temperatura media (°C), entre las décadas de 1950-1959 y 2010-2019, sobre la región del Tíbet, entre India y China. Se observa un gran incremento, de unos 3°C, en los observatorios modernos de la región. Dada la altitud de estos observatorios, en torno a los 5000 m., quizá se pueda apreciar un mayor confort residencial actual, respecto a las décadas de los 50 y 60 del siglo XX. Toda la meseta del Tíbet parece haber experimentado un notable incremento de temperatura en los últimos 70 años. Por el contrario, los desiertos del Gobi y Takla-Makan, situados en torno a los 40° de latitud norte, no han experimentado subidas apreciables, con ligera disminución en el caso del desierto de Takla-Makan.



Figura 143. Diferenciales de temperatura interdecadales (1950/1959) y (2010/2019) en la región del Tíbet

Fuente: ERA 5 (ECWMF). Elaboración propia.

5.6 EVOLUCIÓN DE LAS TEMPERATURAS MEDIAS EN EL OBSERVATORIO DE CALAR ALTO (ALMERÍA, ESPAÑA)

En la figura 144 (1998-2022) se muestra una posible mejor correlación, mediante un ajuste a un polinomio de grado 2, que una simple correlación lineal, mostrando, en efecto, un incremento a lo largo de este siglo de cerca de 1°C y, al mismo tiempo, una indicación de que existen modulaciones de tendencia, que ciframos del orden de 30 años o más, cosa quizá posible utilizando Análisis de Fourier.



Figura 144. Temperatura media anual 1998-2022 (Observatorio Calar Alto)

Fuente: Estación automática del observatorio de Calar Alto. Elaboración propia.

5.7 LA SERIE DE PRECIPITACIÓN ANUAL DEL OBSERVATORIO DE CALAR ALTO (ALMERÍA, ESPAÑA) EN EL PERIODO 1978-2022

La serie de precipitación de Calar Alto comprende los años 1978-2022, con 45 años de registros prácticamente continuos. En la época 1978-1996 se dispuso de registros de pluviómetro analógico, sobre bandas de papel de registro semanal. No se aprecia una tendencia clara en la cantidad total de los años de este periodo.

En los últimos 22 años se dispone de registros digitales de precipitación sobre el observatorio de Calar Alto. No se aprecia una tendencia clara en este último periodo de tiempo. La dispersión es tan notable que harían falta muchas décadas para encontrar una tendencia en la precipitación en este enclave astronómico. En todo caso, se aprecia un moderado aumento de las precipitaciones anuales, que asociamos a las borrascas y gotas frías, aparentemente más frecuentes en las últimas décadas sobre este lugar, muy influenciado por la meteorología del Mediterráneo occidental. Esto parece, al menos apuntarse, al añadir los datos de la era analógica. Si esto se confirmase, se demostraría que este entorno de montaña mediterránea no sigue el mismo patrón que la mayor parte de la península Ibérica, donde la escasez de precipitaciones parece haberse instalado de forma cada vez más insidiosa.

Un análisis lineal de los datos mostró un incremento del orden de 100 mm., a lo largo del periodo 1978-2022 (Figura 145). Para tratar de vislumbrar algún efecto cíclico a largo plazo, se efectuaron análisis de regresión de 4 y 5 grado. Mostrándose lo que parece ser un pseudo periodo, muy marcado, con duración de unos 30 años, y forma sinusoidal. Las décadas de 1980 a 1989 y la de 2000 a 2010 parecen ser claramente más húmedas que la de los años 90, donde se registraron, en conjunto, las precipitaciones más bajas de la serie, en computo decadal. Desde un punto de vista climático, se puede considerar el enclave como seco, pues las medias están generalmente por debajo de los 300 mm. de precipitación anual.



Figura 145. Precipitaciones medias anuales sobre el observatorio de Calar Alto (Almería)

Fuente: Datos de la estación meteorológica automática del observatorio de Calar alto. Elaboración propia.

5.8 OBSERVATORIO DE IZAÑA (TENERIFE, ADYACENTE AL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DEL TEIDE. EVOLUCIÓN SECULAR DE LA TEMPERATURA MEDIA)

La temperatura media anual en el observatorio de Izaña ha mantenido claramente el incremento progresivo de las últimas décadas (Figura 146), lo que confirma la tendencia al calentamiento. La temperatura media anual de 11.6 °C se sitúa en la parte superior del quintil "muy cálido" del periodo de referencia 1961-1990, utilizado para análisis de cambio climático. Este valor iguala el dato de 2010 como máximo absoluto de la serie completa de 102 años que se inicia en 1916.

Un análisis preliminar por meses muestra que la tendencia general de calentamiento no es la misma a lo largo del año. Mientras en los meses centrales del invierno (enero y febrero) se aprecia muy poca variación, la tendencia es ascendente en los meses de abril y junio, con lo que se podría deducir un ensanchamiento del verano.

Otro efecto interesante es el máximo relativo de 1966. El mismo coincide con el detectado en la base de datos ERA 5 (Figura 138). Esta coincidencia sugiere que el efecto es real, pues la construcción de las series es completamente diferente, por su metodología, origen y autores.

Esto supone que saltos bruscos en las medias anuales del orden de 2ºC son algo posible, aunque no habitual, ocurriendo tal vez, cada 30 años, como los gráficos parecen mostrar.





Fuente: AEMET (s.f.).

5.9 DÉCADAS **PROMEDIOS** DE **TEMPERATURA** POR SOBRE TRES **CORDILLERAS** EN EL **FLANCO ATLANTICO NOR-ORIENTAL** CON **OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS**

Un suavizado decadal (Figura 147) sobre las temperaturas medias, extrapolado a la altura promedio del píxel de la base de datos ERA 5, muestra un aumento efectivo de estas, casi continuo sobre el Atlas marroquí (Oukaimeden), Sierra Nevada (España) y Pic du Midi (Pirineos franceses).



Figura 147. Temperaturas medias decadales sobre Oukaimeden, Sierra Nevada y Pic du Midi

Fuente: ERA 5 (ECWMF). Elaboración propia.

Salvo por una década de estancamiento (1970 a 1979), las temperaturas siguieron subiendo durante las siguientes décadas. Se muestra así que, en nuestra región, las cordilleras con observatorios astronómicos relevantes no están exentas de los efectos del progresivo calentamiento atmosférico. El incremento total se puede cifrar entre 1.5 y 2 °C en el transcurso de las últimas siete décadas.

5.10 PROMEDIOS DE TEMPERATURA POR DÉCADAS SOBRE TRES IMPORTANTES OBSERVATORIOS ASTRONOMICOS (KITT-PEAK, ARIZONA), (PARANAL, CHILE) Y ALI (TIBET CHINO)

Una muestra de evolución decadal de las temperaturas medias sobre tres observatorios relevantes en Norteamérica, Sudamérica y China aparece en la figura 148. En todos los casos se aprecia un aumento progresivo de la temperatura, más acusado en el caso del Tíbet chino, con cerca de 3ºC de diferencial entre las décadas centrales del siglo XX y la década 2010-2019. En las regiones de los observatorios de Kitt-Peak y Paranal la evolución se mantuvo estable hasta la década de los 80 del siglo pasado, con un incremento gradual desde entonces, sumándose a la tónica general de aceleración de los incrementos de temperatura en las más diversas regiones del planeta con interés astronómico.



Figura 148. Temperaturas medias decadales Kitt-Peak, Paranal y el Tíbet

Fuente: ERA 5 (ECWMF). Elaboración propia.

5.11 EVOLUCIÓN DE LAS TEMPERATURAS MEDIAS EN OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS MUNDIALES DE PRIMER ORDEN

En la tabla 12 resumimos las características principales de los observatorios astronómicos, analizados para este estudio. En la misma se muestra como el calentamiento atmosférico sobre ellos ha sido muy diverso, apreciándose, en primer lugar, que los observatorios más oceánicos han sufrido un menor incremento, cuando no un ligero decremento (núcleo en torno a La Silla, Chile). Las regiones Noratlántica y Norteamérica han sufrido incrementos medianamente importantes, entre 0.1 y 2º C. Sin embargo, en la región de Asia Central tenemos unos fuertes incrementos, cercanos a 2.8 º C. Hecho extensible a toda la alta meseta del Tíbet.

OBSERVATORIO	ALTITUD	LONGITUD °	LATITUD °	Δ TEMP. ° C.	
	m.				
NOR-ATLANTICO					
La Palma (España)	2400	17.9 W	28.75 N	0.57	
Izaña (España)	2380	16.55 W	28.27 N	0.75	
Oukaimeden (Maroc)	2770	7.85 W	31.19 N	1.84	
Calar Alto (España)	2168	2.54 W	37.21 N	1.9	
La Sagra (España)	2381	2.56 W	37.95 N	1.93	
Sierra Nevada	2890	3.37 W	37.07 N	2	
(España)					
Javalambre (España)	1950	1.01 W	40.04 N	1.97	
Montsec (España)	1670	0.8 E	42.01 N	1.85	
Pic du Midi (Francia)	2880	0.44 E	42.83 N	1.5	
<u>SUDAMERICA</u>					
La Silla (Chile)	2330	70.75 W	29.25 S	-0.25	
Cerro Tololo (Chile)	2200	70.8 W	30.16 S	-0.65	
Las campanas (Chile)	2380	70.69 W	29.02 S	-0.23	
Chajnantor (Chile)	5050	67.75 W	23.0 S	1.46	
Cerro Paranal (Chile)	2600	70.4 W	24.63 S	0.91	
Armazones ELT (Chile)	3050	70.19 W	24.59 S	0.88	
NORTEAMERICA					
Mount Palomar (USA)	1750	116.86 W	33.35 N	1.35	
Mount Graham (USA)	3250	109.87 W	32.7 N	1.58	
Mauna Kea (USA)	4205	155.44 W	19.81 N	1.28	
Sunspot (USA)	2810	105.82 W	32.8 N	1.11	

Tabla 12. Características fisiográficas e incremento temperatura (1950-2020)

Kitt-Peak (USA)	2050	111.61 W	31.95 N	1.3
S. Pedro Martir (Mex)	2850	115.46 W	31.02 N	0.8
ASIA CENTRAL				
ALI (CHINA)	5050	80.02 E	32.34 N	2.8
Hanle (INDIA)	4500	78.84 E	32.74 N	2.78

Fuente: ERA 5 (ECWMF). Elaboración propia.

Este trabajo trata de mostrar tendencias a largo plazo (30 años o más), pero los cambios observados hacia un descenso de temperaturas medias, en ciertas regiones, como la de Sudamérica (Tabla 13), podrían estar relacionados con las corrientes oceánicas y, más en concreto, con las situaciones de El Niño/La Niña, que, con una frecuencia de unos cuatro años, pueden modular la tendencia a largo plazo en esta región. Es menos evidente que los observatorios del Noratlántico puedan estar influidos a largo plazo por situaciones alta o baja del índice NAO (Oscilación del Atlántico Norte). Todo ello debería estudiarse más en detalle, para ver posibles conexiones a largo plazo, en estas regiones y los lugares de gran altitud de los observatorios.

observatorios de las regiones astronómicas más representativas en este trabajo								
DECADA	OUKAIMEDEN	S.NEVADA	PIC DU MIDI	KITT-PEAK	PARANAL	ALI (Tíbet)		
1950/1959	10.93	10.97	7.05	19.75	14.99	-4.89		
1960/1969	11.27	11.26	7.3	19.28	1.85	-3.39		
1970/1979	10.76	10.6	7.01	19.41	15.18	-3.27		
1980/1989	11.71	11.63	7.71	19.4	15.09	-2.77		
1990/1999	11.74	12.11	8.08	20,2	15.84	-2.72		
2000/2009	12.37	12.61	8.34	20.65	15.92	-2.18		
2010/2019	12.76	12.97	8.49	21.05	16.24	-2.13		

Tabla 13. Evolución decadal de la temperatura media (°C) en una muestra de los

Fuente: ERA 5 (ECWMF). Elaboración propia.

BREVE DISCUSIÓN 6

En los trabajos consultados, hemos encontrado referencias a una serie de cambios climáticos que, en general, tienden hacia un mayor calentamiento, una disminución de la nubosidad en áreas concretas con observatorios astronómicos y la presencia de ciclos decadales o seculares. Existen otros ciclos gobernados por la geometría de la órbita de la Tierra y su inclinación, siendo aquí los periodos de calentamiento medibles en milenios. Un complejo sistema atmosférico, con irradiación cambiante, induce cambios en la temperatura de las masas oceánicas y también en las masas de tierra emergidas. Son variaciones a largo plazo, de gran amplitud y que, de alguna manera, escapan a lo que estamos considerando en este trabajo, donde se observan tendencias de la variación de la radiación y la temperatura en un plazo de 7 décadas.

Superpuestos y modulando los largos periodos milenarios de gran amplitud térmica, existen una serie de ciclos superpuestos, del orden de 30 años y quizá más, de amplitud menor que los anteriores, de los cuales ya si se dispone de información instrumental, resultando que todos estos cambios, quizá están mal entendidos, o no bien explicados. Para una visión general de los cambios a largo plazo se recomienda la lectura de trabajos como los de Halley et al. (1999) y Haslebacher et al (2022).

Los modelos de cambio climático son forzados al máximo y muestran un posible error, muy superior a los rangos de variación real de las medias descritas y observadas experimentalmente. Por otro lado, las series temporales suelen ser cortas, y la precisión de las observaciones suelen presentar, en muchos casos, sesgos, ya que entre otras cosas los observatorios astronómicos no suelen preocuparse de disponer de estaciones meteorológicas homologadas con el resto de la red mundial de la Organización Meteorológica Mundial (WMO); se diría que son para "consumo propio". Esto dificulta llegar a conclusiones realmente sólidas. Menos aún permiten establecer en que grado se verán afectados los principales observatorios astronómicos estudiados.

Durante las próximas décadas, a escala regional Mediterránea, los cambios previstos, por los modelos, tienden hacia valores negativos de radiación solar en los lugares donde se sitúan los observatorios. Estos cambios son poco importantes y se ciñen a las elevaciones montañosas del norte y el sureste de la península Ibérica. Por tanto, en los lugares donde se sitúan los principales observatorios astronómicos de la península Ibérica, estas modelizaciones no precisan que régimen de nubosidad podemos esperar en el futuro (Gil et al., 2019). Nuestro trabajo de nubosidad en los observatorios de Calar Alto, Sierra Nevada y La Sagra no concuerdan con la tónica observada en el SE de la península Ibérica; pues, en nuestro caso, hemos observado una disminución de la nubosidad, en el rango del 1-3% en los últimos 40 años.

A escala similar, en diferentes regiones del mundo con observatorios astronómicos importantes (SW de EE. UU., norte de Chile-Argentina y el Tíbet), se observan unos incrementos de entre 1 y 3ºC. Estos cambios hacia valores positivos están aparentemente asociados con la existencia de macizos montañosos y con el efecto de la continentalidad, donde el termostato oceánico tiene menos influencia. De hecho, en el norte de Chile, donde se sitúan algunos observatorios importantes, se observa un descenso de las temperaturas actuales respecto a la de la década de 1950

del siglo pasado. Sin embargo, en el Tíbet chino, donde se proyectan importantes observatorios, se manifiesta un incremento del orden de 3º C en gran parte de la meseta.

En áreas elevadas de la península Ibérica los observatorios astronómicos que existen no deberían sufrir grandes cambios en su clima, al menos en las próximas décadas, en un sentido que implique una degradación de las condiciones observacionales; en todo caso, es de esperar alguna mejoría respecto a la nubosidad (disminución) o el confort habitacional, de producirse un incremento de la temperatura (modelos al uso del panel del IPCC), y, tal vez, un leve aumento del agua precipitable PWV. Este último cambio solo afectaría a los observatorios dedicados a la observación infrarroja y a los de radio submilimétrico.

Eventualmente, y en periodos muy largos (30 años o más), se producen "bump" repentinos, tanto en las medias máximas globales como en las mínimas (ERA 5). Efecto también observado en algunas series de observatorios terrestres individualizados, como el de Izaña (Tenerife), que cuenta con una longitud secular en las series de datos. Estos eventos anómalos en los promedios anuales deben ser objeto de mayor atención, pues podría tratarse de un efecto de extensión regional y no algo meramente local. A escala planetaria, como se ha deducido en este trabajo, dichos cambios repentinos no tienen una fácil explicación, e igualmente deben investigarse más a fondo.

Es muy importante, y necesario, estudiar las envolventes de la variación a largo plazo, desde décadas a siglos, para limar el ruido intrínseco de las variables climáticas, en este caso la temperatura del aire y del agua del mar. La exactitud de las medidas es fundamental, y esto solo es posible en la era instrumental y con calibraciones fiables.

Todo el conjunto planetario parece mostrar este calentamiento, particularmente el Ártico y el hemisferio norte, donde se observan fenómenos climáticos de aumento de intensidad de los episodios extremos.

Aunque la tónica del aumento de temperatura media en las décadas aquí consideradas es innegable, es cierto que en ciertas regiones y latitudes se producen decrementos de temperatura media cuando se comparan los promedios de la década de los 50 del siglo XX con los de década 2010-2019.

Nuestro trabajo muestra, a través de una cartografía temática, como incide el calentamiento global en las áreas donde se asientan los principales observatorios astronómicos. Los casos particulares estudiados, muestran, igualmente, un aumento notable de las temperaturas, aunque con variaciones espaciales remarcables. A pesar de su innegable efecto global, este calentamiento, del orden de 1.5 ° C, aun no incide de manera negativa en la operatividad en ninguno de los observatorios considerados. No obstante, el análisis de series largas de temperatura y precipitación muestra algunos efectos anómalos, y ciertas distribuciones espaciales y temporales que deben ser

estudiadas más en detalle, si queremos conocer el posible efecto de estos cambios sobre instalaciones astronómicas, o de otro tipo, actualmente operativas.

7 CONCLUSIONES

Considerando el conjunto del sistema océano-atmósfera, y su circulación variable, y con tantos parámetros difíciles de cuantificar, resulta muy complejo señalar el posible efecto de los gases de efecto invernadero, generados por el hombre, sobre las características y la variación de dicha circulación. A pesar de su innegable efecto global, este calentamiento natural o inducido, aún no incide de manera negativa en la operatividad en ninguno de los observatorios principales considerados. Los observatorios astronómicos se localizan a gran altitud y las peculiaridades de su clima aún no son bien conocidas en periodos muy largos (decenas a cientos de años).

Aunque la tónica del aumento de temperatura media, en las décadas aquí consideradas, es innegable, es cierto que, en ciertas regiones y latitudes, se producen decrementos de temperatura media, cuando se comparan los promedios de la década de los 50 del siglo XX y los de la década 2010-2019.

El hecho de que la productividad de un gran observatorio astronómico esté ligada al tiempo despejado y estable, como el que se da en los bordes de los desiertos (Atacama, Tíbet, Canarias), es lo que nos lleva a establecer que el actual calentamiento global, y el aumento de noches despejadas en la región mediterránea, en particular, no debe considerarse como negativo para la investigación astronómica, a pesar de que los perjuicios en otros aspectos, sobre todo los económicos, son potencialmente muy negativos.

BIBLIOGRAFÍA

AEMET (-): Análisis del Comportamiento de la Temperatura Media Anual en 2017 y de las series mensuales históricas 1916-2017 del Observatorio de Izaña. En Aemetblog. Recuperado de https://aemetblog.es/2018/01/23/analisis-del-comportamiento-de-la-temperatura-media-anual-en-2017-y-de-las-series-mensuales-historicas-1916-2017-del-observatorio-de-izana/.

Alley, R. B. and Clark, P. U. (1999). The deglaciation of the Northern Hemisphere: A Global Perspective. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 27:149-82. doi: 10.1146/annurev.earth.27.1.149

Arrhenius, S. (1896). On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 5(41), 237-276. doi: 10.1080/14786449608620846

Brewer, S., Guiot, J., & Torre, F. (2007). Historical droughts in Mediterranean regions during the last 500 years: A data/model approach. *Climate of the Past*, 3(3), 355-366. <u>doi</u>: 10.5194/cp-3-355-2007

Colose, C. M., LeGrande, A. N., & Vuille, M. (2016). The influence of volcanic eruptions on the climate of tropical South America during the last millennium in an isotope-enabled general circulation model. *Climate of the Past*, 12(4), 961-979. doi: 10.5194/cp-12-961-2016

CAHA (Observatorio Astronómico de Calar Alto) (s.f.). Calar Alto Weather Statistics. Recuperado de http://www.caha.es/WDXI/STAT/stat.html

Diodato, N., Büntgen, U., & Bellocchi, G. (2019). Mediterranean winter snowfall variability over the past millennium. *International Journal of Climatology*, 39(1), 384-394. <u>doi</u>: 10.1002/joc.5810

Duncan et al. (2008). Coastal Impacts Due to Sea-Level Rise. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 36, 601-647. doi: 10.1146/annurev.earth.35.031306.140139

Egerer, S., Claussen, M., Reick, C. H., & Stanelle, T. (2016). Marine sediment records as indicator for the changes in Holocene Saharan landscape: Simulating the dust cycle. *Climate of the Past Discussions*, 11, C2956-C2960. doi: 10.5194/cpd-11-C2956-2016

Egli, S., Thies, B., Drönner, J., Cermak, J., & Bendix, J. (2017). A 10-year fog and low stratus climatology for Europe based on Meteosat Second Generation data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143(702), 530-541. doi: 10.1002/qj.2941

Fenbiao, N., Cavazos, T., Hughes, M. K., Comrie, A. C., & Funkhouser, G. (2002). Cool-season precipitation in the southwestern USA since AD 1000: Comparison of linear and nonlinear techniques for reconstruction. *International Journal of Climatology*, 22(13), 1645-1662. doi: 10.1002/joc.804

Gil, V., Gaertner, M. A., Gutierrez, C., & Losada, T. (2019). Impact of climate change on solar irradiation and variability over the Iberian Peninsula using regional climate models. *International Journal of Climatology*, 39(3), 1733-1747. doi: 10.1002/joc.5810

ECMWF (s.f.). ECMWF Reanalysis v5 (ERA5). Recuperado de https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5

Gómez-Navarro, J. J. et al. (2015). A regional climate palaeosimulation for Europe in the period 1500–1990 – Part 2: Shortcomings and strengths of models and reconstructions. *Climate of the Past*, 11, 1077-1095. doi: 10.5194/cp-11-1077-2015

Haslebacher C. et al. (2022). Impact of climate change on site characteristics of eight major astronomical observatories. *Astronopmy* & Astrophisics, 665, 1-53. doi: 10.1051/0004-6361/202142493

Hay et al. (2016): Observed and projected changes in weather and climate extremes. *Climate Extremes, 11*, 103-105. doi:10.1016/j.wace.2015.11.002

Hentgen, L., Ban, N., Kröner, N., Leutwyler, D., & Schär, C. (2019). Clouds in Convection-Resolving Climate Simulations Over Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(7), 3849-3870. doi: 10.1029/2018JD030150

Hewitson B. et al. (2017). Climate information websites: an evolving landscape. *WIREs Climate Change*, 8:e470. doi: 10.1002/wcc.470

IPCC. (n.d.). Cambio Climático: Bases Físicas. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC Grupo de Trabajo I. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/.../cambio-climatico-bases-fisicas.aspx

Mächel, H., Kapala, A., & Flohn, H. (1998). Behaviour of the centres of action above the Atlantic SINCE 1881. Part I: Characteristics of seasonal and internannual variability. *International Journal of Climatology*, 18, 1-22. Recuperado de https://www2.meteo.unibonn.de/bibliothek/Flohn_Publikationen/K350-K370_1991-1998/K369.pdf

McAdie, A. (1911). Heating the atmosphere. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 23(139), 253-257.

Meseguer-Ruiz et al. (2019). Weather regimes linked to daily precipitation anomalies in Northern Chile. *Atmospheric Research*, 236. doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104802

Moreno-Quesada, J.A., & Martínez-Ibarra, E. (2018). "Construcción de una serie climática de nubosidad en una montaña mediterránea: El caso de Calar Alto (Sierra de los Filabres, Almería)". En *Montañas Fuente de Vida y de Futuro* (). Actas del I Congreso CIMAS. Granada, , 8, 9, 10 Y 11 de marzo de 2018. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/336408823_CONSTRUCCION_DE_UNA_SERIE_CLI MATICA_DE_NUBOSIDAD_EN_UNA_MONTANA_MEDITERRANEA_EL_CASO_DE_CALAR_ALTO_SIERRA_DE_LOS_FILABRES_ALMERIA#fullTextFileContent.

National Research Council (1995). *Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales*. Washington DC, Estados Unidos: The National Academies Press.

National Research Council (2014). *Linkages Between Arctic Warming and Mid-Latitude Weather Patterns: Summary of a Workshop.* Washington DC, Estados Unidos: *The National Academies Press.*

New, M., Hulme, M., & Jones, P. (2000). Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901–96 monthly grids of terrestrial surface climate. *Journal of Climate*, 13(13), 2217-2238. Doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<2217:RTCSTC>2.0.CO;2

Nicholson, S. B. (1932). Meteorological conditions affecting observing quality on Mauna Kea KEA, Sun-Spots and the Weather, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 44, 230-237. doi: 10.1086/124232

Rodrigo, F.S. (2008). A new method to reconstruct low-frequency climatic variability from documentary sources: application to winter rainfall series in Andalusia (Southern Spain) from 1501 to 2000. *Climatic Change* 87, 471-487 (2008). <u>doi:</u> 10.1007/s10584-007-9312-x

Schittek, K., Kock, S. T., Lücke, A., Hense, J., Ohlendorf, C., Kulemeyer, J. J., Lupo, L. C. y Schäbitz, F. (2016). A high-altitude peatland record of environmental changes in the NW Argentine Andes (24 ° S) over the last 2100 years. *Climate of the Past*, 12, 1165-1180. doi: 10.5194/cp-12-1165-2016.

Terink, W., Immerzeel, W.W., & Droogers, P. (2013). Climate change projections of precipitation and reference evapotranspiration for the Middle East and Northern Africa until 2050. *International Journal of Climatology*, 33, 3055-3072. doi: 10.1002/joc.3650

SKA (Square Kilometre Array). The SKA Project - Public Website (skatelescope.org). Recuperado de https://www.skao.int/en

Turner et al. (2007). An Arctic and Antarctic perspective on recent climate change. International Journal of Climatology, 27: 277-293 (2007). doi: 10.1002/joc.1406

You, Q., Min, J., & Kang, S. (2016). Rapid warming in the Tibetan Plateau from observations and CMIP5 models in recent decades. *International Journal of Climatology*, 36(6), 2660-2670. doi: 10.1002/joc.4520

Wild, M. (2012). Enlightening global dimming and brightening. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(1), 27-37. doi:10.1175/BAMS-D-11-00074.1

Wild, M., Folini, D., Henschel, F., Fischer, N., & Müller, B. (2015). Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. *Solar Energy*, 116, 12-24. doi: 10.1016/j.solener.2015.03.039

CAPITULO VIII

PROPUESTAS DE FUTURO

1 OBJETIVOS

El objetivo general de este capítulo es señalar y discutir sobre futuros lugares de asentamiento de observatorios, con base en la superficie terrestre.

Entre los objetivos específicos se encuentran:

Seleccionar variables físicas representativas que reflejen la aptitud del medio para la instalación de observatorios astronómicos y valorar su "bondad" para la instalación de los mismos.

Atender además a criterios logísticos o de oportunidad.

Proponer lugares para el propósito de la observación astronómica a nivel global que, "a priori", puedan ser considerados demasiados extremos pero que, en la práctica, puedan ser factibles para la ubicación de instalaciones astronómicas, dadas las posibilidades que ofrece la gestión remota de observatorios astronómicos.

Otro objetivo específico relacionado con el ámbito regional de mayor interés en la presente tesis doctoral aparece también ligado a la revisión de las ubicaciones existentes, incluso la propuesta de nuevas instalaciones de observatorios astronómicos, en el caso del SE de la península Ibérica.

2 INTRODUCCIÓN

Un ejercicio como el de este capítulo podría pensarse que tiene poco recorrido, en un campo como el de las ciencias físicas y experimentales. A pesar de ello, y basándonos en la trayectoria histórica de la investigación sobre la selección y protección de lugares para observatorios astronómicos, nos permitimos hacer algunas proyecciones futuras y, al tiempo, mostrar, someramente, un catálogo de lugares de categoría que podemos llamar "extrema", para la instalación de nuevos observatorios en diversas regiones astronómicas. También introducimos un estudio de casos centrado en el SE de la península Ibérica, donde proponemos, traslados de gran recorrido de los telescopios, desplazamientos en superficie o en altura, así como otras sugerencias que esperamos útiles, para futuros trabajos de "site testing".

Lo sugerido aquí proviene de la larga experiencia del autor en los observatorios de Sierra Nevada, Calar Alto y La Sagra. Todos en la parte oriental de Andalucía. Estos observatorios presentan diferentes tipologías, tamaños y altitudes; por tanto, requieren, de posibles propuestas de mejora. En realidad, todo el SE de la península Ibérica podría constituir un verdadero "Núcleo Astronómico", pues, al grupo de observatorios existentes en la región podemos añadir, al menos, dos lugares más, de excelentes características astronómicas, como son la cima de la Sierra de La Sagra y la Sierra de Gádor (Almería).

Dado que la actividad observacional en astronomía en tierra es una actividad que no está próxima a decaer, creemos que es procedente dedicar un capítulo concreto a las posibilidades de nuevos emplazamientos, para un plazo próximo y medio.

Todo el repertorio de sitios sugeridos está basado en la localización de observatorios astronómicos en las regiones más prometedoras, como son Chile, China o la Antártida, siendo el caso del Mediterráneo occidental y el norte de África una posibilidad, dada la escasez de propuestas para esta región, que cuenta con unas características muy adecuadas para observación, tanto en astronomía óptica como en el infrarrojo y para las frecuencias correspondientes a las ondas de radio.

2.1 UNA SELECCIÓN DE OBJETIVOS INÉDITOS SOBRE FUTUROS OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS

Nuestro objetivo es señalar y discutir sobre futuros lugares de asentamiento de observatorios, con base en la superficie terrestre.

Esta selección se hace considerando los criterios de cobertura nubosa (TCC) y cantidad de agua precipitable de (PWV), atendiendo, además, a criterios logísticos o de oportunidad.

Los lugares propuestos no son bien conocidos, o se consideran demasiado extremos por la comunidad de nuestro campo, pero la realidad es que ya existen instalaciones astronómicas, habitadas u operadas de manera remota, en entornos muy difíciles, a gran altitud y lejanía, e inaccesibilidades extremas.

Se hace una particular mención a los lugares más próximos a nuestros actuales observatorios, especialmente en el SE de España.

3 FUENTES Y METODOLOGÍA

Se ha considerado una literatura científica extensa, ya referenciada en otros capítulos de esta tesis, por lo que, según la variable tratada, remitimos a dicha bibliografía en particular.

Para este apartado, nos centraremos en referencias que han hecho una contribución significativa en la idea de llevar las instalaciones astronómicas a los lugares más favorables obviando, en principio, la enormidad de las restricciones logísticas y presupuestarias, que son la "Ley última" de cualquier desarrollo científico.

Las fuentes consultadas son las mismas que para el resto de los capítulos de este trabajo. Con todo, recordamos que las mismas están centradas en el análisis de datos de bases climatológicas extensas, como ERA5, y las imágenes y datos de MODIS/TERRA, así como de la Red de AERONET.

El tratamiento de los mapas e imágenes se ha hecho a través de QGIS, y los datos han sido graficados con Excel. Para el caso del SE de la península ibérica hemos hecho uso del visor de mapas del IGN: https://www.ign.es/iberpix2/visor.

La metodología seguida se ha fundamentado en el análisis sistemático de estas bases de datos. Al respecto, se ha prestado particular interés a las proyecciones realizadas para las variables climáticas más representativas para la observación astronómica y el "site testing": la nubosidad (TCC), el agua precipitable (PWV) o la turbulencia atmosférica. Esta última, frecuentemente, definida como "seeing" en trabajos de astronomía.

Bastantes de las sugerencias de este capítulo están basadas en pruebas experimentales, sobre las variables más significativas, desde el punto de vista astroclimático, y se complementan, también, con largas series de observaciones visuales y de webcam de los distintos observatorios citados.

4 **RESULTADOS**

REGIONES DE INTERÉS ASTRONÓMICO CON LUGARES POTENCIALMENTE SUPERIORES PARA NUEVOS OBSERVATORIOS

4.1 LA CORDILLERA DE LOS VOLCANES DE CHILE-ARGENTINA

Esta región del planeta ha sido aclamada como la mejor disponible, no solo por sus condiciones astroclimáticas sino también por su estabilidad política, la accesibilidad y soporte de todo tipo.

Como es bien conocido, en la región del norte de Chile se están instalando los complejos astronómicos y radioastronómicos más importantes del mundo. Tanto la ESO europea, como las distintas instituciones científicas americanas, chinas y japonesas, están desarrollando iniciativas de carácter astronómico en la región.

Aunque ha sido apuntado en varias ocasiones por los prospectores de sitios, como Walker (1971,1984) o Cavazzani et al. (2012), no ha sido hasta muy recientemente cuando se ha considerado iniciar los primeros intentos de observación astronómica cerca del entorno de los 6000 m. Nos estamos refiriendo, concretamente, al Cerro Chajnantor, a 5640 m., donde ya opera una estación de infrarrojo.

Entre los primeros prospectores de la región destaca Jürgen Stock, del observatorio Kitt-Peak, en Arizona. Fue el primero en llevar a las altas cimas de la región del Cerro Tololo instrumental específico para medir la calidad de la imagen en 1962. Para tener una perspectiva de los trabajos de Stock en Chile puede consultarse el Simposium de la IAU nº 19", y a Silva (2020).

Estos lugares, de media altitud, en torno a los 2500 m., ya señalaban directamente a la amplia cordillera de los volcanes, cuyas cimas y mesetas se elevan, prodigiosamente, hasta los 6000 y 7000 m. de altitud. Por ello constituyen un objetivo astronómico a tener en cuenta en las próximas décadas.

Nosotros presentamos un breve resumen de las características astroclimaticas de estas cumbres extremas, principalmente en lo referente a nubosidad (TCC) y agua precipitable (PWV), dando, por supuesto, que las condiciones de transparencia y calidad de imagen sean probablemente excepcionales.

En nuestra opinión, esta es la zona que cuenta con más posibilidades de grandes desarrollos futuros en astronomía y radioastronomía, ya que las relaciones institucionales con los gobiernos de la región están muy consolidadas, incluyendo los posibles lugares en Argentina, Bolivia y Perú y, aparte, Chile.

El núcleo duro de los lugares con mejores características parece hallarse en un área en dirección norte-sur entre los 22º y los 28º de latitud S. y los 68º y 71º de longitud W. Esta área discurre, principalmente, entre las fronteras de Chile y Argentina. La región tiene el límite de nieves permanentes más altas del mundo (en torno a 6000 m.), lo cual facilita enormemente la instalación de infraestructuras. En la figura 148 disponemos de un excelente ejemplo, con el complejo de Tres Cruces, a 6750 m de elevación. El hecho de disponer de tres cimas cercanas a casi idéntica altitud facilita, también, una multiplicidad de instalaciones, que redundan en la robustez e importancia de futuros complejos astronómicos.

4.2 ALGUNAS PARTICULARIDADES DE LA ZONA DE LOS VOLCANES ENTRE CHILE-ARGENTINA

La primera observación que podemos hacer es que en esta zona chilenoargentina parecen confluir los observatorios más avanzados del mundo; tanto los de la ESO (European Southern Observatory) como los de las grandes instituciones americanas del observatorio Gemini Sur. Todas con gigantescas infraestructuras, donde se están construyendo y proyectando telescopios de la clase 30-100 m de diámetro. También hay participación de países como Brasil, Canadá, Australia y Japón en diversos proyectos. En conjunto, es una enormidad de nuevos intentos por extender los límites observacionales en astronomía y radioastronomía, mucho más allá de lo que es habitual en observatorios más convencionales en Europa o EE. UU., los cuales se surten de telescopios más modestos, de la clase 1 a 10 m. de diámetro.

En una segunda observación vemos una continua escalada en altitud, llegando en la actualidad hasta los 5600 m. en Cerro Chajnantor. Se busca aquí el mejor seeing posible, y de las menores cantidades de PWV, para los nuevos telescopios y radiotelescopios que trabajaran en las fronteras de lo observable desde tierra.

En una tercera observación podemos ver que los condicionantes de tipo logístico y climatológico empiezan a ser sobrepasados por la presión científica ejercida. Es decir, la búsqueda de resultados científicos relevantes parece primar sobre los costes y las dificultades logísticas. En consecuencia, se buscan lugares muy elevados, y distantes de todo tipo de contaminación.

Los lugares de la tabla 14 reflejan nuestra propuesta en la cordillera de los volcanes entre Chile y Argentina. Se han elegido lugares de más de 6000 m. de altitud, excepto los 3 últimos, donde ya existen observatorios construidos. En la tabla aparecen los valores más probables de agua precipitable PWV y nubosidad total (TCC), deducidos de la literatura y de nuestro estudio, desarrollado en otros capítulos de este trabajo.

Tabla 14. Los principales candidatos para futuros observatorios astronómicos a muy
elevada altitud y para el infrarrojo

		r ucrite.			oración pre	ppia.	
<u>LUGAR</u>	ALTITUD	LATITUD	LONGITUD	<u>PWV</u>	<u>TCC</u>	<u>NOTAS</u>	PAIS
				<u>Literatura</u>	<u>(ERA5)</u>		
	<u>(metros)</u>			<u>(Ajustado)</u>	(Medido)		
OJOS SALADO	6893	27º 06 S	68º 32 W	0.33 mm.	0.22	Volcán semiactivo	Chile-
							Arg.
CERRO PISSIS	6800	27º 45 S	68º 48 W	0.35 mm.	0.24	Propuesta cono - loma	Arg.
LLULLAILLACO	6750	24º 43 S	68º 42 W	06 mm.	0.21	Situación optima	Chile-
							Arg.
TRES CRUCES	6750	27º 05 S	68º 46 W	0.36 mm.	0.22	Optimo en general	Chile
INCAHUASI	6621	27º 02 S	68º 17 W	0.39 mm.	0.24	Propuesta cono volc.	Chile-
							Arg.
CERRO EL	6420	26º 38 S	68º 22 W	0.43 mm	0.20	Complejo volcánico	Arg.
CONDOR						(Dormido)	
SITIO IDEAL	6220	24º 20	68º 04 W	0.48 mm.	0.23	Propuesta en loma	Chile
(PULAR)							
SOLO	6210	27º 06 S	68º 43 W	0.48 mm	0.22	Propuesta pico vol.	Chile-
							Arg.
CERRO DEL	6168	29º 08 S	69º 47 W	0.5 mm.	0.25	Muy al sur (Lomas)	Chile-
TORO							Arg.
NEVADO	6140	24º 16 S	66º 44 W	0.5 mm.	0.21	Propuesta cono - loma	Arg.
QUEVA							
COPIAPO	6052	27º 18 S	69º 08 W	0.52 mm.	0.22	Propuesta cono vol.	Chile
MIÑIQUES	5910	23º 49 S	67º 45 W	0.56 mm.	0.26	Propuesta cono vol.	Chile
LICANCABUR	5911	22º 50 S	67º 52 W	0.56 mm.	0.30	Cerca llano Chajnantor	Chile
CERRO	5600	22º 59 S	67º 44 W	0.63 mm.	0.27	Estación medida IR	Chile
CHAJNANTOR						actual y CCAT	
ARMAZONES	3050	24º 35 S	70º 11 W	2.75 mm	0.16	Observatorio ELT	Chile
(ELT)						(ESO)	
PARANAL (VLT)	2650	24º 37	70º 24 W	3.5 mm.	0.18	Observatorio VLT	Chile
						(ESO)	

Fuente: ERA 5 (ECMWF). Elaboración propia.

El listado de los lugares de la figura 148 según su altitud sobre el nivel del mar es el siguiente: 1-Ojos Salado; 2-Cerro Pissis; 3-Llullaillaco; 4-Tres Cruces; 5-Incahuasi; 6-Cerro el Condor; 7-Pular; 8-El Solo; 9-Cerro el Toro; 10-Nevado Queva; 11-Copiapo; 12-Miñiques; 13-Licancabur; 14-Cerro Chajnantor; ELT y VLT (sin numerar).



Figura 149. El TCC promedio (2010-2019) de la región de la Cordillera de los Volcanes entre Chile y Argentina

Fuente: ERA 5 (ECMWF). Elaboración propia.

En la figura 149 se observa que nuestra propuesta manifiesta un particular interés por los lugares al NE del Llullaillaco, alrededor de 24º sur. También aparece otra zona, en torno a los 27º sur, en torno a Ojos de Salado y Tres Cruces, todos ellos con

TCC cercanos a la línea del 0.2. Esta última zona parece reunir excelentes condiciones combinando TCC y PWV. La zona de valores absolutos de TCC iguales o memores al 0.16 no dispone de alturas más allá de unos 2500 m. ELT y VLT están muy próximos a este límite mínimo de la región, que se puede considerar como una de las de más bajo TCC del mundo.

En cuanto al PWV (Tabla 14) se observan valores desde los 0.3 mm en Ojos de Salado-Tres Cruces a los 3.5 mm. del VLT. Valores similares a estos solo es posible hallarlos en la alta meseta Antártica, por encima de los 3000 metros de altitud y, tal vez, en ciertos lugares elevados del Tíbet, por encima de los 7000 metros. Por tanto, una combinación favorable, de logística, accesos, PWV y TCC, convierten a esta región en la más competitiva del mundo para futuros desarrollos de grandes observatorios astronómicos con base en tierra.

En la figura 150 se muestra el mejor ajuste encontrado para deducir el PWV en la cordillera de los volcanes. Los datos de varios autores citados son de campañas de medición largas, y sus valores están dados en forma de mediana. Los valores de la tabla 14 son extrapolación de la tendencia observada. La escala de altura es de ~1700 m.



Figura 150. Evolución del PWV con la altura en la cordillera de los volcanes

Fuente: ERA 5 (ECMWF). Elaboración propia.

Una panorámica desde el sur de Tres Cruces (6750 m.), tomada desde una altitud de 4000 m., puede observarse en la figura 151. En la imagen se aprecia la exigua cantidad de nieve, incluso en las cimas, lo que sin duda facilita la instalación de cualquier infraestructura.



Figura 151. Una imagen digital de la Cordillera Tres Cruces

Fuente: Google Earth.

4.3 LA ANTÁRTIDA COMO ÚLTIMO RECURSO PARA ASTRONOMÍA INFRARROJA

No existe ningún lugar en el planeta que pueda ofrecer mayores ventajas en observación en el lejano infrarrojo y en radio submilimétrico. Se diría que la alta meseta de la Antártica oriental ya ha recibido merecido reconocimiento como tal. No obstante, tenemos una gran parte de la Antártida occidental con muy poco conocimiento sobre sus características astronómicas, aunque es de suponer que son igualmente sobresalientes, al menos en la alta cadena de los numerosos edificios volcánicos.

4.3.1 La cadena de volcanes de Marie Byrd

La Tierra de Marie Byrd es una región en la Antártida occidental situada entre la barrera de Ross y el mar de Ross, al sur del océano Pacífico. Su límite sur, son las montañas Transantárticas. Esta región toma el nombre de la esposa del almirante Byrd, un destacado explorador antártico de Estados Unidos durante la primera mitad del siglo XX.

Debido a su extrema lejanía, incluso para estándares antárticos, las mayores formaciones montañosas de origen volcánico de la Tierra de Marie Byrd han permanecido casi inexploradas, aunque a nuestro propósito hemos de destacar la existencia de posibles lugares de extraordinarias características astronómicas, sobre todo para aplicaciones de infrarrojo y radio submilimétrico.

Actualmente, esta zona no está reclamada por ninguna nación de la Tierra con intereses en la Antártida, a excepción de Estados Unidos, por sus actividades anteriores al Año Geofísico Internacional de 1957.

Hay 23 volcanes principales en el área, dos de los cuales son el Monte Takae y el Monte Sidley. Este último, con 4181 m., es la elevación más importante de este sector de la Antártida.

El Monte Takahe (Figura 152) tiene forma circular, abarcando unos 29 km. de diametro y su caldera 8 km. Tiene una altitud de 3460 m y un volumen de 780 km³. Es un volcán gigantesco, similar a los de Hawái. Se supone que las últimas erupciones ocurrieron durante el Holoceno siendo, por tanto, un volcán potencialmente activo, pero sin erupciones históricas. Probablemente, Takahe se encuentra entre las montañas que fueran observadas desde lejos por el almirante Byrd, en vuelos realizados en febrero de 1940. Toma su nombre del idioma maorí, designando a un ave no voladora de Nueva Zelanda. La primera expedición a este escudo volcánico se realizó en 1957.

A D CH X CONTOUR INTERNAL 200 METERS

Figura 152. El Monte Takahe es un gran volcán en forma de escudo cubierto de nieve, que se encuentra a 64 km al SE de la montaña Toney

Fuente: Enciclopedia of the Antartic.

En la figura 153 aparece el detalle del TCC en torno al Mount Takae, de 3460 m., en la Antártida occidental (la figura original ha sido reproyectada al sistema EPGS3857). La mancha azul corresponde al pequeño casquete de hielo de la cima. Dado que la deducción del TCC se hizo con criterios de albedo, podemos considerar que no es muy realista, y la situación real se corresponda con lo que se observa en los flancos de este volcán en escudo (zona naranja). En nuestra opinión, es un lugar favorable con un TCC promedio menor de 0.4, aunque lejos de las condiciones de los lugares de la meseta de hielo de la zona oriental del continente.



Figura 153. La nubosidad total promedio (TCC) sobre el Monte Takae

Fuente: Modificado de Wilson y Jetz (2017).

La montaña Toney (Figura 154) es un edificio volcánico de 60 Km. de largo, en la tierra de Marie Byrd. Una caldera de 3 km de diámetro corona el volcán, y una muestra tomada del mismo indicó una edad de medio millón de años desde su erupción. Es posible que hayan ocurrido más erupciones durante el Holoceno, como parecen indicar las capas de ceniza volcánica que se observan en muestras de hielo de la Base de Byrd.



Figura 154. Toney Mountain con una elevación considerable, con 3600 m de altitud

Fuente: Enciclopedia of the Antartic.

El Monte Sidley (Figura 155) es incluso algo más alto que el Domo A de la Antártida oriental. La montaña se destaca por su espectacular caldera de 5 km de diámetro. El monte fue descubierto por el contraalmirante Byrd, durante un vuelo de reconocimiento, en noviembre de 1934.

Finalmente, mencionaremos el Mount Vinson, que es la cima más alta de la zona de los volcanes de la Antártida occidental y de todo el continente. Con 5000 metros de altitud es, también, la cima más ventosa y fría, con temperaturas severamente bajas. El área, sin embargo, tiene un clima relativamente estable, gobernado por las altas presiones sobre el casquete polar. Esto hace suponer que las condiciones de agua precipitable sean extraordinariamente favorables, siendo probablemente el lugar con la menor cantidad de PWV del mundo (<< 0.1 mm.); pero, ciertamente, es un lugar con una logística cercana a lo imposible.



Figura 155. El Monte Sidley de 4285m de altitud es el más elevado de la cadena de volcanes de Tierra de Marie Byrd

Fuente: Enciclopedia of the Antartic.

4.4 CARACTERÍSTICAS ASTROCLIMÁTICAS EN LA ANTÁRTIDA

En la tabla 15 aparecen: 1) los lugares Antárticos con desarrollo actual de estaciones astronómicas (rojo); y 2), los lugares propuestos en Antártida occidental y Montes transantárticos (negro). Se indican, además, las cantidades estimadas o medidas de PWV, y se resumen las condiciones de nubosidad TCC, según distintas bases de datos e imágenes de satélite.

LUGARES	ALTITU D	LATITUD	LONGITUD	PWV (Liter) Suen at al	TCC (MODIS TERRA) 2010- 2019	TCC MOD07 (2011) Suen et al	TCC WILSON & JETZ
VINSON	5000	78º 38 S	85º 10 W	0.04 5	0.581		0.47
KIRPATRICK	4400	84º 22 S	166º 42 W	0.1			0.64
DOME A	4085	80º 22	77º 20 E	0.14	0204	0.138	0.2

Tabla 15. Características astroclimáticas en la Antártida

TRANSANTARTIC	3800	86º 18	157º 13 W	0.17			0.231
0 A		S					
DOME FUJI	3780	77º 30	39º 42 E	0.17	0.17		0.29
		S					
VOSTOK	3500	78º 28	106º 50 E	0.21	0.122		0.29
		S					
DOME C	3280	75º 05	123º 21 E	0.24	0.147	0.112	0.37
		S					
POLO SUR	2800	90º 00	0° 00	0.32		0.267	0.21
		S					
SIDLEY	4285	77º 01	126º 02 W	0.11	0.534		0.22
		S					
TONEY	3600	76º 48	117º 39 W	0.2	0.626		0.37
		S					
TAKAE	3460	76º 17	112º 05 W	0.22	0.608		0.37
		S					

Fuente: NASA. Elaboración propia.

En la figura 156 se muestra el PWV estimado a partir de los datos de Suen et al. (2017), para diversas localizaciones de gran altitud en la Antártida. La escala de altura fue bastante baja, del orden de los 1100 m.



Figura 156. Estimación del PWV (mm.) de lugares antárticos

Fuente: Tomado de Suen et al. (2017).

En la figura 157 se observa un TCC menor o igual al 0.2 en gran parte de la meseta oriental, y de 0.3 a 0.6 en el sector occidental. La resolución es de 5 Km/píxel, con proyección polar. Los colores de escala están invertidos respecto a los elaborados por nosotros.





Fuente: Suen et al. (2017).

En la figura 158 mostramos el TTC para el decenio 2010-2019. Es evidente la supremacía de la zona oriental del continente frente a la zona occidental, donde apenas hay lugares por debajo del 0.4 de TCC. La resolución es de 0. 1º por píxel. Nótese que las zonas muy próximas al Polo Sur no pueden ser reproyectadas con nuestro GIS-QGIS en el sistema EPGS3857.

0,0462 0,1327 0,2193 0,3058 0,3923 0,3923 0,3058 0,3923 0,0462 0,5654 0,6520

Figura 158. TCC sobre la Antártida occidental y oriental (media 2010-2019)

Fuente: MODIS/TERRA (NASA). Elaboración propia.

0,7385 0,8250 0,9116 0,9981 Los lugares situados en la Antártida oriental y señalados como Dome A, Dome C, Dome Fuji y Vostok, son los que concentran, principalmente, el futuro de grandes desarrollos en astronomía óptica e infrarroja, y son, con toda probabilidad, los lugares en los que veamos estos grandes proyectos astronómicos, tal como prevé Cunningham (2009) en su revisión sobre el futuro de la astronomía.

4.6 CHINA EL TÍBET Y MONGOLIA

Esta zona propuesta por nosotros ya tiene varios precedentes por parte de investigadores chinos, que en las últimas décadas están desarrollando estudios de prospección astroclimática y meteorológica en varias partes de China y, especialmente, en la meseta del Tíbet y en regiones montañosas adyacentes al desierto de Takla-Makan (véase a Ye et al., 2016; Zhao et al., 2019; You et al., 2014).

El hecho geográfico más relevante de esta zona es la de presentarse en un área a sotavento de los vientos dominantes, tras la alta cadena de las montañas del Tíbet. Esto da lugar a una sombra de lluvias y nubosidad. Por otra parte, las altas cumbres, en las zonas del NW de China, hacen que sean accesibles altitudes de hasta 6000 metros con todoterreno, y aún son posibles ascensiones relativamente fáciles a altitudes de hasta 7500 m. con equipamiento alpino de altura.

Es evidente que no hay ningún lugar a escala planetaria que posea estas altitudes, con lo que eventualmente estos lugares quizá estén reservados por el gobierno chino para futuras instalaciones científicas. Por lo demás, el hermetismo y las dificultades para acceder a estos lugares hacen muy difíciles las investigaciones contrastadas por científicos de fuera de China, por lo que nuestro intento puede quedar solo en una exposición académica sobre las posibilidades astronómicas de esta región, poco accesible bajo cualquier punto de vista.

Mongolia es un país desértico en su mitad sur, con montañas y mesetas de hasta 4200 m. de altitud, con lo que cabe proponer algunas de estas cimas como probables lugares donde se den excelentes condiciones astroclimáticas, de las que se sabe poco hasta la fecha. El país es muy pobre, con escaso desarrollo científico, y se encuentra en una especie de limbo geográfico, entre Rusia, al norte, y China, al sur. Estos países monopolizan cualquier actividad que pudiese ser sensible desde el punto de vista de la investigación, en este caso astronómica.
4.7 AGUA PRECIPITABLE Y NUBOSIDAD SOBRE EL TÍBET

Los lugares más característicos sobre el Tíbet chino y la región central sur de Mongolia se muestran en la Tabla 16 Se señala con "*" los lugares propuestos por nosotros para posteriores estudios, aparte de los lugares de Ali y de Oma, ya investigados, o en desarrollo, por los chinos (ver bibliografía). Aparece el PWV según las cantidades inferidas con ERA 5 para la altura real del observatorio; y la inferida para tiempo claro con ajuste de los fotómetros solares de la red AERONET, cuyo proceso de obtención puede consultarse en el capítulo de PWV de este trabajo, y que se aplicó a los observatorios de la península Ibérica, Canarias y norte de África. Estos valores ajustados coinciden, de manera razonable, por lo reportado por Ye et al. (2016) y, también, con los calculados por la China Astronomical Site Survey.

LUGAR	ALTITU	<u>LATITUD</u>	<u>LONGITUD</u>	<u>PWV</u>	PROBABLE	<u>TCC</u>	<u>TCC</u>
	D				<u>PWV</u>	(MODIS)	<u>ERA 5</u>
	(metros)			Ajustado	AJUSTADO	2010-	2010-
					AERONET	2019	2019
				ERA 5		0,1°	0,25°
				H.EQU.	ERA5*0,72	PIXEL	PIXEL
<u>GURLA</u>	7750	30º 26 N	81º 17 E	1.1	0.79	0.375	0.64
<u>MANDHATA</u>							
<u>(CHINA) (*)</u>							
<u>MUZTAG ATA</u>	7500	38º 16 N	75º 07 E	1.2	0.86	0.627	0.53
<u>CHINA) (*)</u>							
<u>ALI</u>	5100	32º 20N	80,8 E	3.1	2.23	0.25	0.36
OBSERVATORY							
(CHINA)							
<u>ALI</u>	6000	32º 20N	80,8 E	2.2	1.58	0.26	0.36
<u>OBSERVATORY</u>							
(CHINA)							
<u>COMPLEJO X</u>	6250	31º50 N	80º25 E	2	1.44	0.38	0.4
<u>(CHINA) (*)</u>							
<u>PICO I CHINA (*)</u>	6060	31º 75 N	81º 40 E	2.1	1.51	0,33	0,38
<u>OMA CHINA</u>	5850	32º 33 N	80º 53 E	2.3	1.65	0.447	0.35
<u>OMA NORTE</u>	6750	32º 48 N	81 00 E	1.6	1.15	0.38	0.4
<u>CHINA</u>							
<u>SULAY UUL</u>	4220	46º 37 N	93º 35 E	4.2	3.02	0.59	0.59
<u>(MONG) (*)</u>							

Tabla 16. PWV estimado para diversos lugares de interés astronómico en el Tíbet

<u>TERGUN BOGD</u>	3960	44º 59 N	100º 14 E	4.8	3.45	0.51	0.36
<u>(MONG)(*)</u>							

Fuente: ERA 5 (ECMWF). Elaboración propia.

En la figura 159 aparece el ajuste de altitud frente a PWV mm., para la meseta del Tíbet, y algunos de sus picos. Las altitudes son promedio para cada píxel, y han sido obtenidos a partir de la base de ERA5, con una resolución de 0. 25º/píxel. Estas cantidades están probablemente sobreponderadas, al considerar todos los tipos de tiempo posibles, y por el hecho de que las determinaciones del modelo de ERA5 adolecen de precisión, con cantidades bajas de PWV, más aún en lugares de extrema altitud.



Figura 159. Correlación del PWV frente a la altitud en la zona del Tibet

Fuente: ERA 5 (ECMWF). Elaboración propia.

4.8 EL TOTAL CLOUD COVER SOBRE LA MESETA DEL TÍBET

TCC según ERA 5 durante la década 2010/2019 para la región del Tíbet chino tiene una resolución de 0. 25º/píxel (Figura 160). Aquí se ubican los lugares más prometedores, que ya están siendo investigados, y otros propuestos en este trabajo.



Figura 160. El Total Clod Cover (TCC) en la región de Tibet (media 2010-2019)

Fuente: ERA 5 (ECMWF). Elaboración propia.

Estos lugares presentan baja nubosidad en la zona del observatorio Ali, a unos 5050 m. de altitud. Es posible ascender con relativa facilidad en vehículos todoterreno a altitudes de unos 6000 metros, donde se encuentran lugares, actualmente investigados por lo chinos, como son Oma y Oma norte. Otros lugares de nubosidad en torno a 0.4 serían algunos entornos entre los 6000 y 6500 metros, como el Pico I y Complejo X. Alturas mucho mayores, de 7500 a 7800 metros, pueden ser propuestas, como Muztag Ata (7500 m) y Mandhata (7750 m), donde el TCC se situaría en un contexto menos favorable, del orden del 0.6, aunque aún con un valor factible si se pretende buscar el mínimo de agua precipitable.

En realidad, no es posible ir más arriba en ningún lugar del mundo, pues los picos sobre los 8000 metros son todos muy difíciles de escalar, y menos aún para instalar allí nada permanente, salvo quizá, alguna estación meteorológica automática de poco peso. Aun así, en esta región existen decenas de picos, lomas, cadenas y demás formaciones de montaña, de unos 1000 metros sobre la meseta tibetana, lo cual le confiere un potencial casi ilimitado, dado que poseen accesos relativamente fáciles, y condiciones astroclimáticas muy favorables, aparte de la latitud, en torno a los 30° N., que le confieren una buena cobertura de ambos hemisferios celestes.

4.9 UNA VISIÓN PANORÁMICA DE UNO DE LOS LUGARES PARADIGMÁTICOS PROPUESTOS (MUZTAG ATA)

En la figura 161 aparece el Muztag Ata, "el 7500 más accesible del mundo". Se muestra una visión desde del W, a unos 4000 m de altitud, a partir de los cuales se pronuncia la pendiente, que en el flanco oeste es moderada. Las condiciones de calidad de imagen, viento, nubosidad y agua precipitable solo pueden ser inferidas, al no existir estaciones en las inmediaciones. Probablemente el PWV sea inferior a 0.2 mm. en invierno, rivalizando con las condiciones de Dome A, en la Antártida oriental. La gran lejanía y el hermetismo chino dificultan, en grado sumo, conocer algo más de los estudios de estos lugares para astronomía extrema e infrarroja. Es para esa sección del espectro electromagnético donde previsiblemente se desarrollen nuevos observatorios en décadas futuras. En la actualidad se utiliza como campo de entrenamiento para posteriormente pretender ascender al Everest.

Existe también un proyecto de observatorio chino en la proximidad de la ciudad de Muztag, aunque a una elevación de 4500 m., del que no ha transcendido mucha información. Ello viene a corroborar que, en el fondo, los investigadores chinos están considerando, en algún momento futuro, el asalto a cimas de unos 7500 m., como el que sugerimos aquí.



Figura 161. La montaña de Muztag Ata. Vista desde el lado oeste

Fuente: Google Earth.

En la figura 162 se ofrece la perspectiva desde el sur de la montaña de Lenghu, de 4200 m. Éste es un digno rival para los mejores observatorios del mundo, debido a sus excelentes condiciones astroclimáticas, y el cielo prácticamente incontaminado de luz artificial y aerosoles (Deng, 2021). El proyecto consiste en instalar telescopios de gran tamaño en la zona, e impulsar definitivamente este campo en China.



Figura 162. Una visión panorámica hacia el norte del nuevo sitio astronómico chino de Lenghu y la alta meseta del Tíbet

Fuente: Google Earth.

4.10 ÁFRICA: EL MACIZO DEL TIBESTI

De entre las numerosas zonas del continente africano con posibilidades de desarrollos futuros en astronomía (Alto Atlas, Macizo Etíope y Sudáfrica), nos detendremos, especialmente, en las posibilidades ofrecidas por uno de los más aislados y remotos complejos volcánicos del norte de África, el macizo del Tibesti, el cual alcanza unos 3500 metros de altitud, en los volcanes más elevados, estando, por tanto, relativamente a salvo de las corrientes y las tormentas de polvo, que agitan el desierto del Sáhara hasta alturas considerables, aunque suelen quedar supeditadas al límite de la inversión planetaria, que podemos situar en la zona por debajo de los 200-2500 metros de altitud. Por tanto, las nubes cargadas de polvo que llegan a alcanzar las cimas volcánicas de este complejo lo harían ocasionalmente.

4.10.1 El clima del macizo del Tibesti (Emy Kousi)

El desierto del Sahara, así como en su macizo volcánico central del Tibesti, se volvió definitivamente árido hace unos 2500 años AC (Vernet, 1995).

Las precipitaciones actuales no superaran en ningún caso los 200 mm. en las zonas más elevadas, y según qué años, siendo el valor más probable de 150 mm. anuales en las cimas, esto es, sobre los 3000 metros de altitud.

Se conocen periodos de mayor pluviosidad/nubosidad en el entorno del final de la última glaciación, entre los 8000 y 16000 años a. C. Con periodos de aridez cada vez más acusados, hasta llegar a la situación actual. Un periodo árido y frio se dio en el entorno de 8000 a 2000 años a. C.

El frente polar solo suele alcanzar marginalmente la latitud norte de Tibesti en torno a los 20-22 grados. La circulación del viento superficial es la de los alisios del NE, salvo en la época monzónica, cuando soplan del SW, aunque bien es verdad que apenas alcanzan el macizo montañoso entre abril y agosto. En altitud, sobre los 2000-3500 metros, el predominio de vientos es de componente W.

Las tormentas de polvo generadas por los flujos alisios o monzónicos son frecuentes, pero su intensidad, respecto al número de partículas en suspensión por metro cúbico, disminuyen exponencialmente con la altura y, probablemente, más bruscamente aún, sobre el nivel de la inversión térmica, que podemos situar a 2500-3000 m. durante gran parte del año.

El análisis de imágenes de alta resolución, diurnas en visible y nocturnas en infrarrojo, de la serie de satélites NOAA, MODIS TERRA/AQUA, muestran con frecuencia, y en caso de tormentas de polvo generalizadas en la región, como las cimas aparecen con bastante más nitidez que los terrenos más bajos al nivel del desierto.

En general, pues, estimamos aceptable el nivel de días/noches con cantidades de polvo en suspensión para las zonas cacuminales del macizo del Tibesti, las únicas zonas que pueden reunir niveles aceptables de calidad astronómica, tanto en nubosidad anual como por las condiciones determinadas por la presencia del polvo en suspensión.

De las citadas imágenes de satélite, y después de un minucioso examen de los años 2013 a 2017, hemos obtenido un promedio de días y noches despejados de alrededor de 300. Con una oscilación máxima de +/- 20 días/noches/año. Este es un valor muy elevado y digno de un lugar de excelencia para observación astronómica de propósito general.

La tabla 17 se ha elaborado según las fuentes satelitales y las bases de datos de ERA 5. Como puede observase, la zona presenta un TCC realmente bajo, quizá similar al desierto de Atacama, pues estamos en entornos con valores de 0.2 para este índice de nubosidad. En cuanto al PWV, a pesar de no ser lugares con altitud extrema, presentan valores muy competitivos para permitir realizar las observaciones astronómicas hasta el infrarrojo medio.

LUGAR	ALTITUD	LATITUD	LONGITUD	PWV mm	PWV mm	тсс	тсс	TCC 1	тсс
						ERA 5	MODIS	Km/pix	PROM.
				Ajustado	ajustado	2010-		2000-	
						2019	2000-	2015	TODOS
							2019		
				ERA 5	AERONET	0,25°	0,1º PIX	Wilson	
				H.EQU.		Pixel	(AQUA)	& Jezt	
					ERA5*0,7				
EMI	3450	19º 80	18º 53 E	6.2	4.46	0.25	0.19	0.28	0.24
KOUSI		Ν							
TOUSSIDE	3315	21º 04	16º 47 E	6.6	4.75	0.29	0.24	0.32	0.28
		Ν							
TIBESTI	3110	21º 35	18º 60 E	7	5.0	0.23	0.16	0.26	0.22
CENTRAL		Ν							
BIKKU	2267	22º 05	19º 15 E	9.2	6.62	0.17	0.12	0.16	0.15
		Ν							

Tabla 17. Caracterización astroclimática del macizo del Tibesti

Fuente: ERA 5 (ECMWF) y RED AERONET (NASA). Elaboración propia.

En las latitudes tropicales del Tibesti (Figura 163), en pleno desierto del Sáhara, el PWV aparece significativamente mayor que en determinadas regiones, como la noratlántica, la Ibérica y la Mediterránea.



Figura 163. La dependencia con la altitud del PWV en el Sáhara Central

Fuente: ERA 5 (ECMWF). Elaboración propia.

En la figura 164 se observa un ligero gradiente de W a E para el TCC, con disminución de la ya escasa nubosidad presente, generalmente cúmulos de evolución por la tarde, en la época del monzón, y algún episodio de nubes altas. Estas últimas, en invierno, asociadas a las ondulaciones de frente polar y la corriente en chorro del W. en altura. En las capas más superficiales predomina el alisio del NE durante gran parte del año. Se señalan cuatro de los lugares más característicos donde *"hipotéticamente"* podría ubicarse alguna instalación astronómica.





Fuente: ERA 5 (ECMWF). Elaboración propia.

En la figura 165 mostramos el detalle del edificio volcánico del Emi Kousi. Este volcán forma un anillo de 13 km. de diámetro, y alcanza los 3450 m. de altitud. Se halla situado en el extremo sur del macizo del Tibesti, al norte de la República del Chad. Su altitud es suficiente para mantenerlo la mayor parte del tiempo muy por encima del límite de la inversión planetaria, donde se encuentra atrapado el polvo del desierto, que con frecuencia barre la región desde el NE al SW, impulsado por los vientos alisios.



Figura 165. Imagen del volcán en escudo del Emi Kousi

Fuente: Glogle Earth.

La información que aparece en la tabla 18 está basada en una estimación experta del número de días despejados, nubosos, cubiertos y con polvo en suspensión significativos en el Emi Kousi, de acuerdo con el examen de las imágenes de alta resolución de MODIS/TERRA y AQUA de la NASA.

	DESP (Dia)	NUB (Dia)	CUB (Dia)	Polvo (Dia)
Año				
2013	322	41	2	35
2014	297	62	6	33
2015	311	51	3	33
2016	301	56	8	25
2017	296	64	6	45
Promedio	305.4	54.8	5	34.2

Tabla 18. Caracterización astroclimática del volcán Emi Kousi

Fuente: MODIS/TERRA y AQUA (NASA). Elaboración propia.

4.11 UNA COMPARATIVA DE ÍNDICE AOD (POLVO EN SUSPENSIÓN) SOBRE 4 ENTORNOS DESÉRTICOS Y SUBDESÉRTICOS.

Dado que la presencia de polvo en suspensión podrá significar una fuerte limitación en esta región, hemos presentado las cantidades de aerosol, en promedios mensuales para esta región, con el índice Aerosol Optical Depth (AOD), expresado en décimas, durante una década (Figura 166). Sus datos se han comparado con varios sitios representativos: 1) con los de los desiertos del Sáhara (ADJ. DES), en torno a los 18º latitud N. y 18º E. (Chad); 2) con los del observatorio de Calar Alto de (España), tomado como referencia de observatorio de la zona templada); y 3), con los de Tabernas (Almería), a los pies de la cara sur de la Sierra de Los Filabres, donde se ubica Calar Alto. De la lectura de la figura 165 es evidente que la cima del escudo volcánico del Emi Kousi (Chad) muestra que esta zona presenta excelentes condiciones de transparencia atmosférica, a pesar de hallarse en el centro del mayor y más polvoriento desierto del mundo. La escala de alturas de la concentración de polvo, que disminuye logarítmicamente con la altitud, y la presencia constante de vientos alisios del NE, hasta unos 2000 metros de altitud, garantizan una captura eficaz del polvo en las capas bajas, sobre el desierto del Sáhara. Incluso, según esta misma fuente de información, esta zona, en determinados momentos del año, muestra mejores condiciones que Calar Alto.



Figura 166. Una evaluación del AOD para entornos desérticos, semidesérticos y semiáridos

Fuente: RED AERONET (NASA). Elaboración propia.

5 UN ESTUDIO DE CASOS EN OBSERVATORIOS DEL SE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

5.1 EL CASO DE CALAR ALTO (ALMERÍA). PROPUESTA DE UNA POSIBLE EXPANSIÓN

De lo deducido a través de distintas variables astroclimáticas, nos permitimos hacer alguna recomendación, en el caso de abordarse alguna expansión de las instalaciones y cúpulas, en el observatorio de Calar Alto.

En concreto, se ha podido deducir posibles mejoras en el seeing en nuevas ubicaciones en zonas de la cima. Se plantea que las condiciones serían sesiblemente mejoradas si considerásemos elevaciones artificiales, de unos 30-50 m en los telescopios, que se pudiesen situar en el extremo W y N de la cima, alrededor de 1.5 km. de las actuales instalaciones (Figura 167).



Figura 167. La montaña de Calar Alto (Sierra de Los Filabres, Almería)

Fuente: Mapa topográfico nacional. Escala 1:8500.

En cuanto a la tipología de esta elevación artificial de 30-50 m., se pueden sugerir edificios altos, postes o plataformas elevadas y quizá, una solución más amigable con el entorno sería la acumulación de roca, tierra y vegetación en un nuevo montículo, con inclinación superior al 20%. Esto causaría un impacto visual mínimo, y se eliminaría igualmente el efecto nocivo de la turbulencia en los primeros 30 m. sobre el suelo. Se indica, con círculos rojos, la posición aproximada de estas nuevas localizaciones optimizadas, frente el flujo de aire dominante (Figura 167). Las condiciones microtermales en la capa límite han resultado ser aquí algo más favorables que en los lugares donde se ubican las actuales cúpulas astronómicas del observatorio, según las medidas efectuadas por el autor mediante drones, equipados con medidores de temperatura, que aprecian milésimas de °C, entre dos sensores separados un metro entre sí, y volando hasta niveles de 150 m. sobre el suelo.

La notable mejora de las condiciones de la fuerza de turbulencia, a partir de unos 20 m. de altura, cuyo estudio está en ejecución en este momento, sugiere que es posible tener condiciones de imagen FWHM inferiores a 1 segundo de arco, durante al menos el 50% de las noches usables.

Todo ello sugiere la posibilidad real de instalar grandes telescopios de la clase 8 m. de apertura, o todavía mayores, en este enclave astronómico.

Adicionalmente, se podría lograr en esta nueva extensión una mejora notable respecto a las condiciones de inversión local, sobre todo en los niveles de humedad durante la noche, cosa que se da en este observatorio y en otros, con cierta frecuencia, incluso con condiciones meteorológicas más estables. El hecho es que se suele formar en la zona del observatorio una capa de niebla a ras del suelo, de unas decenas de metros de altitud. Este efecto apenas rebasa los 30-50 m. de altura, por ello las molestas condensaciones se podrían evitar en su totalidad, o en parte.

Las condiciones en cuanto a PWV, aerosoles, logística o contaminación lumínica, apenas son susceptibles de mejorar en el lugar del observatorio actual.

Para la comprobación final de estos supuestos, sería imprescindible un estudio con torre de 30 m. de altura en la zona W, equipada con sensores microtermales, temperatura, humedad relativa y viento. Estos valores serian cotejados con los de la actual estación meteorológica en la cima del monte, próximo a la cúpula del 3,5 m.

5.2 EL CASO DE SIERRA NEVADA. PROPUESTAS DE NUEVAS UBICACIONES

El observatorio óptico de Sierra Nevada se sitúa en la Loma de Dílar, a 2880 m. de altitud, en la zona de la estación de esquí de Sierra Nevada. Presenta algunas limitaciones que sería interesante considerar, como el aumento incontrolado de la contaminación lumínica, derivada de las instalaciones de la estación de esquí, las urbanizaciones conexas, la gran aglomeración de Granada y una veintena de municipios

cercanos. Este es un asunto de difícil solución, que afecta gravemente a las condiciones de observación astronómica. Por otro lado, tenemos un horizonte este bastante obstruido por la masa montañosa del Pico Veleta y la línea de cumbres, a más de 3000 m. de elevación.

Entre otras posibles ubicaciones, nosotros proponemos el sector norte de Sierra Nevada (Figura 168), en el que aparecen cumbres cercanas a las 3200 m., constituidas por lomas redondeadas o alargadas que, además, están más alejadas de los núcleos contaminantes por luz parásita nocturna. Así, de acuerdo con el nuevo atlas mundial de contaminación lumínica (Falchi et al., 2016), el incremento de magnitud cenital en el visible sería del orden de 0.08 mag/arcsec². en esta zona; mientras que la actual ubicación de Borreguiles se sitúa en torno a 0.14 mag/arcsec². El número de días en que el suelo permanece nevado en esta zona es bastante menor que en la zona de Borreguiles, donde se asientan los observatorios actuales. En el gráfico indicamos tres de estas posibles ubicaciones (círculos rojos). Tanto en el caso de astronomía óptica como infrarroja o radio se conseguirían ventajas adicionales, debido a un menor contenido de agua precipitable (PWV) respecto a los lugares actuales, donde se sitúa el Observatorio óptico OSN, como el radio de IRAM. Es presumible, también, una mejora en calidad de imagen o seeing, respecto al actual OSN, con un FWHM de unos ~0.8 segundos de arco. Valor este muy en línea con los mejores observatorios del mundo



Figura 168. El sector norte de Sierra Nevada (Granada, España)

Fuente: Mapa topográfico nacional. Escala 1:17000.

La actual clasificación de las altas cumbres de Sierra Nevada, como Parque Nacional, puede suponer una gran limitación a la hora de planificar alguna nueva infraestructura, que requiera obra civil, aunque su fin sea estrictamente científico. No obstante, es posible diseñar nuevas instalaciones con un impacto medioambiental mínimo. Esto solo se plantearía cuando exista un proyecto de observatorio, definido en sus dimensiones y objetivos.

5.3 EL CASO DE LA EXPANSIÓN DEL OBSERVATORIO DE LA SAGRA

La Sierra de La Sagra (Figura 169) podría ser el mejor candidato en la península lbérica para instalar un observatorio astronómico que requiera máxima resolución espacial y mínima turbulencia atmosférica, para albergar un observatorio óptico. Además "su" cielo está muy poco contaminado por luz parásita (o contaminación lumínica), procedente de ciudades e industrias. De acuerdo con Falchi et al. (2016), la contaminación lumínica en el visible y al cenit no superaría la dos centésimas de magnitud, respecto a un cielo sin contaminación artificial. Asimismo, la disponibilidad de la cima es óptima respecto al flujo de aire en cualquier dirección posible. La logística y el presupuesto para su estudio a fondo son dos aspectos pendientes aún del trabajo del autor, que se ha mantenido con breves visitas a la cima desde 1981. Este es un lugar en el que está todo por hacer, debido a que no hay accesos rodados a la cima.

Actualmente, existe un incipiente observatorio astronómico, con dos estaciones de observación, en el sector norte de la Sierra de La Sagra, situados a alturas de 1550 y 1800 m. En estas estaciones se ha podido comprobar que las condiciones de observación han resultado buenas al nivel de 1550 m., y excelentes a 1800 m. Ambos lugares están desligados del macizo principal, en montículos separados, y no mostrados en la imagen. Ello permite augurar condiciones "casi extraordinarias" en la cima, a 2,381 m. de altitud.



Figura 169. La montaña de la La Sagra (Granada, España)

Fuente: Mapa topográfico nacional. Escala 1:8500.

El concepto de estaciones remotas de observación, desarrollado en las últimas décadas, puede ser una interesante alternativa para este lugar (cima de La Sagra), con respecto a otros observatorios astronómicos de tipo científico profesional (Chile, Isla de la Palma, etc.).

5.4 UN CASO OLVIDADO CON BUENAS CARACTERÍSTICAS ASTRONÓMICAS: SIERRA DE GÁDOR (ALMERÍA)

A pesar de ser un lugar con excelentes características astroclimáticas ha sido olvidado por la comunidad astronómica desde los años 60, cuando los franceses consideraron la posibilidad de instalar un gran telescopio infrarrojo que, finalmente, decidieron llevar a Mauna Kea (Hawai) (Cayrel, 1983). La Sierra de Gádor tiene una altitud considerable (2250 m., con mayor altura que Calar Alto, también en la provincia de Almería). Sus principales atractivos son que tiene unas extensas explanadas y montecitos pronunciados, muy apropiados para instalaciones científicas en su cima (Figuras 170 y 171), con, al menos, 6 cimas individualizadas por encima de los 2100 m altitud. Dispone de buenos accesos, herencia de la actividad minera del pasado, que se quiere revitalizar, logística muy conveniente, gran cercanía al mar, y el clima es bastante

estable a lo largo del año. El número de noches despejadas es elevado (~220), tratándose de una montaña que hace las veces de isla continental, muy cercana a la costa.

No obstante, la comunidad astronómica parece haber asumido, quizá apriorísticamente, que la cercanía a ciudades, relativamente importantes, como son Almería, Roquetas, El Ejido y Adra, pueden constituir una fuente muy importante de contaminación lumínica nocturna, al menos en la parte visible del espectro. Este sería un espacio geográfico adecuado para ensayar una legislación sobre contaminación lumínica permisiva, tanto para iluminación exterior, como para uso científico en astronomía y hábitat natural.



Figura 170. Mapa fisiográfico del entorno de la Sierra de Gadór

Fuente: Mapa topográfico nacional. Escala 1:270,000.





Fuente: Wordlview. EOSDIS (NASA).

A pesar de ello, las luminarias modernas de LEDs pueden dirigir con precisión la iluminación, evitando emitirla hacia el cielo, por lo que es abordable el problema hasta cierto punto. Esto debe contar con legislación, horarios y tipos de luminarias adecuadas, entre otras consideraciones.

También sería posible la observación solar, pues no existe ningún observatorio solar en la península Ibérica.

Son también posibles observatorios dedicados a longitudes de onda donde no interfiere la contaminación lumínica, como los de radio, los submilimétricos, los infrarrojos, o los de microondas, etc.

Por estos motivos, nos vemos obligados a indicar la necesidad de subsanar este grave olvido, pues se trata de un lugar con potencial, si se desea tener un cúmulo de facilidades logísticas, y condiciones de estabilidad de imagen aceptables, alta trasparencia y muchos días despejados.

6 DISCUSIÓN

Los valores medios anuales del PWV, a la altitud de los mejores observatorios, a nivel mundial, parecen centrarse en el rango de 1-3 mm. Bien es cierto que, si consideremos las cantidades de PWV calculadas para los altos volcanes del norte de Chile y Argentina vemos que se mueven en un rango de 0.3-1 mm. Aquí pues esta variable se presenta con unas cualidades astronómicas notablemente superior. Solo existe un escalón más favorable de PWV en el rango de 0.1-0.3 mm., y que se encuentra solamente en la Antártida oriental, concretamente en los Dome, A, B, C y F.

La única alternativa a la alta meseta Antártica es la zona de los altos volcanes de Chile-Argentina y, quizá, eventualmente, las cotas superiores a los 6000 m en el Tíbet chino.

En nuestra región, que comprende todo el mediterráneo occidental, Alpes, península Ibérica, Atlas marroquí y Canarias, solo observamos ciertas posibilidades en el infrarrojo en el SE Peninsular (Sierra Nevada), Alpes o elevaciones sobre los 4000 m. en el Atlas marroquí, donde las cantidades promedio anuales de PWV apenas llegan a los 3 mm. Siendo el caso de Sierra Nevada el más favorable, con medidas para el invierno de hasta 2 semanas de duración continuada inferiores al 1 mm. (Quesada, 1989), lo cual es equiparable a los mejores lugares de Chile (VLT y ELT) y Hawái (Mauna Kea).

La Sierra de La Sagra ofrece una oportunidad única para mejorar las condiciones de sus actuales instalaciones, que están a un nivel muy inferior al de su cima, particularmente en cuanto a calidad de imagen.

En la Sierra de Los Filabres el observatorio de Calar Alto podría mejorar, substancialmente, en calidad de imagen y humedad relativa, si se instalan nuevas cúpulas algo elevadas sobre el suelo (30 m.), en los sectores W y N de la montaña. El resto de las cúpulas puede seguir en la ubicación actual, sin interferir con la idea propuesta. Para su determinación definitiva, una evaluación de estos asertos, mediante torres meteorológicas de 30 m., con sensores microtermales, sería la propuesta más económica y viable. Es un lugar con bastante recorrido desde el punto de vista astronómico, por la cantidad de noches observables al año (>200), por la calidad de imagen que puede disfrutarse y por tratarse de un lugar completamente provisto de servicios para un gran observatorio astronómico.

7 CONCLUSIONES

La Antártida, en su conjunto, la cadena de los altos Volcanes de Chile-Argentina y el Tíbet son, por este orden, los lugares donde sería posible desarrollar nuevos observatorios en el extremo infrarrojo-submilimétrico, al tiempo que para el caso de la calidad de imagen o seeing no está demostrado que pudiese ser sustancialmente mejor que en los lugares de altitud algo inferior, ya desarrollados, pero de climatología no tan extrema.

Los lugares propuestos a futuro en África, pese a ser notables en sus características astroclimáticas, son muy poco esperanzadores en un contexto social, económico y político, si nos referimos a países como Sudán o Etiopía, donde parecen hallarse algunos lugares notables.

Nuestro trabajo indica que posibilidades de mejora en los observatorios astronómicos del SE de la península Ibérica. Para ello ha de surgir una oportunidad científica objetivable, que haga viable dichas extensiones.

Es muy difícil sugerir lugares nuevos a los ya existentes o propuestos para su desarrollo en astronomía. La cantidad de variables y factores, de todo tipo, involucrados, sugieren que, tal vez, una "Inteligencia Artificial" (IA) pueda hacer mejor este trabajo.

Finalmente, hay que indicar que ya se está trabajando en la construcción de observatorios en los Andes chilenos, a altitudes de 5650 m. Por ello, este esbozo de propuestas futuras no está lejos de lo que ya es una realidad, donde se sugieren lugares algo más elevados (unos 1000 m.).

BIBLIOGRAFÍA

ECMWF. ECMWF Reanalysis v5 (ERA5). Recuperado de https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5

Cavazzani, S., Ortolani, S., & Zitelli, V. (2012). Site testing at astronomical sites: Evaluation of seeing using satellite-based data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 419(4), 3081-3091. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.19949.x

Cayrel, R. (1983). ESO Workshop on Site Testing for Future Large Telescopes: La Silla (4-6 October 1983). En A. Ardeberg & L. Woltjer (Eds.), *Proceedings*. January 1984.

Cunningham, C. (2009). Tecnologías futuras para telescopios e instrumentos ópticos e infrarrojos. *Experimental Astronomy*, 26(2), 177-199.

Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C. M., Elvidge, C. D., Baugh, K., Portnov, B. A., Rybnikova, N. A., & Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2(6), e1600377. doi: 10.1126/sciadv.1600377

IAU Symposium N^o 19. (1962). Site testing, Roma, 1-6 Ottobre 1962. Recuperado de https://www.beniculturali.inaf.it/opac/archivi/iau-symposium-n-19-site-testing-roma-1-6-ottobre-1962

Deng, L., et al. (2021). Lenghu on the Tibetan Plateau as an astronomical observing site. *Nature*, 596(7872), 353-357. doi: 10.1038/s41586-021-03711-z

NASA (s.f.). Worldview. Recuperado de https://worldview.earthdata.nasa.gov/

Quesada, J. A. (1989). Precipitable water vapor content above Pico Veleta. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 101(441), 441. doi: 10.1086/132454

NASA (s.f.). Aerosol Robotic Network (AERONET). Recuperado de https://aeronet.gsfc.nasa.gov/

Silva, B. K. (2020). Stars, mules, and interferometers in early transnational astronomy in 1960s Chile. En *Environment & Society Portal, Arcadia*. Recuperado de https://www.environmentandsociety.org/arcadia/stars-mules-and-interferometers-earlytransnational-astronomy-1960s-chile

South Pole (2024). Richard E. Byrd (1888-1957). Byrd Antarctic Expedition III (1939-41). The United States Antarctic Service Expedition. Recuperado de https://south-pole.com/p0000109.htm

Suen, J. Y., Fang, M. T., & Lubin, P. M. (2013). Global distribution of water vapor and cloud cover—Sites for high performance THz applications. *Transactions on Terahertz Science and Technology*, 4(1), 86-100. doi: 10.1109/TTHZ.2013.2294018

Vernet. R. (1995). Climat Anciens du nord de LÁfrique. París, Francia: Editorial L'Harmattan.

Instituto Geográfico Nacional (IGN). Iberprix. Ortofotos y cartografía. https://www.ign.es/iberpix2/visor

Walker, M. F. (1971). Polar star-trail observation of astronomical seeing in Arizona, Baja California, Chile, and Australia. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 83(493), 401-422. doi: 10.1086/129147

Walker, M. F. (1971). Polar star-trail observation of astronomical seeing in Arizona, Baja California, Chile, and Australia. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 83(493), 401-422. doi:10.1086/129147

Walker, M. F. (1983). ESO Workshop on Site Testing for Future Large Telescopes: La Silla, 4-6 October 1983; proceedings (A. Ardeberg & L. Woltjer, Eds.). Princeton University Library Catalog. doi: 10.1234/56789

Wilson, A.M., Jetz, W. (2016). Remotely Sensed High-Resolution Global Cloud Dynamics for Predicting Ecosystem and Biodiversity Distributions. *PLoS Biology*, 14(3), e1002415. doi: 10.1371/journal.pbio.1002415

Ye Quan-Zhi, Meng Su, Hong Li, and Xinmin Zhang, *(2016)* Tibet's Ali: Asia's Atacama? *Mon. Not. R. Astron. Soc. 000, 1–5* doi: 10.1093/mnrasl/slv188

You, Q., Jiao, Y., Lin, H., Min, J., Kang, S., Ren, G., & Meng, X. (2014). Comparison of NCEP/NCAR and ERA-40 total cloud cover with surface observations over the Tibetan Plateau. *International Journal of Climatology*, 34(8), 2529-2537. doi: 10.1002/joc.3852

Zhao C, Chen Y, Li J, et al. (2019). Fifteen-year statistical analysis of cloud characteristics over China using Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer observations. *International Journal of Climatology*, 39:2612-2629. doi: 10.1002/joc.5975

CAPITULO IX

SÍNTESIS FINAL DE LA TESIS

DE SINOPSIS HISTÓRICA

Pensamos que, desde la celebración del Simposium nº19 de la Unión Astronómica Internacional (IAU), celebrado en Roma en 1963, no se ha vuelto a presentar un trabajo tan inclusivo desde un punto de vista conceptual, que englobe tantos aspectos del "site testing". Y ello a pesar de las limitaciones técnicas de la época, pues eran aún muy primitivas. De hecho, sólo se disponía de cámaras fotográficas y detectores de tubos de vacío fotomultiplicadores. Aun así, el plantel de especialistas, reunidos bajo la coordinación de Jean Rosch, permitió la ejecución de una obra que no ha podido ser superada, a nuestro juicio, en visión y alcance geográfico de localización universal de observatorios y de propuestas. Por ello, esta tesis ha de rendir tributo de agradecimiento hacia aquellos primeros maestros en el arte y ciencia que hoy nos ocupa, sesenta años después.

Han cambiado los recursos técnicos, pero no los sueños de los astrónomos, siempre detrás de alcanzar el "lugar ideal" para investigación astronómica. Del telescopio de Galileo, a principios del siglo XVII, con apenas dos o tres centímetros de apertura, al telescopio E-ELT de la ESO, con 4000 cm de apertura, han pasado apenas 400 años. El poder colector de luz de los telescopios se ha multiplicado, pues, por un millón de veces.

En las próximas décadas se esperan desarrollos astronómicos, con base en tierra, con aperturas de telescopios de 100 metros o más de diámetro (tal es el caso del proyecto OWL). Un instrumento tal quizá permitiese el estudio detallado de millones de planetas similares a nuestra Tierra, eso solo en nuestra galaxia. Este u otro proyecto de diferente diseño y potencia abrumadora será construido, pues, con toda probabilidad, en las próximas dos o tres décadas.

Nunca se avanzó tanto en la comprensión del universo como en las últimas dos o tres décadas. Si hubiese que comparar con hitos históricos anteriores diríamos que hemos avanzado más de 1000 años. En todo caso, parece ser que la tasa de descubrimientos y la masa de datos astronómicos crece de manera exponencial.

DE NUBOSIDAD

La disminución de la nubosidad en los observatorios de la península Ibérica y del Mediterráneo occidental, respecto a los valores de principios del siglo XX, hace que nuestros observatorios sean realmente competitivos, frente a las regiones más idóneas del planeta, como son el SW de EE.UU., norte de Chile y Asia central; más aún, cuando el sur de España tiende a una notable disminución de la nubosidad y a un aumento de noches observables; condicionante éste de los más críticos para los astrónomos y las instituciones científicas.

En nuestro trabajo, hemos comprobado que la línea 0.4 del TCC es particularmente sensible y un buen indicador de las tendencias decadales y seculares. Este estudio muestra la progresiva extensión de la línea del 0.4 del TCC alrededor de los grandes desiertos templados y tropicales y de su área de influencia; y, como efecto contrario, un relativo aumento de la nubosidad en las áreas centrales de dichos desiertos, afectando a una extensión de muchos millones de Km². Esta variación, aparentemente lineal, deberá ser estudiada más en profundidad en el futuro, conforme tengamos bases más fiables a más largo plazo, como las del ERA 5 y MODIS TERRA/AQUA. Bien es cierto que, incluso estas bases de datos de reconocido prestigio internacional deben manejarse con cautela, particularmente, en lugares de gran altitud, latitud e insularidad, pues aquí el TCC suele contener sesgos.

De nuestro estudio se desprende que existen aún lugares de muy baja nubosidad (TCC), con una rápida expansión del área del 0.4, con pocos o sin ningún observatorio relevante; y otras zonas en las que se ha instaurado en las últimas décadas un régimen de nubosidad muy bajo, con TCC <<0.4, por lo que sería recomendable abordar futuros estudios, en un contexto de prospecciones de prueba de sitios, "site testing", orientados a buscar emplazamientos óptimos para nuevos observatorios astronómicos y radioastronómicos. De nuestro estudio de casos, sobre los observatorios de la península lbérica, se deduce que un valor del TCC del 0.4 viene a significar el disponer de >200 noches despejadas al año; lo cual es un valor notable de cara a tener instalaciones astronómicas muy costosas, que de otra forma estarían infrautilizadas.

Los datos de nubosidad deducidos con nuestro trabajo sitúan al SE de la península Ibérica como una zona de máximo interés en investigación astronómica, la cual hay que preservar, potenciar y difundir, por su potencial para la investigación.

DE AEROSOLES Y EXTINCIÓN ATMOSFÉRICA

Hemos podido observar que, junto a causas puramente naturales (aerosoles de los desiertos, cenizas y gases volcánicos), aparece la presencia constante de aerosoles de tipo antropogénico en la atmósfera de toda la Tierra. Ello se debe, principalmente, a la actividad minera y a las emisiones industriales, cuando no a los incendios forestales, siendo muy importante la emisión de aerosoles en los países en vías de desarrollo durante la época de la quema de rastrojo. Resultan paradigmáticos los casos de China, India, Brasil y los países del Sahel. Países que dan cuenta de la mayor parte de estas emisiones, principalmente de humo, cuyas partículas, muy finas, pueden persistir semanas o meses en la atmósfera, antes de poder ser arrastradas por la lluvia, y la gravedad terrestre, principalmente.

De todos los lugares investigados con observatorios astronómicos, así como según las observaciones de los satélites de órbita terrestre, se deduce que los lugares a altas latitudes (Antártida y Ártico), o a grandes altitudes (Andes, Tíbet), son los que están libres, o casi libres, de polvo y aerosoles atmosféricos, en el sentido de que puedan interferir en las medidas astronómicas, aún con los más sensibles detectores.

Se observa una alta variación del espesor óptico de aerosoles (AOD) en los lugares investigados, existiendo bastantes estudios regionales y pocos estudios globales sobre el AOD. Al ser un fenómeno más geofísico-climático, no suele tener excesivo registro en la toma de datos de los observatorios astronómicos, deduciéndose los contenidos de aerosoles a partir de las propias medias fotométricas estelares, efectuadas con los instrumentos acoplados al telescopio y, más raramente, a partir de instrumentos dedicados a estudiar la extinción.

En un contexto planetario, nuestra región de la península Ibérica y Canarias, tienen buenas características de transparencia atmosférica, con índices del AOD desde moderados a bajos.

La zona SW de Norteamérica mantiene también un nivel alto de trasparencia, si bien en línea con lo observable en la península Ibérica.

La región norte de Chile y la Cordillera de los Volcanes parecen mostrar los índices del AOD más bajos durante todo el año, al menos en la región templada del planeta.

Finalmente, en las regiones del Tíbet y las polares, se dan cielos completamente trasparentes, con bajísimos contenidos de polvo y aerosoles, si bien existe alguna discrepancia en los datos, dependiendo de la procedencia y el método de análisis.

Las erupciones volcánicas más importantes, de las que se tienen datos, ocurren varias veces por siglo, llegan a obscurecer los cielos de todo el planeta durante muchos

meses, siendo el caso de la erupción del Volcán de la Isla de la Palma, en 2021, un caso menor, pues sus efectos han sido ostensibles pocos meses y muy centrados en la zona de la erupción, donde, por otro lado, existen observatorios astronómicos importantes.

Dada la dispersión de estudios sobre aerosoles y fuentes de datos, normalmente orientados a estudios muy específicos (geofísicos, astrofísicos, climatológicos, etc.), cada uno con sus propios índices y una jerga corporativa diversa, nuestro trabajo entendemos que puede contribuir a aportar una cierta homogeneidad y una visión de conjunto, con vocación esclarecedora acerca de la importancia de los aerosoles atmosféricos en las condiciones de observación de los modernos observatorios astronómicos. Asi, hemos señalado algunos de los lugares o regiones donde la concentración antropogénica o natural de aerosoles puede arruinar la observación astronómica durante meses y, excepcionalmente, durante años.

Por orden de importancia, quizá sea el aerosol de los desiertos el más pertinaz y dañino, seguido por los humos de incendios de todo tipo y, finalmente, el debido a las erupciones volcánicas, fenómeno más acotado espacial y temporalmente, aunque puede ser de gran intensidad.

DE AGUA PRECIPITABLE (PWV) E INVERSIÓN TÉRMICA

Los diferentes estudios referidos en nuestro trabajo han partido de presupuestos limitados en el tiempo y el espacio. De la misma forma que, nuestras determinaciones del PWV atmosférico (Precipitable Water Vapor), sobre cada región u observatorio astronómico concreto, ha conocido también estas limitaciones. Por otro lado, las discrepancias sobre la determinación del PWV se han ido limando con el tiempo, conforme avanzaron las técnicas de medida, tanto en superficie como a bordo de globos o de satélites. El uso intensivo de bases de datos, frecuentemente reanalizados, es de una ayuda inimaginable hace tan solo unas pocas décadas.

Nuestro estudio, sobre el conjunto de la superficie terrestre, no permite incidir, con profundidad, sobre cada aspecto limitante del PWV en la generalidad de los observatorios. Bien es cierto que, también hemos prestado atención a unos casos concretos, y más centrados en nuestra región del Mediterráneo occidental. A pesar de ello, se ofrece una visión integradora y universal del problema del estudio del PWV, indicando, sin duda, donde y como seguir investigando. También, dependiendo del problema astronómico a resolver, se exigen unos mínimos del lugar para esta variable de PWV, lo cual suele condicionar el enfoque de los trabajos que nosotros hemos referido.

Se ha obviado la discusión teórica de los fundamentos de las técnicas indicadas, ya que esto corresponde más a la física atmosférica que a la geolocalización práctica de los observatorios.

Se ha podido observar la modestia con que comenzaron los primeros investigadores en su entorno inmediato de trabajo; y como, poco a poco, se fueron expandiendo por el mundo, hasta los más difíciles entornos geográficos y climáticos. Los proyectos de la astronomía infrarroja y submilimétrica se fueron volviendo más ambiciosos. Actualmente, la investigación del agua precipitable está centrada en tres grandes núcleos o "cluster" astronómicos, como son las inmediaciones del desierto de Atacama (Chile), el Tíbet chino y la alta meseta Antártica. Todos ello con cantidades ínfimas de vapor de agua sobre la atmósfera del lugar. Estos lugares están a gran altitud, entre los 3000 y 6000 m., y con temperaturas medias muy bajas, con frecuencia de -30 a -70° C.

Las técnicas de medición se han vuelto muy sofisticadas, al igual que en los demás parámetros y variables relevantes para el desarrollo de la astronomía. De esta forma, se hace un uso intensivo de las grandes bases de datos históricas, series climáticas y los datos e imágenes proporcionados por los satélites meteorológicos, procesados con algoritmos de tratamiento complejos, apoyándose, con frecuencia, en modelos también muy elaborados, a fin de ofrecer las condiciones probables actuales y futuras, en casi cualquier lugar de la Tierra.

Nosotros apreciamos que prácticamente la totalidad del continente Antártico presenta buenas o excelentes condiciones para la astronomía infrarroja y de radio submilimétrica. Los lugares costeros, a baja altitud, deberían excluirse de los lugares más prometedores, habida cuenta de su mayor concentración de PWV; si bien sus ventajas logísticas son evidentes respecto a las bases científicas del interior continental.

Aun así, debemos indicar que persisten algunas lagunas y dudas, respecto de hasta donde se podrá llegar físicamente con los observatorios futuros, en entornos con posibilidades logísticas complejas, como son zonas de extrema altitud y con bajísimas temperaturas que, a buen seguro, permitirán la progresiva implantación de observatorios de gran eficiencia, con poca o nula atención humana, y operados de manera remota, cuando no automática. En este sentido, en el futuro inmediato se irá desdibujando la diferencia en la forma de operar de estos observatorios remotos en tierra, con aquellos situados en el espacio. Estos observatorios son con los que necesariamente se habrá de contar en los programas de investigación actuales, de los que citaremos, como más impactantes, aquellos relacionados con la búsqueda de "exoplanetas" y el estudio de sus condiciones ambientales, superficiales y atmósféras; y ello con el anhelo de encontrar signos de vida creíbles e indiscutibles. Así, frente a la

ignorancia en este campo de hace solo dos o tres décadas, se abre un periodo realmente emocionante.

Sierra Nevada aparece como una isla de interés para la astronomía infrarroja dentro de Europa continental, debido a su excelente logística y exiguas cantidades nocturnas de PWV, del orden de los 2 mm. Estas observaciones fueron íntegramente realizadas por el autor, en la década de los 80 del siglo pasado y a comienzos del siglo actual, de manera reiterativa. Esto cualifica a la misma como lugar posible de futuros emplazamientos para la observación en estas longitudes de onda. Considérese al respecto, que no tenemos actualmente ninguna estación para estos menesteres, si exceptuamos el observatorio milimétrico de IRAM, en las cercanías de Pico Veleta, el cual corrobora las excelentes condiciones en esta localización. Adicionalmente, no hemos detectado variaciones significativas o tendenciales en esta región de la península lbérica, si bien, en otras regiones, se han observado incrementos del PWV, cuando se consideran varias décadas seguidas.

DE CONTAMINACIÓN LUMÍNICA

Desde las primeras conceptualizaciones del brillo de fondo de cielo, en los años 20 del siglo pasado, a los umbrales de la segunda década del Siglo XXI, hemos asistido a un cambio radical respecto a la concepción y percepción de lo que es y significa la contaminación lumínica.

Hasta la II Guerra Mundial el problema parecía circunscribirse al ámbito de la perturbación del cielo nocturno por luz de origen casi exclusivamente natural, como es el "airglow" o brillo del aire, el fenómeno de las auroras en las altas latitudes de la Tierra, la luz zodiacal u otros fenómenos eléctrico-atmosféricos.

Con el desarrollo industrial, y la implantación y expansión de la iluminación exterior de viales, autovías, fábricas y comercios, el problema de la contaminación lumínica ha alcanzado una dimensión diferente, y mucho más grave que aquélla de origen natural. De hecho, incluso está muy debatido el tema de los efectos de la iluminación artificial en la salud humana y en los ecosistemas.

Por otro lado, los periodos de recesión económica, como la crisis de 2008 y siguientes, parecen haber tenido algún pequeño efecto en la disminución de emisiones de luz parásita, al menos es lo que se ha observado en países muy afectados como España, con cierre de numerosas industrias y otras actividades con iluminación exterior. También, la reciente crisis derivada de la COVID 19 puede haber tenido un pequeño efecto en la iluminación exterior; en este caso la repercusión puede considerarse casi universal, por el cese de numerosas actividades.

La medida de esta variable, importantísima en observación astronómica, ha pasado de ser un ejercicio académico, de análisis espectral de rayas de emisión emitidas por la atmósfera de la Tierra, a ser monitorizada, de manera regular, mediante satélites artificiales de última tecnología, que cubren la Tierra en su totalidad y diariamente.

La potencia de cálculo de los ordenadores actuales ha permitido elaborar modelos predictivos del fenómeno, con un gran alcance espacio-temporal.

El panorama legislativo existente es exiguo y, en algunos casos, es inexistente, a pesar de tener espacios naturales de alto valor e instalaciones astronómicas importantes. En este caso, la ley va muy por detrás de los modelos propuestos por los astrónomos y otros científicos del ámbito medioambiental.

En el caso de España, solo Canarias dispone de una ley de protección del cielo plenamente desarrollada y con reglamentos efectivos, aplicados de momento en la Isla de la Palma y, en menor medida, en Tenerife; a la postre, sede de importantes observatorios astronómicos y meteorológicos de nivel internacional. Además, las Islas Canarias cuentan con una superficie bastante grande dedicada a espacios "naturales" protegidos, algunos con categoría de Parque Nacional.

Nosotros entendemos que algo similar debiera considerarse en el resto de España, para la red de Parques Nacionales, Parques Naturales y otras reservas importantes. Y ello porque, pese a contar con importantes medidas de protección, la contaminación por luz artificial del cielo nocturno no está específicamente considerada, menos aún desarrollada.

El caso de Andalucía es bastante lamentable, ya que, aunque se aprobó en 2010 una Ley de Protección del Cielo Nocturno y unos reglamentos para hacerla efectiva, el caso es que se encuentra paralizada, sine-die, sin que exista de momento una fecha por parte de la administración para volverla a poner en funcionamiento.

En mayo de 2016 el decreto ha sido anulado por Sentencia Judicial, alegándose defecto de forma en la tramitación de la norma. Como resultado, la Junta de Andalucía debe volver a tramitar la aprobación del reglamento.

El siguiente fragmento del Decreto 357/2010, de 3 de agosto, nos parece especialmente revelador:

"El incremento de instalaciones de iluminación exterior provistas de diodos leds de tipo blanco, parece estar perjudicando de manera especial la zona del espectro del azul entre los 400-500 nm. Lo que en un principio parecía un aumento de la eficiencia energética en alumbrado exterior ha resultado en detrimento de la calidad del cielo en áreas y zonas del espectro observacional muy sensibles". (Ya con nuestra tesis cerrada, hemos sabido que finalmente la Junta de Andalucía aprobó el reglamento de iluminación exterior, Decreto 37/2025, de 11 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento de protección frente a la contaminación lumínica en Andalucía).

DE TURBULENCIA

El "seeing" no está completamente desligado de las demás variables estudiadas en esta tesis, pero no necesariamente ha de estar correlacionada con la mayoría de ellas, sobre todo las que no participan del fenómeno de la variación espacio-temporal de la turbulencia atmosférica.

En nuestras medidas experimentales, registradas con drones equipados con sensores microtermales, el RMS resultado del diferencial de temperatura en la horizontal (a una distancia de 1 m) es bastante bajo a partir de unos 100 m de altura. Dicho de otra forma: "a 100 m de altura todos los lugares parecen razonablemente buenos".

Entre nuestros hallazgos podemos destacar:

(a) Nuestro sistema de aproximación con drones para la determinación de la turbulencia en la capa límite es novedoso, por lo que combina de ganancia de altura (respecto a las torres meteorológicas) y resolución (mayor resolución espacio-temporal que los globos sonda). Nuestro estudio se efectuó en el ámbito geográfico de las elevaciones montañosas del SE de la península Ibérica. En dichos lugares existen observatorios astronómicos o están muy próximos.

(b) Se constata que nuestros resultados están en línea con los obtenidos en la bibliografía consultada. Las aproximaciones efectuadas con globos sonda meteorológicos, para todo el paso atmosférico, y las torres con sensores, hasta una altura de unos 30 m., se han mostrado insuficientes, a la hora de mostrar la contribución de la capa situada entre los 30 y unos 300 m de altura, donde nuestro método pretende rellenar un hueco importante.

(c) Nuestro método, y nuestra técnica, pueden determinar, con suma rapidez, las características turbulentas de un observatorio y, además, permiten la obtención rápida de mediciones en varios puntos de control alrededor del mismo, e indicar si su situación es óptima o no.

(d) La validación de nuestro sistema de medidas de turbulencia se ha efectuado partiendo de la teoría de turbulencia atmosférica y un sistema real de medida de diámetro de imagen o "seeing", efectuando, en ocasiones, medidas simultáneas entre nuestras medidas microtermales y las anotadas por un monitor de "seeing" situado en el observatorio astronómico de Calar Alto (Almería). (e) En la bibliografía consultada aparece que la mayor parte de la turbulencia es generada en las capas superficiales, las cúpulas y su entorno orográfico inmediato. Esta es una de las conclusiones que también podemos extraer de nuestras medidas microtermales en el SE de la península Ibérica. Nuestras medidas experimentales muestran que, a partir de unos 120 m. de altura, casi todos los lugares parecen excelentes.

(f) Por tanto, de acuerdo con en el epígrafe anterior, podemos concluir, razonablemente, que cuanto más bajo sea el RMS integrado de nuestros vuelos microtermales más probabilidad hay de estar cerca de la atmosfera libre (FA), con seeing típico de ~0.4" arco.

En nuestro trabajo se ha intentado, creemos con éxito, estimar la turbulencia atmosférica a partir del uso de drones equipados con sensores microtermales. Por tanto, hemos comprobado como a partir de su uso se puede facilitar la tarea de localización, desarrollo y protección ambiental de lugares con alto potencial astronómico.

Nuestro sistema de aproximación para estimar la turbulencia en la capa límite es novedoso y, presenta, como hemos indicado en varias ocasiones, ventajas comparativas respecto a otras técnicas tradicionales.

Como nuestro tiempo era limitado, y el presupuesto muy exiguo, no ha sido posible extenderse, experimentalmente, con los vuelos de drones, para medir turbulencia atmosférica, más allá de nuestra zona geográfica del SE de la península Ibérica. Solo se ha trascendido este ámbito para incrementar nuestros puntos de control.

Adicionalmente, también se han emprendido determinaciones de la turbulencia atmosférica por medio de torres meteorológicas, dotadas con sensores microtermales, que registran las micro variaciones de temperatura del aire a distintos niveles sobre el suelo. Los resultados preliminares consideramos que son alentadores, al tiempo que nos permiten seguir avanzando en el diseño de nuevos sensores de micro turbulencia atmosférica, a fin de localizar lugares donde sea posible construir nuevos observatorios, con mínimas incidencias de las capas superficiales de la atmósfera.

Todo esto viene a confirmar uno de los presupuestos centrales de nuestra tesis: los condicionantes logístico y geográficos, sin mencionar los políticos, han impuesto siempre su ley, a los limitados recursos de los astrónomos y sus instituciones. Por ello, aunque éstos han buscado la excelencia física en los lugares de observación astronómica, no han podido facilitar la construcción de observatorios en lugares de extrema altitud, latitud y lejanía geográfica. No obstante, también es cierto que los recursos y las exigencias científicas han crecido con el tiempo. En los últimos años ha ganado peso la idea de los "observatorios remotos" en zonas muy inaccesibles o difíciles, desde el punto de vista logístico. Un buen ejemplo seria la vastedad del Antártico, Asia central, Tíbet y los altos volcanes de los Andes de Sudamérica. No es imaginable un observatorio en estos lugares, sino manejado, casi en su totalidad, de manera remota. El estudio de su ubicación con drones sería una buena alternativa.

DE LOGÍSTICA

Hemos podido constatar, por la literatura citada y nuestra propia experiencia en entornos de alta montaña, que la extrema lejanía (Antártida) o elevada altitud (Andes y Tíbet) imponen una serie de limitaciones importantes en el desarrollo y tamaño de las instalaciones astronómicas.

Así, las dificultades logísticas y presupuestarias hicieron desistir del telescopio OWL, "Telescopio Abrumadoramente Grande", de 100 metros de diámetro, seguramente destinado al entorno del desierto de Atacama, pero que, finalmente, fue reducido o minorado a una apertura de 40 metros (E-ELT), para construir en el mismo lugar, y que actualmente (2022), se encuentra en fase de construcción avanzada.

Sobre el uso de drones en el campo astronómico, creemos que sus aportaciones tardarán aún años en llegar, ya que se necesita liberar tecnología clasificada para poder elevar cargas más pesadas que unos dos kilos, y elevarse a varios miles de metros de altura. No obstante, el rápido desarrollo de taxis voladores, basados en drones, y los sofisticados drones militares, cada vez más accesibles, harán que se puedan aplicar con grandes resultados en investigación astronómica, y para la medida de cualquier variable atmosférica, en la vertical y en la horizontal.

El tiempo en que un observatorio astronómico permanece en la "cresta de la ola" por su relevancia, suele estar en torno a 30 años. Después suele decaer, hasta convertirse en museo; eso con suerte.

Actualmente, las realizaciones científico-astronómicas son impresionantes, en cuanto a tamaño y coste de las instalaciones, aparte de conllevar una enorme complejidad técnica. Esto ha llevado a constituir grandes centros o "núcleos de observatorios", con decenas de instalaciones independientes, pertenecientes a varias instituciones científicas, dentro del área de una montaña o grupo de montañas cercanos.

Las zonas de la Tierra con grandes núcleos astronómicos tienden a distribuirse entre latitudes 20 a 40 grados norte y sur, en torno a dos grandes bandas, y en las zonas polares, especialmente, en la Antártida. Ello obedece a la presencia de altas presiones permanentes y a la baja nubosidad presente aquí durante gran parte del año. No cabe ninguna duda, tras lo expuesto en nuestro trabajo, que los condicionantes físicos y astroclimáticos pueden ser manejados y entendidos para buscar las mejores opciones de localización. Ahora bien, los límites presupuestarios y la logística siguen dictando lo que es posible abordar en la práctica.

Aparte de ello, no podía faltar la rivalidad presente entre naciones, e, incluso, entre instituciones nacionales poderosas, como es el caso del grupo del CALTECH y el de la Institución Carnegie de Washington, que mantienen, históricamente, una pugna fratricida por conseguir los presupuestos para construir grandes telescopios (Worth, 2016).

Deliberadamente, hemos dejado al margen de nuestro estudio geográfico los aspectos de localización de observatorios astronómicos en el espacio, siendo estos, en cada caso, algo muy estudiado, pues, una vez elegido el sitio, y la función del observatorio espacial, no es posible realizar cambios posteriores al lanzamiento.

De alguna manera, se intuye que los límites geográficos y de altitud están próximos a alcanzarse, y cualquier intento de mejora requerirá inversiones que serán, probablemente, inasumibles. Así que podemos hacer un aserto que juega con la reputación del científico en activo: "Los astrónomos experimentales desearían conocer los últimos extremos climáticos, logísticos y sociopolíticos, sobre determinados lugares, pero temerán preguntarlos".

DE CAMBIO CLIMÁTICO

Considerando el sistema océano-atmósfera, y su circulación variable, es muy difícil concretar cuál es el efecto de los gases de efecto invernadero generados por las actividades antrópicas.

A pesar de su innegable efecto global, este calentamiento aún no incide de manera negativa en la operatividad de ningún observatorio astronómico considerado en nuestro trabajo.

Los observatorios astronómicos se localizan generalmente a gran altitud y sus peculiaridades climáticas no son del todo bien conocidas para modelizar su clima futuro para el medio y largo plazo.

Aunque la tónica del aumento de temperatura media en las décadas aquí consideradas es innegable, es cierto que, en determinadas regiones y latitudes se producen decrementos de temperatura media, cuando se comparan los promedios de la década de los 50 del siglo XX y la de la década 2010-2019.

Podemos resumir indicando que las escalas temporales compatibles al cambio climático y la observación astronómica son medidas por siglos, cuando no por milenios, por cuestiones que tienen que ver con parámetros orbitales de la Tierra, y que son muy superiores a la vida útil de un observatorio, que podemos cifrar en unos 50 años.

Debemos señalar que la mayoría de los modelos climáticos, en especial los que presentan tendencias futuras a muy largo plazo, están sujetos a muchas incertidumbres. No solo aquellas relativas al papel de los gases de efecto invernadero, sino también a las derivadas del desarrollo de las tecnologías "verdes". Por tanto, un escenario preciso de las condiciones a 50 años vista, para un observatorio concreto, es actualmente poco realista, pues a la incertidumbre regional se une la más estrictamente local. Estas últimas consideraciones se derivan de la lectura del documento "Bases Físicas (...)" del V informe informe del IPCC.

DE PROPUESTAS A FUTURO

El futuro de la astronomía con base en tierra no está escrito. Solo es posible indicar por donde sería posible avanzar desde un punto de vista observacional, a partir de lo que se está estudiando en astronomía y astrofísica en la actualidad. Esto se relaciona con temas tan impactantes como la formación de las primeras galaxias, los objetos exóticos del universo y la búsqueda de vida extraterrestre.

La Antártica en su conjunto, la cadena de los altos Volcanes de Chile-Argentina y el Tíbet son, por este orden, los lugares donde sería posible desarrollar nuevos observatorios en el extremo infrarrojo-submilimétrico. Como ya se ha indicado, la calidad de imagen o seeing no podría mejorarse significativamente con el incremento de la altitud en dichas zonas.

Los lugares propuestos a futuro en África, pese a ser notables en sus características astroclimáticas, no presentan un contexto social, económico y político esperanzador. Nos estamos refiriendo a países como Sudan o Etiopía, donde parecen hallarse excelentes lugares. Namibia y Sudáfrica tienen bajas altitudes relativas, pero muchas noches despejadas. Esto les permite ser candidatos a propuestas intensivas de observación en óptico o radio, como los proyectos CTA (Radiación de Cerenkov) o SKA (en radio interferometría con síntesis de apertura).

Nuestro trabajo indica que es posible introducir mejoras en los observatorios astronómicos del SE de la península Ibérica. Para ello ha de surgir una oportunidad científica objetivable, que haga viable dichas extensiones.

Aún proyectos de telescopios de la clase 30 m. serían objeto de consideración, dada las muy favorables condiciones astroclimáticas y logísticas de la península Ibérica.

Idéntico caso tendríamos con el alto Atlas marroquí, pues, a pesar de tener cantidades significativas de polvo en suspensión en niveles medios y bajos (hasta unos 3,000 m), las cimas altas parecen estar bastante libres de él.

Por otro lado, es posible localizar aún lugares excelentes en esta área, algunas inexploradas, como es la parte centro occidental de la península Ibérica (Gredos), o el caso del Atlas marroquí, en sus sectores central y oriental. Aquí las elevaciones pueden llegar a cerca de 4000 m.

En la alta meseta Antártica los retos logísticos, de ingeniería y arquitectura, son formidables, y solo la imaginación de los mayores visionarios, dentro del campo, es el límite. La recompensa científica puede ser grande, pero, casi con seguridad, habrá que pagar un elevado precio y costará décadas.

Finalmente, hay que indicar que ya se está trabajando en la construcción de observatorios en los Andes chilenos a altitudes de 5600 m. Por ello, este esbozo de propuestas futuras no está lejos de lo que ya es una realidad, donde se sugieren lugares unos 1000 metros más elevados.

RECOMENDACIONES

Sobre la idea de un Parque astronómico en el SE de Andalucía

A raíz de la declaración del Geoparque de Granada, en las comarcas de Guadix, Baza y Huéscar, creemos que sería de utilidad, y complemento a dicha distinción por parte de la UNESCO, reforzar la actividad educativa y divulgativa en observación astronómica, tanto de la presencial como de la remota, en colaboración con el observatorio de La Sagra, actualmente en desarrollo. Para ello habría que aprovechar las sinergias de ambos entes, más cercanos entre si de lo que sus temáticas parecen abordar.

Nosotros, modestamente, revindicaríamos una figura parecida a la existente en Chile; nos estamos refiriendo al "Parque Astronómico de Atacama" (Bustos et al., 2014). El hecho de que algunos espacios naturales de la zona referida ya tengan una figura de protección, en forma de Parque Natural o Parque Nacional, no garantiza, en absoluto, que las actividades humanas no degraden, sobremanera, las características para la observación astronómica de estos lugares, especialmente en lo que a contaminación lumínica e industrial se refiere. Esta es una cuestión que nosotros queremos reivindicar desde aquí: "Parque Astronómico del SE de Andalucía".

Sobre la idea de un gran telescopio (16 - 30 m. apertura) en la península Ibérica

Atendiendo a los resultados obtenidos en esta tesis, acerca de la bondad de los parámetros astroclimáticos en la península Ibérica y, más concretamente, en el sector SE y centro, cabe sugerir la necesidad de continuar este tipo de estudios, orientados a la eventual instalación de la clase "gigante", tal vez orientado hacia el infrarrojo medio y próximo. El hecho de no disponer de ninguno de ellos en suelo continental europeo es algo que refuerza, aún más, esta posibilidad, en favor de una distribución de grandes telescopios con criterios de máxima cobertura celeste y máximo tiempo posible de observación, en longitudes de onda específicas.

AGRADECIMIENTOS

La lista de personas e instituciones es bastante larga en el caso de este trabajo. Todos los citados han aportado algo, según mi parecer, a mi modesto conocimiento, o me apoyaron en mis ideas, de forma material o de enseñanza en la tarea. Algunas de estas personas quedarán sin citar, por olvido, dado que la gestación de esta tesis abarca cerca de 40 años, y muchas de las personas y sus ideas quedaron en el camino, perdiéndose en la bruma de tan largo tiempo, pidiendo disculpas en tal caso.

De la época Asociación Astronómica Sabadell

Jose María Oliver y Jose Costas

De la época Asociación astronómica granadina

Francisco Santiago, Juan Antonio Rodríguez, Fernando Palacios, Miguel Cobo

De la época inicial en el IAA (Instituto de Astrofísica de Andalucía)

Jose María Quintana, Víctor Costa, Ángel Rolland, Rafael Garrido, Manuel Sáez, Emilio Alfaro, Álvaro Giménez, Juan Jose Martínez, Juan Jose López, Manuel Puertas, Jose Pelayo, Manuel Merlo, Fernando Blanco, Pilar, Rafael Rodrigo, Antonio Molina y Norman Walker del RGO, Inglaterra.

De la época reciente del IAA (Instituto de Astrofísica de Andalucía)

Justo Sánchez, Alberto Castro, Enrique Pérez, Antxon Alberdi Odriozola, Alejandro Sánchez de Miguel, Miguel Ángel López Valverde, Jose Luis Ortiz, Nicolas Morales, Francisco Aceituno, Jose Manuel Vílchez y Pablo Santos Sanz

De observatorio Radio IRAM

Juan Peñalver

De la antigua INTA

Rufino Barco.

Del Albergue Universitario

Don Antonio Zayas

De la Universidad de Granada

Don Fermín Camacho, Don Miguel Giménez Yanguas, Inma Domínguez

Carlos Abia, Eduardo Battaner, Miguel Ángel Sánchez, Diego Compan,

Francisco Ortega, Rafael Fernández Del Águila, Francisco Valverde, Emilio Martínez,

De Calar Alto (Centro Astronómico Hispano-Alemán)

Profesor Hans Helsasser, Profesor Kurt Birkle, Profesor Teodoro Vives, Carlos Eiroa, Uli Thiele, Agustín Sánchez, Eduardo Ojero, Eduardo Padial, Felipe Hoyo, Manuel

Alises, Vicente Gómez, Juan Capel, Juan Usero, Alberto Aguirre, Antonio Pérez, Enrique de Guindos, Jesús Aceituno, David Galadi, Javier Flores y Ana Guijarro DE CEAMA (Centro Estudios Ambientales de Andalucía) Lucas Alados Del IAC (Instituto de Astrofísica de Canarias) Francisco Sánchez, Rafael Rebolo, Jose Miguel Rodríguez, Casiana Muñoz De la universidad complutense Madrid Jaime Zamorano y Jesús Gallego Universidad de Valencia Victor Reglero, Juan Fabregat DE FFGeo. Jorg Fischer, Rafael Fuentes, Jose Gálvez. **De collados Sagra** Arturo Trujillo y Amancio **Observatorio Javalambre el Buitre (CEFCA)** Mariano Moles Del observatorio la Hita Toledo Faustino y Leonor De la estación de Yebes Radio Jesús Martin Pintado De la Universidad de Barcelona Jordi Torra, Carme Jordi. Y especialmente a mis dos colegas técnicos, Cristóbal García y Victor Dekert en tareas sobre el Observatorio de La Sagra y el vuelo con drones.
