

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

FÍSICA DE LA TIERRA, ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA II



Trabajo de fin de grado

Análisis de contaminación lumínica mediante medidas de brillo de cielo

Light pollution analysis by sky brightness measurements

Azahara Rojas Roncero

Director: Jaime Zamorano

3 de septiembre de 2018

Agradecimientos

En primer lugar quiero darle las gracias al profesor Jaime Zamorano por enseñarme la importancia de este problema y darme la oportunidad de colaborar en este proyecto. Por contagiarme su ilusión y empeño y por su paciencia.

Nada de esto sería posible sin el apoyo incondicional de mi familia, que nunca me ha abandonado en mi pasión y empeño por alcanzar las estrellas. Sois mi universo.

No puedo nombrar todas las personas que me han acompañado y ayudado a lo largo de esta travesía, que no ha sido precisamente corta, pero ellos saben quienes son. Amigos, tanto dentro como fuera de la facultad, compañeros de clase, incluso aquellos que no confiaron en mí, ya que por ello me hicieron más fuerte. No puedo cerrar estas líneas sin hacer mención a la gente de ese remoto lugar en los pies del Moncayo, que en un momento de flaqueza me demostró que no me había equivocado de camino. A todos, GRACIAS

Declaración

Declaro ser el autor del Trabajo de Fin de Grado que presento como culminación de mis estudios de Graduado en la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid, siendo el trabajo original e inédito y producto de mi contribución intelectual, bajo la tutela de uno o varios profesores de esta Facultad. Todos los datos y las referencias a textos y materiales ya publicados están debidamente identificados y referenciados en el texto y en las notas bibliográficas.

En Madrid a 3 de septiembre de 2018

.....

Universidad Complutense de Madrid

Facultad de Ciencias Físicas

© 2018 Azahara Rojas Roncero. Todos los derechos reservados.

Este trabajo ha sido realizado como Trabajo de Fin de de Grado en la facultad de Ciencias Físicas de la UCM. Esta protegido de copyright y para su uso es preciso el permiso del autor.

Referencia de este trabajo

Rojas Roncero, Azahara. *Análisis de contaminación lumínica mediante medidas de brillo de cielo*. Trabajo de fin de grado. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas, 2018.

Resumen

La luz forma parte de nuestra vida diaria, a día de hoy no seríamos capaces de desarrollar prácticamente ninguna actividad sin ella. Pero un uso irresponsable puede afectarnos de manera negativa. En adelante se desarrollan sus posibles efectos nocivos y cómo podemos evitarlo haciendo un uso responsable de la iluminación. En colaboración con el proyecto NixNox en este trabajo se han realizado medidas del brillo del cielo nocturno en distintas partes de España, principalmente en las zonas de Madrid y Soria, con un fotómetro tipo SQM. A partir de los datos se generan unos mapas de brillo de cielo que se analizan y comparan con las imágenes de satélites artificiales para detectar los principales focos de contaminación lumínica y poder actuar en consecuencia.

Palabras clave contaminación lumínica, iluminación, cielo, NixNox, fotómetro SQM, brillo

Abstract

The light is part of our daily life, nowadays we would not be able to do any activity without it. But an irresponsible use could affect us negatively. Onwards in this thesis there are described possible harmful effects of the illumination and how we can avoid them by using it responsibly. This work collaborates with project NixNox for measurements of sky brightness in different places of Spain. Measurements were done with SQM type photometer around Spain, principally in Madrid and Soria areas. From the data, sky brightness maps are generated, analyzed and compared with satellite images to detect the main light pollution spotlight to act accordingly.

Keywords light pollution, illumination, sky, Nixnox, photometer SQM, brightness

Índice general

Prólogo	1
Introducción	3
1 Proyecto NixNox	5
2 La contaminación lumínica y sus efectos	7
2.1. Efectos de la contaminación lumínica en el ser humano	8
2.2. Efectos de la contaminación lumínica en los animales	10
2.3. Efectos de la contaminación lumínica en las plantas	12
2.4. Otros efectos de la contaminación lumínica	13
2.5. Contaminación lumínica en España	15
2.6. Contaminación lumínica en el mundo	18
3 Posibles soluciones e iluminación responsable	21
3.1. Tipos de iluminación	21
3.2. Uso adecuado de la iluminación	24
4 Fotómetro SQM	29
4.1. Descripción	29
4.2. Otros dispositivos	31
5 Toma de datos y análisis de resultados	33
5.1. Proceso de medida	33
5.2. Análisis de datos	35
5.3. Resultados	37
5.4. Comparación de resultados	54
Conclusión	63

A	Unidades	65
B	Tipos de visión	67
C	Abbreviations	69

Índice de figuras

0.1.	<i>Ciudades sin estrellas</i>	2
1.1.	<i>Logotipo Proyecto NixNox</i>	5
2.1.	<i>Efectos de la contaminación lumínica en animales</i>	11
2.2.	<i>Efectos de la contaminación lumínica en árboles</i>	12
2.3.	<i>Efectos de la contaminación lumínica en la latencia protectora</i>	13
2.4.	<i>Ejemplo de intrusión lumínica</i>	14
2.5.	<i>Imagen nocturna de nuestra península desde la Estación Espacial Interna- cional</i>	17
2.6.	<i>Países más afectados por la contaminación lumínica por población</i>	20
2.7.	<i>Países menos afectados por la contaminación lumínica por población</i>	20
2.8.	<i>Contaminación lumínica en los países pertenecientes al G20 según pobla- ción (izquierda) y área (derecha)</i>	20
3.1.	<i>El cielo según niveles de contaminación y tipos de luminarias</i>	26
3.2.	<i>Direcciones de la luz y su aprovechamiento</i>	27
4.1.	<i>SQM</i>	29
4.2.	<i>Representación de distintos valores de brillo de fondo de cielo</i>	30
4.3.	<i>Banda fotométrica del SQM</i>	30
5.1.	<i>Montaje de medida con el fotómetro SQM</i>	33
5.2.	<i>Sistema de medición de ángulos en acimut y altura</i>	34
5.3.	<i>Plantilla de medidas</i>	35
5.4.	<i>Puntos medidos en la bóveda celeste para construcción del mapa</i>	35
5.5.	<i>Variación del brillo y color del fondo de cielo a lo largo de la noche en el observatorio UCM</i>	36
5.7.	<i>Mapa de contaminación lumínica del cerro Almodóvar</i>	39
5.8.	<i>Mapa de contaminación lumínica del parque de la maceta</i>	40
5.9.	<i>Mapa de contaminación lumínica del parque forestal de Vicálvaro</i>	41

5.10. Mapa de contaminación lumínica del parque de Vallecas	42
5.11. Mapa de contaminación lumínica de Garda (Italia)	43
5.12. Panorámica del observatorio astronómico “El Castillo” (Borobia, Soria) . .	44
5.13. Mapa de contaminación lumínica del observatorio astronómico “El Casti- llo” (Borobia, Soria)	44
5.14. Mapa de contaminación lumínica del refugio de Borobia 1 (Soria)	45
5.15. Mapa de contaminación lumínica del refugio de Borobia 2 (Soria)	46
5.16. Mapa de contaminación lumínica de la carretera de Borobia a Pomer . . .	47
5.17. Mapa de contaminación lumínica de la carretera de Ciria	48
5.18. Mapa de contaminación lumínica de Sauquillo de Boñices	49
5.19. Mapa de contaminación lumínica del observatorio de Alcolea del Pinar . .	50
5.20. Mapa de contaminación lumínica de Brihuega	51
5.21. Mapa de contaminación lumínica de Villatobas (Toledo)	52
5.22. Mapa de contaminación lumínica de la carretera a Quintanar de la Orden	53
5.23. Mapa de contaminación lumínica del bosque de San Clemente	54
5.24. Puntos de medición	55
5.25. Puntos de medición en la capital	55
5.26. Puntos de medición en Soria	55
5.27. Brillo del cielo según distancia a Madrid	58
5.28. Diferencia entre la máxima y mínima magnitud medida	58
5.29. SQM fijo en el observatorio UCM	59
5.30. SQM fijo en Villaverde del Ducado	59
B.1. Sensibilidad del ojo humano en las distintas regiones del espectro	68

Índice de cuadros

3.1. Tipos de iluminación	25
3.2. <i>Aumento de contaminación lumínica con valores crecientes de FHS</i>	28
5.1. <i>Valores principales de las medidas</i>	57

Prólogo

¿Cuántos de nosotros hemos pasado los veranos en el pueblo tumbados por las noches en busca de deseos tras estrellas fugaces o simplemente deleitándonos con un cielo totalmente estrellado? En un mundo totalmente industrializado como en el que vivimos, cada vez resulta más difícil encontrar un lugar en el que el cielo se muestre con todo su esplendor. Allá donde antes había estrellas ahora nos encontramos con el resplandor de una ciudad cercana o el foco de unas grandes instalaciones.

El avance tecnológico pero principalmente el mal uso de la iluminación nos está privando de uno de los más bellos escenarios de la naturaleza, que compone la mitad del paisaje, haciendo por ejemplo que más de un tercio de la humanidad no pueda ver (e incluso nunca vea) la vía láctea o que gran parte de la población que habita en la ciudad ni si quiera se plantee levantar la vista al cielo. Además de dificultar la investigación científica del universo y con ella muchos de los avances de los que se beneficia la sociedad.

Y no hablamos solo de la privación del cielo nocturno, la contaminación lumínica afecta directamente a los ecosistemas, alterando los ritmos de la fauna y flora, así como los nuestros propios. Una mala iluminación puede provocar desequilibrios y alteraciones en el organismo como cambios de humor, insomnio o incluso propiciar la aparición de ciertas enfermedades más graves como cáncer.

Además en nuestra lucha por preservar el medio ambiente y cuidar el planeta contamos con numerosos sistemas y leyes para reducir la contaminación, una regulación que no se aplica para el caso de la contaminación lumínica, pero no olvidemos que un mayor uso de iluminación implica un mayor gasto energético y con ello un aumento en las emisiones de CO².

De modo que ¿por qué derrochar luz de forma innecesaria cuando es perjudicial para todo el entorno? Es importante tomar conciencia de este hecho, ya que es tan perjudicial como cualquier otro tipo de contaminación y sin embargo es pasado por alto.

Tan necesario resulta proteger la noche que en el año 2010 la UNESCO aprobó la **Declaración Mundial en Defensa del Cielo Nocturno y el Derecho a Observar la Estrellas**:

“El derecho a un cielo nocturno no contaminado debe considerarse como un derecho inalienable de la humanidad, equiparable al resto de los derechos ambientales, sociales y culturales”



Figura 0.1: *Ciudades sin estrellas*

Una cantidad impensable de personas en multitud de organizaciones en todo el mundo, e incontables noches en vela detrás trabajan incansablemente para defender este derecho y preservar una de las mayores maravillas de la naturaleza.

Cuando en nuestro camino le damos la espalda al Sol, la oscuridad simplemente nos brinda la oportunidad de acercarnos a ese universo al que pertenecemos, mostrándonos que ese punto azul pálido no es más que una pequeñísima parte de una inmensidad desconocida en la que solo podemos adentrarnos cuando las luces se apagan.

Nadie tiene derecho a arrebatararnos la curiosidad por conocer esta inmensidad cósmica que nos rodea.

Nadie tiene derecho a robarnos la noche.

Introducción

La contaminación lumínica es actualmente causante de numerosos efectos negativos sobre el ser humano y nuestro entorno. Pero a pesar de ello no recibe la importancia necesaria y es desconocido por gran parte de la sociedad. Su consecuencia mayor es el aumento del brillo de cielo, que nos impide la visualización de las estrellas, con ello no solo perdemos la percepción del universo en el que vivimos sino que además se obstaculiza el avance científico y el desarrollo. No obstante es también un grave problema de índole, educativo, paisajístico, cultural y turístico, que deriva además en efectos nocivos para la salud.

Las líneas que hoy nos ocupan son fruto de la participación en el proyecto NixNox como parte de la finalización de los estudios de grado en ciencias físicas. Gracias a la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y con la colaboración directa de la Sociedad Española de Astronomía (SEA), NixNox está enmarcado en el proyecto europeo Stars4all que reúne multitud de organizaciones con el fin de proteger los cielos de la contaminación lumínica y dar a conocer la importancia de este hecho. Además de llevar a cabo diversas actividades de índole astronómico.

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es la realización de mapas de brillo de cielo nocturno usando la metodología del Proyecto NixNox y compararlos con las imágenes obtenidas por satélite localizando las fuentes contaminantes.

Los datos utilizados en este estudio fueron obtenidos de 17 localizaciones en distintos puntos de España (salvo uno perteneciente a Italia), concentrados principalmente en dos áreas: las zonas del sureste de Madrid y Soria. Para ello las medidas fueron tomadas con un fotómetro tipo SQM en noches oscuras (despejadas y sin luna).

El primer punto importante es dar a conocer el proyecto NixNox de una forma más detallada (sección 1).

Seguidamente, en la sección 2 entenderemos como afectan los excesos de luz en nuestra salud y el entorno. Y su utilización y en qué nivel tanto en España como en todo el mundo.

Los tipos de luminarias de que disponemos con sus respectivas características y su correcto uso para minimizar efectos secundarios nocivos es explicado en el

apartado 3.

Para entender mejor la toma de datos se detalla el funcionamiento del dispositivo de medida en la sección 4. Y por último el punto 5 está dedicado a la explicación de la metodología usada y la presentación de resultados y su análisis.

Al final del documento se puede encontrar un apéndice con las unidades utilizadas a lo largo del estudio y sus equivalencias a modo de aclaración.

Proyecto NixNox

El proyecto NixNox [**nixnox**] nace de la necesidad de encontrar un cielo limpio lejos de hongos lumínicos.

El objetivo principal del proyecto es localizar y preservar aquellos lugares de España donde la contaminación lumínica aún no se ha apoderado del cielo y existe una calidad suficiente para la observación astronómica.



Figura 1.1: Logotipo Proyecto Nix-Nox

Todos en algún momento nos proponemos disfrutar de una lluvia de estrellas, del evento astronómico del año, o simplemente huir de las luces de la ciudad para relajarnos mirando al cielo. Entonces la primera pregunta que surge es ¿dónde puedo ir?

El proyecto NixNox quiere responder a esa pregunta facilitando la localización de cielos oscuros de fácil accesibilidad y compartirlos con la población para animar a toda la sociedad a disfrutar y preservar un bien tanpreciado, y a día de hoy tan exclusivo, sin necesidad de desplazarse al rincón más recóndito. Así como incentivar a las Administraciones Públicas a cumplir la normativa y conservar estos lugares hoy tan difíciles de encontrar.

Se trata a fin de cuentas de saber dónde acudir para poder disfrutar de un cielo de calidad y protegerlo de luces innecesarias.

Es un proyecto de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) apoyado por la Sociedad Española de Astronomía (SEA), hecho por y para el público. El proyecto cuenta con la colaboración de asociaciones, aficionados y en definitiva, cualquier persona que tenga unos conocimientos básicos de astronomía de posición y disponga de un fotómetro puede colaborar siguiendo el procedimiento de medida. Actualmente el proyecto Nix Nox cuenta con la colaboración de más de 20 asociaciones de

aficionados.

Pero al igual que los objetivos es importante saber que el proyecto no pretende crear un mapa de contaminación lumínica de España ni, por supuesto suplantar o competir con proyectos similares de protección del cielo.

Objetivo del futuro será la publicación un libro que recogerá toda la información básica de los mejores lugares de cielo oscuro repartidos por toda España, de modo que de una forma sencilla, la observación de un cielo nocturno de calidad esté al alcance de cualquier persona sin necesidad de tener que desplazarse lejos de su domicilio.

Toda la información del proyecto puede encontrarse en las páginas web <http://nixnox.stars4all.eu/> y [https://eprints.ucm.es/26982/\[eprintsucm\]](https://eprints.ucm.es/26982/[eprintsucm]).

La contaminación lumínica y sus efectos

Se puede decir que la invención de la luz eléctrica es uno de los logros más importantes de la humanidad. La luz nos permite el desarrollo de una actividad nocturna, algo fuera del alcance del ser humano de épocas anteriores, que evolucionaron de acuerdo a los ritmos naturales y el ciclo solar (según la rotación y traslación), desarrollando las actividades principales durante el día y descansando por la noche de la misma manera que cualquier organismo vivo, vegetal o animal.

Hoy esto ha cambiado para nosotros, la puesta de sol no indica el final del día ni mucho menos de cualquier tipo de actividad, el problema viene cuando la luz que nos permite desarrollarnos por la noche excede los límites saludables tanto para nosotros como para el entorno.

En términos científicos, por contaminación lumínica se entiende la alteración de la oscuridad natural del medio nocturno producida por la emisión de luz artificial excesiva, mal dirigida o innecesaria. Se debe por lo general a iluminación exterior más intensa de lo necesario y/o mal apantallada, es decir, dirigida innecesariamente hacia el cielo, dispersándose en la atmósfera. Esta dispersión aumenta significativamente en núcleos urbanos ya que los gases en suspensión contaminantes en el aire la facilitan. Una pequeña parte de esta contaminación se debe también a la reflexión, es decir, al rebote de la luz en las superficies (principalmente el suelo).

Un aspecto muy negativo de la contaminación lumínica es que su dispersión es enorme, no se limita al núcleo donde es generada (una gran ciudad, una zona comercial...) sino que su difusión a través de la atmósfera puede llevar su efecto hasta cientos de kilómetros de distancia de forma acumulativa. Como ejemplo, la contaminación de la Comunidad de Madrid, que puede ser medida y visualizada en las provincias aledañas. Y en general, un efecto producido por todas las grandes ciudades.

En ausencia de obstáculos la luz se propaga libremente hasta ser ocultada por la propia curvatura terrestre.

Por tanto es fácil concluir que la contaminación lumínica varía según el lugar

en que nos encontremos, pero lo hace de igual manera con el tiempo, generalmente disminuyendo a medida que avanza la noche. Esto no solo es debido al apagado de algunas iluminaciones a partir de cierta hora, las partículas del aire se van “reposando” durante la noche, algo que se ve influido por el descenso de la temperatura.

La consecuencia más conocida es el aumento del brillo de cielo, que nos impide la visualización del cielo nocturno, con ello no solo perdemos la percepción del universo en el que vivimos sino que además se obstaculiza el avance científico y la evolución a la que debemos todo lo que somos hoy.

No obstante es también un grave problema de índole científica, educativa, paisajística, cultural y turística, que supone además una pérdida de valor incalculable.

Una gran parte del estudio de estrellas y nebulosas fue realizado entre los siglos XVII y XIX en observatorios como el de Londres o París, situados en el centro de la ciudad, algo impensable a día de hoy en un cielo que no nos permite ni si quiera diferenciar las constelaciones principales.

En cada lugar existen unos patrones de luz que definen el ciclo de los organismos: reproducción, polinización, horas de actividad... si modificamos ese patrón, modificamos el organismo en sí.

[wiki-contaminacion]

2.1. Efectos de la contaminación lumínica en el ser humano

Son muchos, aunque desconocidos, los efectos negativos que puede generar un exceso de iluminación o un mal uso de ella en el cuerpo humano. Muchas veces este factor influye en la proliferación o aceleración de algunas patologías bastante comunes. Posibles efectos adversos son, la alteración de ciclos de sueño, digestión, temperatura corporal, estado de ánimo, incluso aumento de diabetes o enfermedades cardiovasculares. Aunque pueda parecer suficiente esto es solo una parte de la lista.

Comer todos los días a la misma hora o dormir por la noche y desarrollar actividad durante el día es un ejemplo de ritmo circadiano: cambios físicos, mentales y conductuales que siguen un ritmo que depende de factores naturales del propio cuerpo pero también de factores externos, principalmente de las horas de luz y oscuridad. Prácticamente todos los organismos lo comparten, animales, plantas o incluso pequeños microbios. Estos a su vez influyen de manera directa a los relojes biológicos: mecanismo interno que adapta nuestra fisiología a las diferentes fases del día y regula con precisión y ordena de manera temporal funciones orgánicas como el comportamiento, los niveles hormonales, el sueño, la temperatura corporal y el metabolismo. Este orden implica la creación de unos ciclos que hacen por ejemplo que al mediodía sintamos hambre.

De modo que un cambio en los ritmos circadianos implica la aceleración o deceleración de los relojes biológicos.

Existe en nuestro cuerpo una hormona llamada melatonina que es la que nos produce sensación de sueño y se secreta fundamentalmente durante la noche. La

glándula pineal humana es un órgano del tamaño de un guisante localizado en torno al centro del cerebro capaz de producir y liberar esta hormona. Está controlada por el reloj biológico principal o núcleo supraquiasmático (NSQ) que hace variar su producción en función de la cantidad de luz recibida en los nervios ópticos, menos cantidad de luz, mayor producción de melatonina y por tanto mayor sensación de sueño.

Unos fotorreceptores especiales recogen la señal luminosa recibida por los nervios ópticos y la envían al NSQ en forma de señal eléctrica inactivándolo, de manera que la señal no puede ser mandada a la glándula pineal cesando la producción de la hormona.

Una disminución de melatonina durante la noche por exposición a la luz hace pensar a nuestros órganos que es de día. Esto inicialmente puede suponer una alteración del sueño, pero su modificación de forma continuada puede suponer un riesgo aún mayor para nuestra salud.

La melatonina tiene una serie importante de funciones que se pierden cuando existe una exposición nocturna a la luz, además su producción cae de forma rápida con intervalos cortos de luz. Este grado de inhibición depende de la luminosidad y de la longitud de onda, siendo la más perjudicial la que se encuentra entre 470 y 475 nm (luz azul). El restablecimiento de los niveles de la hormona además depende de la fase de oscuridad en que nos encontremos, siendo más fácil durante la primera mitad de la noche y muy difícil o inexistente en la segunda mitad del periodo de oscuridad.

Estos cambios de luz pueden ser causantes, entre otras cosas, de depresión, disminución de la densidad de espinas dendríticas, aumento del factor de necrosis tumoral (TNF)...

La melatonina actúa como neutralizadora de radicales libres y antioxidante. Privando al cuerpo de esta hormona se contribuye a la iniciación, progresión o gravedad de muchas enfermedades. Porcentaje importante es la gente de avanzada edad por acumulación de daño oxidativo, puesto que puede enlentecer el envejecimiento y algunas enfermedades degenerativas.

El neutralizar radicales libres es una manera de proteger el genoma, es decir, el ADN. Una vez que el ADN está dañado puede sufrir una mutación o iniciar un tumor. Esto convierte la melatonina en un agente anticancerígeno. Además si a pesar de todo se produce un tumor, la hormona también se encarga de reducir su crecimiento.

En alguno de los casos inhibe, vía mecanismos de membrana, la captación y el metabolismo de los ácidos grasos incluyendo el ácido linoleico (ácido graso ingerido en alimentos promotor del crecimiento de tumores) y su conversión a un agente que produce la proliferación celular. La capacidad de la melatonina para inhibir el crecimiento del cáncer por este mecanismo depende de la fase circadiana en la que se administre.

También inhibe a la enzima telomerasa en células cancerosas que alarga los telómeros de los cromosomas (esenciales para mantener la integridad y estabilidad de la estructura cromosómica). Al envejecer los telómeros se acortan volviéndose los cromosomas inestables y muriéndose las células que los contienen. Al reducir la te-

lomerasa de las células tumorales debilita sus cromosomas y favorece la destrucción de las células cancerosas y el tumor se reduce.

Dos cánceres son especialmente sensibles a la falta de melatonina, cáncer de mama y de páncreas.

Trabajos rotativos, la exposición durante la noche a luz de dispositivos móviles, o el gesto de encender la luz durante unos minutos en la noche, así como ciertos tipos de iluminación con una frecuencia inadecuada y en definitiva una variación de periodos de luz y oscuridad pueden suponer la supresión de melatonina.

De hecho se ha visto que trabajadores del turno de noche son menos eficaces y cometen más errores que los individuos con un horario de trabajo diario regular. Pueden sufrir, letargo, apatía, desorientación...

No solo eso, se observa una elevada frecuencia del cáncer de mama en mujeres que trabajan por turnos.

De igual manera funciona el problema conocido como “jet lag”, consecuencia de viajes entre países con distintos usos horarios. Se genera un cambio en el reloj biológico que tarda varios días en recuperar su estado natural.

El descanso es imprescindible para el buen funcionamiento del cuerpo, una falta de sueño puede generar una mutación genética.

2.2. Efectos de la cotaminación lumínica en los animales

Debido a fuentes luminosas artificiales los ecosistemas pueden ver alterado su crecimiento, desarrollo o equilibrio poblacional. Especies diurnas y crepusculares pueden modificar su comportamiento, pero son las nocturnas las que se ven especialmente afectadas. Y son de hecho la mayor parte de los animales los que utilizan la noche para realizar la mayor parte de sus actividades. Las presas pueden escapar más fácilmente de sus depredadores y estos a su vez reducen la posibilidad de ser vistos y la competencia con otros depredadores. Para ello disponen de órganos adaptados a niveles de baja luminosidad o incluso sistemas alternativos como eco localización (capacidad de conocer el entorno por emisión de sonidos).

Se han observado variaciones tales como un cambio en la reproducción, la relación predador-presa, la orientación de las migraciones impidiendo por ejemplo la llegada de algunas aves a su destino...

Como ejemplos particulares podemos referirnos a los murciélagos. Estos animales se guían por una especie de radar, emitiendo señales que reciben de vuelta tras rebotar en los objetos creando así el contorno de los lugares donde se encuentran, señal que se ve retardada para aquellos expuestos a luz artificial, así como un crecimiento más lento y menores tamaños. En el peor de los casos supone la desaparición de la colonia.

O el caso de la tortuga boba, cuyos huevos, depositados en la arena, eclosionan en noches de luna llena de modo que al guiarse por su luz son capaces de llegar al mar. La iluminación artificial en estas costas puede provocar tanto la pérdida de

orientación de las crías, haciendo que acaben tierra adentro como la mayor visibilidad de estas por sus depredadores.



Figura 2.1: *Efectos de la contaminación lumínica en animales*

En cuanto a las aves pueden sentir confusión durante su migración, o incluso volar en círculos alrededor de la luz quedando agotadas produciéndoles colapso o en el peor de los casos la muerte.

Pero es quizás el grupo más afectado el de los insectos por ser la especie más numerosa en prácticamente todos los ecosistemas terrestres, por su colaboración en el medio (como la polinización de las plantas) y por su posición en la cadena trófica (al ser la base de la cadena alimenticia).

Más del 75 % de las mariposas son de actividad nocturna. Las mariposas, si se encuentran más de diez minutos alrededor de una luz artificial pierden su sensibilidad visual que no podrán recuperar hasta pasados 30 minutos lejos de ella. Tienden además a concentrar la puesta de huevos en zonas iluminadas facilitando su depredación.

En este tipo de animales la luz provoca un hiperestímulo conocido como “vuelo hacia la luz” que produce tres grandes consecuencias:

Efecto de cautividad: al sentirse atraído por la luz el insecto muere quemado o depredado al ser visto con mayor facilidad.

Efecto barrera: las fuentes de luz actúan como barreras migratorias interrumpiendo los movimientos de larga distancia.

Efecto aspirador: por el cual los insectos abandonan sus hábitats naturales atraídos por la luz.

Otras modificaciones relativas a su organismo son alteraciones en la visión, ovoposición, apareamiento. Que pueden ser de carácter temporal o permanente.

¿Qué significa perder en un lago 400 gramos de biomasa de insectos cada noche? Para un ecólogo, una auténtica aberración que puede llegar a desequilibrar un ecosistema. Para alguien no versado en el tema, un puñado de mosquitos menos. Pero de hecho este es uno de los bioindicadores usados para estudiar los desequilibrios de un ecosistema.

Otros pueden ser el Búho Chico o los murciélagos. El Búho Chico habita en lugares sin luz, de modo que su hábitat se ve reducido en zonas contaminadas, además es visto más fácilmente por su presa (principalmente ratones de campo). Los murciélagos, a pesar de alimentarse de insectos no acuden a las farolas sino a zonas más oscuras.

[mediambientgencat], [wiki-contaminacion]

2.3. Efectos de la contaminación lumínica en las plantas

No son menos las plantas, que sufren desajustes en sus funciones con cambios en los hábitos lumínicos al igual que cualquier otro organismo vivo. Los procesos de desarrollo de una planta son aquellos como latencia, crecimiento de brotes y floración. Los árboles y otras plantas se clasifican como de día largo, día corto o día neutral según su respuesta al día. Incluso un destello momentáneo de luz durante el período oscuro es suficiente para desencadenar la condición inducida por una corta noche o, por el contrario, un día largo. Los árboles de día largo florecen a principios del verano y continúan el crecimiento vegetativo hasta que los días se acortan en el otoño. Los árboles de día corto florecen y entran en latencia cuando la duración del día se acorta a fines del verano. Los árboles de día neutral no se ven afectados por la duración del día en absoluto.

Dos son los procesos principales y de dependencia directa con la luz para los vegetales: Fotosíntesis: Usa luz para hacer azúcares que usa el árbol. Requiere azul visible (400-450 nm) y rojo (625-700 nm) - Fotoperiodismo: Controla el crecimiento vegetativo y las actividades reproductivas según lo regido por la duración del día y la noche. Requiere rojo visible (625-760 nm) e infrarrojo (760-850 nm). Un pigmento fotorreversible llamado fitocromo o criptocromo reacciona a la duración de los períodos diurno y nocturno dependiendo de si absorbe las longitudes de onda de radiación roja o infrarroja. El fotoperiodismo también puede influir en la forma de la hoja, velloso superficial (pubescencia), formación de pigmentos, tiempo de caída de otoño, y el desarrollo de la raíz, así como el inicio y la ruptura de la latencia del brote.

La iluminación nocturna altera el fotoperíodo natural y, por lo tanto, altera el desarrollo de la planta, pudiendo cambiar los patrones de floración o incluso generar un proceso más peligroso denominado “falso verano”. Este proceso llevado a cabo por los árboles consiste en la alteración de la latencia protectora que es realizada para protegerse del invierno. Se eliminan las hojas y fortalecen sus ramas preparándose para las tormentas y para la acumulación de hielo y nieve. Si este proceso no es realizado a tiempo el árbol puede sufrir daños o continuar su crecimiento mucho después de que sea seguro. Se han observado incluso casos mucho más representa-



Figura 2.2: *Efectos de la contaminación lumínica en árboles*

tivos de estos problemas, como es el de algunos árboles expuestos solo parcialmente a la luz, de modo que el desarrollo del árbol así como sus flores y frutos se realiza en tiempos diferentes para las distintas zonas de un mismo árbol. Un ejemplo de esto lo podemos observar en la imagen 2.3.



Figura 2.3: *Efectos de la contaminación lumínica en la latencia protectora*

Existe un cactus cuyas flores son conocidas como “la reina de la noche” porque es solo durante la noche y una vez al año cuando se abren para poder ser polinizadas por mariposas nocturnas, proceso claramente afectado por un cambio de iluminación. No solo para el propio cactus que florecerá a destiempo, afectará también a la especie polinizadora a la hora de poder encontrar la flor. Si pensamos que esto no nos afecta directamente, deberíamos saber que un tercio de la comida humana requiere de un polinizador.

Incluso el zooplankton se ve afectado. Este realiza un movimiento llamado migración vertical, que consiste en su movimiento a lo largo del día. Por la noche sube a la superficie donde hay más alimento, y baja al fondo durante el día. La iluminación en las costas puede generar que deje de ascender cesando así su alimentación y por tanto descendiendo su población. Al igual que los insectos, el zooplankton es la base de la cadena alimenticia acuática, de forma que si desciende su población lo harán también todos aquellos animales que de él dependan.

[cescosfau]

2.4. Otros efectos de la contaminación lumínica

- **Inseguridad vial:** Nuestros ojos tienen un proceso de adaptación a la luz según esta sea de mayor o menor intensidad, siendo muy rápida la adaptación a un aumento de iluminación, pero muy lenta en el caso contrario. Alrededor de unos siete minutos son los que le cuestan a nuestras pupilas acomodarse a un entorno oscuro.



Figura 2.4: *Ejemplo de intrusión lumínica*

Siendo así, el deslumbramiento en una carretera debido a un cambio de iluminación repentino, como es el cambio entre carreteras con distinta iluminación, o en carreteras iluminadas con falta de uniformidad, o la aparición de puntos de luz provenientes de grandes instalaciones o focos direccionados incorrectamente, puede suponer un peligro para la conducción.

Otro punto de vista para este problema puede ser debido a que en carreteras más iluminadas, los conductores se relajan y pierden concentración; además se tiende a un aumento de velocidad, pudiendo incrementar el número de accidentes.

- **Dificultades para el tráfico aéreo y marítimo:** Siguiendo el razonamiento de la dispersión atmosférica de la luz los mares no están exentos de ella así como no lo están los navíos nocturnos.

No hace falta explicar el peligro que puede suponer una mala iluminación dirigida hacia el cielo para el tráfico aéreo. Los mismos problemas de deslumbramiento que se han mencionado para la conducción de coches durante la noche son aplicables a los pilotos de avión con peores consecuencias.

- **Derroche energético y económico:** Un exceso de iluminación requiere una mayor producción energética para suplir la demanda, y una mayor producción de energía conlleva un aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente CO₂. Quiere decir que la existencia de contaminación lumínica erradica a su vez en otros tipos de contaminación como la atmosférica.

A su vez más gasto energético implica un mayor gasto económico

- **La intrusión lumínica:** se produce cuando la luz artificial procedente de la calle entra por las ventanas invadiendo el interior de las viviendas (ver figura 2.4). Esto puede producir todo tipo de desequilibrios ya mencionados en el apartado 2.1.

- **Posible aumento de delincuencia:** En instalaciones alejadas de zonas iluminadas, es preferible no utilizar alumbrados de seguridad, pues de lo contrario se está indicando donde se encuentra la instalación y proporcionando posibles zonas de acceso a la misma. Es más efectivo un alumbrado disuasorio que se encienda por presencia o similar.

Este es un tema difícil de tratar, diversos estudios han intentado crear una relación entre la delincuencia y la iluminación. La población asegura sentir mayor seguridad si la iluminación es mayor. Por otra parte algunos datos han sido contrastados en lugares donde la iluminación se detiene por la noche con la finalidad de ahorrar. La delincuencia en estos casos en lugar de aumentar se ha visto disminuida. No obstante, eran menos las personas que salían a la calle durante estas horas. Ante estas diferencias no puede tomarse como un valor de referencia.

Como vemos se trata de un problema importante que no recibe la atención adecuada, un problema que no solo altera al ser humano de forma muy negativa sino que también puede llegar a suponer la extinción o la aceleración de ella para muchas especies de animales y plantas. A pesar de ello existe escasa conciencia social y muchos de sus efectos son aún desconocidos. Este tipo de contaminación no obstante, cuenta con una ventaja con respecto a otros tipos, y es que no tiene efectos acumulativos, ni permanece su afección a largo plazo. Tan pronto como apagemos o redireccionemos esas luces inadecuadas acabaremos con su efecto negativo y empezaremos a sentir los beneficios de forma prácticamente inmediata. Algo tan fácil como apagar el interruptor puede beneficiarnos enormemente.

2.5. Contaminación lumínica en España

España e Italia son los países de la Unión Europea que más gastan en alumbrado público por habitante, siendo el mayor foco de contaminación lumínica de Europa. Además, Madrid es la ciudad que más contaminación lumínica provoca en la Unión Europea. La evolución del gasto eléctrico en alumbrado público para España creció en el periodo 1990-2015 a un ritmo del 4 %. El consumo energético de España es de 5.4 TWh/año, lo que supone un gasto de cerca de 950 millones de euros anuales, siendo el país con mayor consumo en alumbrado por habitante de la Unión Europea (y el segundo en valores absolutos).

Gastamos en alumbrado casi tres veces más que Alemania contando con aproximadamente la mitad de población. Mientras allí un habitante gasta 45 KWh, en España se gastan 116KWh por habitante. España es el segundo país de la UE que menos bombillas de bajo consumo usa. En ciudades por ejemplo como París habría que viajar unos 900 km para encontrar largas superficies apenas afectadas de contaminación lumínica en el cenit. No obstante, Francia acaba de aprobar una medida que obliga a los comercios a apagar escaparates y otras señales luminosas entre la 1 y las 6 de la mañana. En España, en cambio, no se ha tomado todavía una medida

similar de restricción horaria, los escaparates alumbran las calles comerciales casi más intensamente que las farolas.

Andalucía, Levante (Comunidad Valenciana y Región de Murcia), Cataluña, Madrid, Cantábrico-Valle del Ebro y el eje atlántico (La Coruña-Lisboa) son las áreas contaminadas en la península ibérica.

Cantabria es una de las provincias más afectadas por la contaminación lumínica debido a que la contaminación en la capital es muy intensa.

La Comunidad Valenciana tiene el récord en cuanto a emisiones de contaminación lumínica respecta. Es la ciudad que ha registrado el mayor índice de KWh por habitante de España (127 KWh frente a 61,5 KWh por habitante de la capital, Madrid). La zona metropolitana de Valencia con la mitad de población que Barcelona emite un poco más de contaminación lumínica que esta ciudad, y la zona de Alicante, con un tercio de la población de Barcelona emite la misma contaminación lumínica que su zona metropolitana.

La polución en Madrid es enorme. La contaminación lumínica también. La contaminación lumínica de Madrid se puede divisar hasta a 100 Km, siendo visible en las provincias de: Toledo, Cuenca, Ávila, Segovia, Teruel, Soria, Guadalajara e incluso en las provincias de Burgos y Ciudad Real.

Prácticamente todos los habitantes de la Región de Murcia viven bajo un cielo nocturno contaminado, siendo la contaminación lumínica particularmente intensa en las comarcas del Mar Menor y Campo de Cartagena, municipio de Murcia y límites, Lorca, Totana, Yecla y alrededores de estas poblaciones, de forma que un 75 % de la población de la Región, ha perdido la visibilidad a ojo desnudo de la Vía Láctea.

A nivel español, apenas hay regulación general (un par de Decretos Ley de 2007 y 2009, que limitan la cantidad de luz), aunque destacan las excepciones de Andalucía y Cataluña.

No obstante estas regulaciones no son respetadas. Se puede ver en ejemplos como el Parque Natural de Doñana donde miles de animales, la mayoría aves, han muerto por los efectos de la contaminación lumínica.

Otro ejemplo que todos hemos podido encontrar en alguna ocasión proviene de la conocida época del "boom del ladrillo". Se multiplicaron urbanizaciones y construcciones en nuevas superficies donde lo primero que se edificaba eran las calles y sus farolas, las cuales quedaban encendidas desde el primer momento sin siquiera ser habitadas ni contar incluso con viviendas para ello. Urbanizaciones fantasma, algunas de las cuales a día de hoy continúan encendidas en la nada.

En cuanto a España se refiere son muchos los proyectos que ya se están llevando a cabo para frenar este derroche innecesario de luz que como hemos visto es tan perjudicial.

La institución más importante actualmente a cargo de este problema y de la cual el proyecto NixNox forma parte es la Red Española de Estudios sobre la Contaminación Lumínica (REECL) que tiene como objetivo principal reunir a los diferentes grupos de investigación sobre contaminación lumínica que trabajan en España para facilitar la comunicación con vistas a potenciar la colaboración entre ellos.



Figura 2.5: Imagen nocturna de nuestra península desde la Estación Espacial Internacional

Algunas de las tareas llevadas a cabo por REECL han sido:

- Catalogación de los grupos de investigación dedicados al estudio de la contaminación lumínica en todas las áreas de conocimiento.
- Creación de un foro de discusión científica y técnica.
- Elaboración de mapas de brillo de fondo de cielo en zonas particularmente interesantes.
- Divulgación y difusión de resultados.

Y actualmente se sigue trabajando en otros aspectos como:

- Organización de los canales de comunicación dentro de la red.
- Definición de estándares de medidas. Establecimiento de protocolos.
- El portal web sirve de repositorio de información sobre nuestras actividades de investigación (publicaciones científicas), de docencia (tesis doctorales) y de divulgación.
- Mantenimiento de la red española de fotómetros SQM para monitorización del brillo de cielo.
- Coordinación con las asociaciones de lucha contra la contaminación lumínica.

Con una visión más amplia nace stars4all, proyecto de la Unión Europea que comenzó a finales del 2015 (Año Internacional de la Luz) que une a socios relacionados

con la tecnología de la información, ciencias sociales, economía, astronomía y ecología para crear iniciativas autosostenibles sobre contaminación lumínica. [stars4all]

El proyecto es coordinado por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y colabora con otras instituciones como la Universidad Complutense de Madrid (UCM), la Universidad de Southampton (SOTON), el Instituto Leibniz de Ecología de Agua Dulce y Pesca Continental (IGB), CEFRIEL Italia, la escuela de negocios ESCP-Europa, la Red Europea de Crowdfunding (ECN) y el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC).

Entre sus principales actividades se encuentran:

- Retransmisión de eventos astronómicos a nivel mundial y oferta de material multimedia asociado a ellos. Los eventos van desde auroras boreales hasta eclipses solares y lunares.
- Preservar la oscuridad de los cielos europeos. Esta iniciativa pretende promover una legislación sobre la protección de los espacios naturales nocturnos.
- Creación de un distintivo para reconocer el cumplimiento de la normativa de protección del cielo por parte de empresas, ONGs, municipios o cualquier otro tipo de institución.
- Crear un mapa sobre sistemas de alumbrado ineficientes. Se invita a ciudadanos y autoridades a que participen en la detección de farolas ineficientes o que emitan demasiada cantidad de luz al cielo.
- Identificación del derroche de energético debido a iluminación comercial.
- Monitorización de la contaminación lumínica mediante la red de Cities At Night <http://www.citiesatnight.org/> utilizando imágenes procedentes de la Estación Espacial Internacional.
- Ampliación del alcance de la ya creada red europea Loss of the Night (que permite a los ciudadanos la medición de los cambios en nuestros paisajes nocturnos) con el objetivo de aumentar el número de actividades relacionadas con la contaminación lumínica.

[meteogalicia], [iac], [cuartopoder], [cadenaser]

2.6. Contaminación lumínica en el mundo

Más del 80 % del mundo, y más del 99 % de los Estados Unidos y Europa vive bajo cielos contaminados. La Vía Láctea no es visible para más de un tercio de la humanidad, incluyendo el 60 % de los europeos y casi el 80 % de norteamericanos.

Existen lugares en la Tierra donde sus habitantes tienen que viajar largas distancias para poder encontrar un cielo con calidad suficiente para poder observar y

diferenciar objetos celestes nocturnos (como puede ser la Vía Láctea). En ese sentido, el lugar más alejado de poder ver la Vía Láctea es un área cercana al Cairo (Egipto) en el Delta del Nilo. Otros lugares donde tienen que viajar largas distancias son Bélgica, Países Bajos, Alemania, el norte de Italia. Una larga cantidad de ciudades comprendidas entre Boston y Washington (norte de Estados Unidos). La perdemos también en Londres, Liverpool, Leeds, alrededores de Beijing, Hong Kong, China y Taiwán. Y es imposible encontrarla en Singapur, San Marino, Kuwait, Qatar y Malta.

Singapur es el país más contaminado lumínicamente (100 % del cielo iluminado). La población vive bajo cielos tan brillantes que el ojo no puede adaptarse completamente a la oscuridad en la visión nocturna (ver apéndice B). Otros países de niveles similares y viviendo por tanto bajo niveles extremos de luminosidad son Kuwait (98 %), Qatar (97 %), Emiratos Árabes Unidos (93 %), Arabia Saudita (83 %), Corea del Sur (66 %), Israel (61 %), Argentina (58 %), Libia (53 %) y Trinidad y Tobago (50 %).

En el otro lado tenemos los países de población menos afectada por la contaminación lumínica: Chad, República Centroafricana y Madagascar, con más de tres cuartas partes de sus habitantes viviendo bajo cielos vírgenes. Los países y territorios con mayor área sin contaminar son Groenlandia (sólo 0.12 % sin cielo virgen), República Centroafricana (0.29 %), Niue (0.45 %), Somalia (1.2 %) y Mauritania (1.4 %).

Para saber cómo podemos determinar un cielo natural, en noches sin luna, un cielo claro lejos de la Vía Láctea y la luz zodiacal tiene un valor aproximado de 22 mag/arcseg² en la banda V, que equivale a 1.7×10^{-4} cd/m². (ver apéndice A).

Según el último estudio realizado de contaminación lumínica global, respecto al porcentaje de población mundial se puede decir que:

- Hasta un 1 % está por encima de la luz natural (0 a 1.7 μ cd/m²). Cielo primitivo.
- De un 1 a un 8 % está por encima de la luz natural (1.7 a 14 μ cd/m²). Relativamente no contaminado en el cenit pero degradado hacia el horizonte.
- De un 8 a un 50 % está por encima del brillo nocturno natural (14 a 87 μ cd/m²). Cielos contaminados degradados hacia el cenit.
- Desde 50 % está por encima de lo natural hasta el nivel de luz bajo el cual la Vía Láctea ya no es visible (87 a 688 μ cd/m²). El aspecto natural del cielo se pierde.
- Desde que la Vía Láctea se pierde hasta la estimación de la estimulación de los conos (688 a 3000 μ cd/m²)
- Intensidades de luz nocturna muy altas (>3000 μ cd / m²). La adaptación nocturna ya no es posible para los ojos humanos

Esto demuestra que el problema de la contaminación lumínica es un asunto global. Hemos convertido el planeta en una gran bombilla que nos ha robado la oportunidad de observar el propio espacio, la propia galaxia en la que habitamos.

2. LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA Y SUS EFECTOS

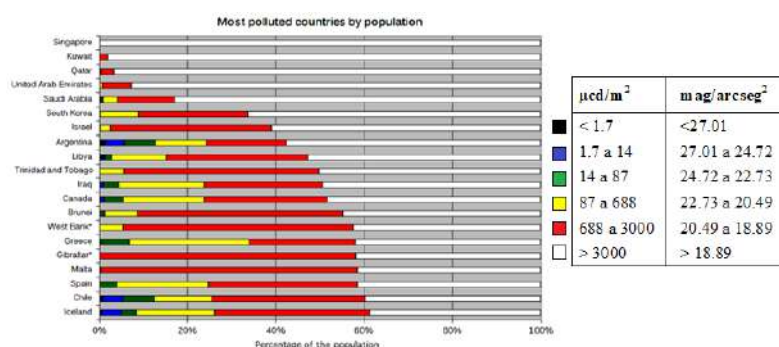


Figura 2.6: Países más afectados por la contaminación lumínica por población

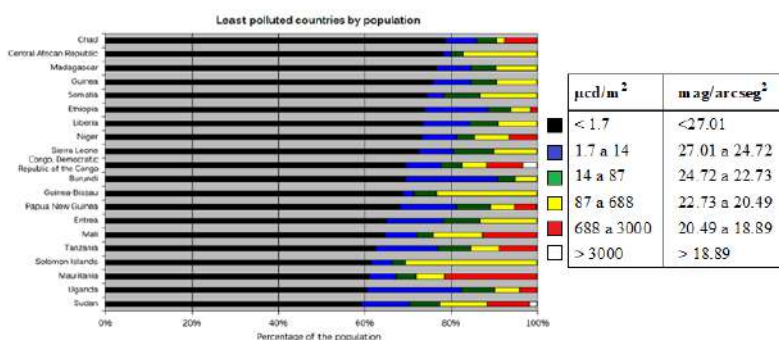


Figura 2.7: Países menos afectados por la contaminación lumínica por población

A continuación, en la figura 2.8 se muestran los niveles de contaminación en los países pertenecientes al G20 por población y área. Los clasificación de colores sigue la misma leyenda que las imágenes 2.6 y 2.7.

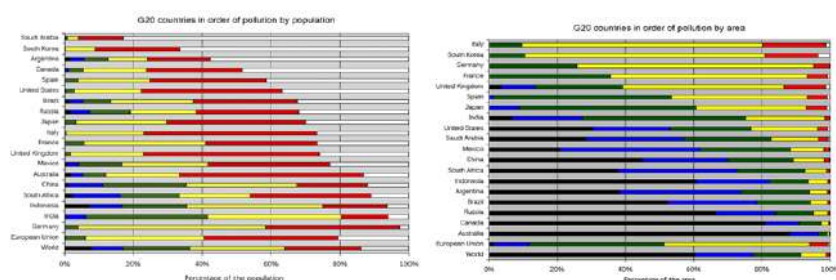


Figura 2.8: Contaminación lumínica en los países pertenecientes al G20 según población (izquierda) y área (derecha)

Posibles soluciones e iluminación responsable

Son múltiples y diferentes medidas las que podemos tomar para reducir el impacto de la contaminación lumínica en nuestro entorno. Una reducción de luz a nivel local contribuye a la reducción a escala global, “gota a gota se hace el mar”.

Algunas de las posibles soluciones para evitar el efecto directo sobre nuestro organismo pasan por unos sencillos gestos que basta con incorporar a nuestra rutina.

Se aconseja evitar el uso de luz azul a última hora de la tarde y por la noche. Las lámparas de alumbrado exterior deberían tener una temperatura de color correlacionada no superior a 3000 K. Esta iluminación no la podemos cambiar pero si la del interior de nuestras viviendas.

La pantallas de los dispositivos que utilizamos a diario cuentan con un ajuste de brillo que podemos regular, incluso cada vez son más los que cuentan con el modo nocturno. Es aconsejable dormir en condiciones de baja iluminación y no exponernos a la luz de dichos dispositivos durante la noche para evitar la ruptura de la segregación de melatonina (ver apartado 2.1).

En cuanto a los niveles de luz exteriores, si bien es de vital importancia el tipo de iluminación utilizado, hay muchas otras alternativas para reducir los niveles de contaminación. Por ejemplo la reducción de luces en lugares donde el tráfico es muy bajo. Incluso con una mirada más futurista, los coches autónomos no precisarán de altos niveles de luz. El apagado de escaparates, rótulos o neones publicitarios o grandes edificios a partir de cierta hora de la noche (medida que ya está siendo llevada a cabo). Además de la regulación de nuevas instalaciones lumínicas.

3.1. Tipos de iluminación

Para entender que iluminación es la más adecuada y eficaz, pero a la vez menos perjudicial para el entorno, es conveniente conocer los tipos de iluminación y sus características. Pero no es lo único importante, también lo es la forma en que la

luz se distribuye. La forma en que la luz artificial es enviada hacia el cielo puede dividirse en tres partes:

- Directa, desde la propia fuente de luz (lámpara ó bombilla).
- Por reflexión en las superficies iluminadas.
- Por refracción en las partículas del aire.

La refracción suele tener un impacto muy despreciable con respecto a las otras dos y su influencia depende del tamaño y cantidad de partículas del aire entre la fuente de luz y la zona iluminada. Esta contribución aumenta cuanto mayor sea el número de partículas contaminantes o de aerosoles en el aire. Disminuye con la distancia entre la fuente y la zona iluminada. Supone una contribución importante en grandes ciudades como Madrid ya que propicia su extensión a mayor distancia.

La reflexión suele tener un impacto inferior a 10 veces el impacto directo. La diferencia principal es que tiene un brillo millares de veces inferior.

El impacto directo es lógicamente el más perjudicial. Por eso es importante la dirección de la iluminación.

De los tipos de lámparas que actualmente existen en el mercado, atendiendo a sus espectros, las podemos clasificar de la siguiente forma:

1. MUY CONTAMINANTES

- **Lámparas de Vapor de Mercurio a alta presión:** Tienen una elevada emisión en el ultravioleta. Su luz es blanca con rendimientos de color inferiores al 60 %. Es recomendable para zonas peatonales y de jardines. Son las menos eficientes del mercado en lámparas de descarga.
- **Lámparas de halogenuros metálicos:** Tienen una fortísima emisión en el ultravioleta. Su luz es blanca azulada con rendimientos de color entre el 60 % y el 90 %. Es recomendable para alumbrado de zonas deportivas, puertos, aeropuertos, fachadas de edificios y grandes zonas donde se requiera un elevado rendimiento cromático. Son muy eficaces, parecidas al sodio de alta presión, pero de corta vida. La luz producida por estos focos es especialmente dañina y suelen tener elevada inclinación (superior a 20°) donde parte del flujo de la lámpara (bombilla) es enviado directamente sobre el horizonte, desperdiciando energía luminosa. Un sólo proyector puede impactar más que una población iluminada de 1.000 habitantes.

Otras instalaciones muy impactantes por su tamaño y proliferación son los alumbrados decorativos u ornamentales en los que el flujo de luz de la luminaria sale en todas las direcciones, especialmente sobre el horizonte, como son las bolas o globos. Otros casos aunque de carácter temporal serían las iluminaciones de carácter festivo.

2. MEDIANAMENTE CONTAMINANTES

- **Lámparas incandescentes:** No emiten en el ultravioleta pero si en el infrarrojo cercano. Su espectro es continuo. Su luz es amarillenta con un rendimiento de color del 100 %. No es recomendable para alumbrado exterior, excepto para iluminar detalles ornamentales. Este tipo comprende las bombillas tradicionales y son las más ineficaces del mercado, emiten un 75 % de calor y sólo un 25 % de iluminación.

- **Lámparas incandescentes halógenas:** Iguales que las incandescentes pero emiten algo más en el ultravioleta si no va provista de un cristal difusor (son peligrosas sin este cristal por emitir en el ultravioleta duro). Son algo más eficaces que las incandescentes.

Este mismo mes de septiembre han dejado de ser fabricadas las bombillas incandescentes.

- **Lámparas fluorescentes en tubos y compactas (vapor de mercurio a baja presión):** Emiten en el ultravioleta. Su luz es blanca con rendimientos cromáticos entre el 40 % y el 90 %. Es recomendable para alumbrados peatonales y de jardines. Tienen una alta eficiencia.

Estas lámparas son medianamente contaminantes si no se usan en grandes instalaciones y convenientemente apantalladas evitando emisión de luz sobre el horizonte. Debido a sus bajos paquetes de lúmenes, si se usan compactas con voltajes de hasta 25 W (o incandescentes hasta 60 W), de forma discreta y separadas a más de 15 m. unas de otras, no representan un impacto apreciable si están a más de 10 Km siempre y cuando no se superen los niveles de iluminación recomendados (10-5 lux de media y 20 lux de máxima puntual).

Por otro lado, la sensibilidad del ojo humano se desplaza hacia el azul con niveles bajos de iluminación por lo que las lámparas fluorescentes son más adecuadas para instalaciones que requieran un alumbrado tenue y de señalización con entornos oscuros (paseos, jardines).

3. POCO CONTAMINANTES

- **Vapor de Sodio a Baja Presión (VSBP):** emiten prácticamente sólo en una estrecha zona del espectro, dejando limpio el resto. Su luz es amarillenta y monocromática. Es recomendable para alumbrados de seguridad y carreteras fuera de núcleos urbanos. Son las más eficientes del mercado y carece de residuos tóxicos y peligrosos.
- **Vapor de Sodio a alta Presión (VSAP):** emiten sólo dentro del espectro visible. Su luz es amarillenta con rendimientos de color entre 20 % y 80 %, dependiendo del modelo. Es recomendable para todo tipo de alumbrado exterior. Son las más eficientes del mercado después de las de baja presión.

Los LED en cambio dan muchas prestaciones, se pueden integrar en cualquier forma o producto, ofreciendo increíbles posibilidades de diseño. Tienen una vida útil más larga, un tamaño más pequeño, difunden mejor la luz y pueden reducir en un 22 % el consumo energético. Otros beneficios de los LED son que no contienen mercurio, no se calientan, ofrecen una iluminación inmediata, cálida, uniforme y de calidad y además pueden ser fabricados en muy diversos colores del espectro visible de manera mucho más definida y controlada.

En cabeza en la actualidad contamos con la tecnología **LED PC-Ámbar**¹. Todas las temperaturas de color del LED (6500K, 4000K y 3000K) radian un pico de emisión alrededor de los 440nm. Este pico de emisión es la parte azulada que más afecta al medio ambiente y más fácilmente se dispersa en la atmósfera. Los principales beneficios de esta tecnología se basan en la eliminación del espectro de emisión alrededor de los 440 nm obteniendo una luz anaranjada prácticamente invisible a la fauna. Y un alto índice de reproducción cromática²(IRC o CRI), alrededor de 40, lo que significa una mejora del 60 % respecto a las luminarias de vapor de sodio de alta presión que tienen un valor de 25.

En los espacios de interés natural y astronómico se debe cumplir con unos requerimientos muy estrictos de iluminación que hasta la aparición de la tecnología LED PC-Ámbar solo podían satisfacer las lámparas de vapor de sodio.

El área que rodea el Observatorio Astronómico de Canarias ha adoptado este tipo de iluminación logrando un ahorro energético del 67 %.

[[antena3](#)], [[guaixfis](#)], [[energynews](#)]

3.2. Uso adecuado de la iluminación

La iluminación en las calles tiene como finalidad que podamos ver el suelo por el que caminamos, pero su uso irresponsable ha derivado en la desaparición de las estrellas.

Al desarrollar este concepto de descenso de contaminación lumínica no nos referimos en ningún caso a apagar las calles. No se trata de dejar el mundo a oscuras, se trata de conseguir una iluminación responsable, sostenible, eficiente y suficiente que nos permita desarrollar nuestras actividades sin dañar el entorno y nuestra propia salud, y sin que suponga un derroche energético y económico.

¹El desarrollo de PC-Ámbar es el fruto de la investigación del equipo de ingenieros de Ignialight en colaboración con los principales organismos expertos en prevención de la afectación de la luz artificial al medioambiente: el IAC (Instituto Astrofísico de Canarias), UM (Universidad de Murcia), CEI (Comité Español de Iluminación) e IREC (Institut de Recerca d'Enginyeria de Catalunya).

²El índice de reproducción cromática (IRC o CRI) es la medida utilizada en relación a una fuente de luz para medir su capacidad de mostrar los colores de un objeto de manera real". El rango en el índice de reproducción cromática va del 0 al 100. A mayor número en el IRC, mejor reproducción de color.

³Eficacia nominal típica: El valor del flujo lumínico (en lm), es la salida de la lámpara sin tener en cuenta la pérdida de las ópticas, lentes y cierres y el valor de la potencia (en W), es el de la lámpara (exclusivamente), sin tener en cuenta la aportación de equipos auxiliares.

Tipo de lámpara	Eficacia nominal típica ³ (lm/W)
Incandescente (INC)	10
Halógena (HAL)	20
Vapor de mercurio (VM o VMAP)	50
Fluorescente compacto (FL-C)	65
Fluorescente (FL)	75
Halógeno metálico (HM)	90
Vapor de sodio de alta presión (VSAP)	100
Vapor de sodio de baja presión (VSBP)	130
LED blanco neutro (4000K)	140
LED blanco cálido (3000K)	130
LED PC ámbar	95

Cuadro 3.1: Tipos de iluminación

La principal forma de uso de iluminación responsable empieza por **mantener la luz apagada cuando no se desarrolla ninguna actividad**, excepto por motivos de seguridad. En este sentido los detectores de presencia son de gran utilidad. Algo que parece tan sencillo y evidente no lo es tanto en ciertas ocasiones (véase el ejemplo del “boom del ladrillo” del que se habla en el apartado 2.5).

Con esto en mente, para llevar a cabo una correcta iluminación es necesario saber las prestaciones requeridas. No precisa la misma iluminación un paso peatonal que un campo de fútbol, por ejemplo. Los criterios fundamentales que determinan las características que tiene que tener una instalación de iluminación, y que por lo tanto deben conocerse antes de emprender cualquier acción (diseño, modificación, inspección, otorgamiento de licencia o autorización...), son tales como:

- La vulnerabilidad del entorno hacia la contaminación lumínica.
- El uso al que va destinada la instalación. Los niveles de iluminación, el índice de reproducción cromática (IRC), etc.
- O el horario de funcionamiento de la instalación de iluminación.

Como se ha desarrollado en el apartado anterior hay varios tipos de luz cada una con unas características diferentes. En función de estos criterios debe usarse el tipo de lámpara o bombilla adecuada para cada instalación procurando usar la más eficiente para cada caso (por ejemplo, no debe usarse lámparas incandescentes o de vapor de mercurio para alumbrados de seguridad).

Hay que tener en cuenta la zona del espectro donde emite. Una lámpara emitiendo en la zona del ultravioleta (no útil para el ojo humano) impacta más que cualquier otra con el mismo flujo. La radiación ultravioleta es una onda de gran energía con gran alcance y llega con mucha más fuerza a las instalaciones telescópicas. Además cuanto mayor sea la zona del espectro donde emite, mayor es su impacto.

Lo ideal es usar lámparas cuya distribución espectral tenga la máxima intensi-



Figura 3.1: El cielo según niveles de contaminación y tipos de luminarias

dad en las longitudes de onda a las que el ojo tiene la máxima sensibilidad en las condiciones típicas de las áreas a iluminar (normalmente visión fotópica), evitando al máximo las lámparas de amplio espectro (de luz blanca). De este modo, además de favorecer el máximo aprovechamiento de la luz para la función visual, se evita en parte invadir la región del espectro correspondiente a la visión escotópica. (ver apéndice B).

La lámpara elegida debe ser, por tanto, aquella que a igual flujo luminoso ocasiona el menor impacto ambiental, intentando elegir en orden ascendente de minimización del nivel de contaminación y maximización de la eficiencia. En la actualidad, el desarrollo de la tecnología LED PC ámbar va en cabeza del alumbrado eficiente y respetuoso. En su defecto son las de sodio de baja y alta presión, las únicas que sustituyen estas prestaciones, salvo excepciones fuertemente justificadas. Además la espectroscopia no se ve afectada por estas luminarias.

Pero el uso de una iluminación adecuada va más allá del tipo de lámpara que utilizemos. Existen otros factores a tener en cuenta para un correcto alumbrado.

No sobreiluminar, es decir, ajustar la cantidad de luz instalada necesaria para llevar a cabo la actividad con normalidad. Y no aplicar niveles de iluminación superiores a los recomendados por los organismos oficiales. Como ejemplo se pueden disminuir estos niveles de forma homogénea a las horas de la noche en que la disminución del tráfico no justifica su mantenimiento.

Iluminar exclusivamente aquellas áreas que lo necesiten, de arriba hacia

abajo y sin dejar que la luz escape fuera de estas zonas.

Emplear de forma generalizada luminarias apantalladas cuyo flujo luminoso se dirija únicamente hacia abajo impidiendo que se emita por encima de la horizontal. Toda luz enviada lateralmente, hacia arriba o hacia los espacios en donde no es necesaria, no proporciona seguridad ni visibilidad y es un despilfarro de energía y dinero.

El límite adoptado en las mejores normativas de estados y regiones europeas (no así en España) es de 0 cd/klm a 90° o más sobre el plano horizontal (con una tolerancia de $0,5 \text{ cd/klm}$) para cualquier luminaria pública o privada (salvo excepciones fuertemente justificadas).



Figura 3.2: Direcciones de la luz y su aprovechamiento

El parámetro que más se ha utilizado en el ámbito luminotécnico (incorporado a las normativas en vigor), es el flujo hemisférico superior o FHS de una luminaria, pero es un parámetro totalmente inadecuado. En su lugar, un parámetro correcto es la intensidad luminosa de la luminaria en cada dirección de emisión por unidad de flujo total emitido (la matriz de intensidades), una magnitud que se obtiene de forma rutinaria en el laboratorio a partir de la medida de la distribución luminosa de la luminaria. Para comprender la efectividad de este criterio frente al de FHS (en uso en las distintas normativas españolas en vigor), considérese que, en promedio, la fracción de flujo devuelta por el suelo es aproximadamente el 10 % del flujo total emitido por una luminaria. Por tanto, por cada 100 lm emitidos desde una luminaria, 10 lm son reflejados irremediabilmente hacia arriba. Si permitimos, por ejemplo, que otros 3 lm sean emitidos directamente hacia el cielo desde la luminaria ($\text{FHS}=3\%$), el flujo hemisférico superior del conjunto sería unos 13 lm, lo que supone un aumento de contaminación lumínica debida al FHS de aproximadamente el 30 % sobre lo ya inevitable por la reflexión del suelo. Se puede entender este incremento más fácilmente mirando la tabla 3.2.

Se observa que un FHS como el que permiten las leyes en vigor y las recomendaciones procedentes del sector luminotécnico supone más que triplicar (333 %) la contaminación lumínica debida a la inevitable reflexión del suelo. Podría, no obstante, pensarse que un incremento del 5-10 % puede considerarse admisible y, consecuentemente, que un FHS entre 0,5 y 1 % puede ser razonable. Sin embargo no es

3. POSIBLES SOLUCIONES E ILUMINACIÓN RESPONSABLE

A	B	C	D	E	F
FHS(%)	Flujo directo hacia arriba (lm)	Flujo directo hacia abajo (lm)[100-B]	Flujo reflejado hacia arriba (lm)[0,1·C]	Flujo total hacia arriba (lm)[B+D]	Incremento (%) [(B/D)·100]
1	1	99	9.9	10.9	10
5	5	95	9.5	14.5	53
10	10	90	9	19	111
25	25	75	7.5	32.5	333

Cuadro 3.2: Aumento de contaminación lumínica con valores crecientes de FHS

así, debido al efecto de la distinta distribución de la intensidad luminosa de las luminarias y de las superficies iluminadas. Debido a la atmósfera la emisión en pequeños ángulos sobre la horizontal se propaga más lejos que la luz emitida en ángulos elevados y se suma a la luz procedente de otras fuentes lejanas, creando un efecto de adición muy eficiente a la hora de producir niveles importantes de luminosidad artificial del cielo. Por el contrario, la luz emitida a grandes ángulos o directamente hacia arriba ilumina la atmósfera sobre la fuente, escapa en su mayor parte al espacio y no se propaga demasiado ni produce adición.

Otra medida que se debe tomar es la regulación y el apagado de iluminaciones ornamentales, monumentales y publicitarias. Reducir el consumo en horas de menor actividad, mediante el empleo de reductores y apagar totalmente las luminarias que no sean necesarias. Así como prohibir los cañones de luz o láser y cualquier proyector que envíe la luz hacia el cielo.

En La Palma (Canarias), este aspecto se tomó en serio desde el principio. Siempre se contó con el apoyo de las autoridades y gran parte de la población. Con motivo del aniversario del observatorio (el 25 de junio de 1995) se apagaron todas las luces de ciudades y pueblos durante una hora, como la iniciativa de “la hora del planeta” a nivel local. En ese momento la iluminación era aún a base de luces de mercurio y sodio de alta presión. Antes, durante y después de esta hora se realizaron espectros de cielo que mostraron que la contaminación debida a líneas de mercurio desaparecía durante el apagón y la del sodio decrecía quedando solo un residuo debido al resplandor natural por la excitación de átomos de sodio por partículas de alta energía en las altas capas de la atmósfera.

[wiki-indiciereproduccion]

Fotómetro SQM

4.1. Descripción

El dispositivo utilizado para llevar a cabo nuestras medidas de calidad de cielo nocturno es el denominado Unihedron Sky Quality Meter (SQM-L, figura 4.1). Se trata de un aparato de uso muy sencillo para medir el brillo de fondo de cielo ⁴. De pequeño tamaño (cabe en un bolsillo) y bajo coste, con él se pueden realizar medidas en cualquier lugar y en cualquier momento y con una precisión comparable a una profesional, pues se trata de un detector de estado sólido de respuesta lineal y compensa las medidas de acuerdo a la temperatura del detector.

Funciona con una batería de 9V y cualquiera puede utilizarlo, es tan sencillo como apuntar hacia donde queremos medir, apretar un botón y esperar a que la medida aparezca en la pantalla. [astronum],[sqmreference],[eprints-nixnoxprocedure],[astronum]



Figura 4.1: SQM

Presionando el botón de "START" una vez el dispositivo se pone en marcha. Este nos lo hará saber haciendo sonar un "beep". En cielos iluminados (urbanos), aparecerá una lectura casi inmediatamente. En las condiciones más oscuras (cielos sin Luna, o lejos de la civilización) el medidor puede tardar cerca de un minuto en

⁴Brillo de fondo de cielo: Flujo que llega desde un ángulo sólido de la unidad del cielo nocturno en un área unitaria del detector

4. FOTÓMETRO SQM

completar su medición. Durante este tiempo debemos asegurarnos que el fotómetro mantiene la posición.

Además si tras pulsar una vez mantenemos presionado el botón el dispositivo nos devolverá la temperatura interna, primero en °C y posteriormente en F. Por último aparecerá el modelo y número de serie del aparato. De lo contrario solo tendremos que esperar unos segundos para que el dispositivo se apague automáticamente.

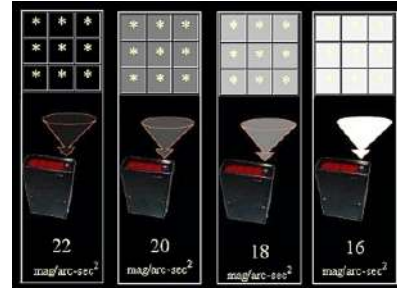


Figura 4.2: Representación de distintos valores de brillo de fondo de cielo

La unidad astronómica para medir brillo superficial de objetos extensos (y por tanto la que nos proporciona el SQM) es mag/arcsec^2 (magnitudes por segundo de arco al cuadrado), que es equivalente a la magnitud aparente del flujo emitido por un segundo de arco al cuadrado del objeto. Es decir obtener un valor de 22 mag/arcsec^2 es lo mismo que decir que existe un brillo similar al de una estrella de magnitud 22 en un área de un segundo de arco al cuadrado. SQM va desde el valor 16 (cielos muy iluminados) hasta el valor 22 (cielos oscuros) (ver figura 4.2).

Los valores obtenidos pueden convertirse a otra escala más familiar para los aficionados a la astronomía: la magnitud límite estelar(MALE) (ver A).

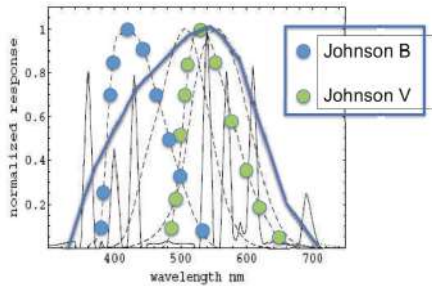


Figura 4.3: Banda fotométrica del SQM

El SQM mide en una banda fotométrica propia que engloba las bandas B y V del sistema foto-métrico de Johnson (El medidor es sensible únicamente a la luz visible; bloquea la luz cercana al infrarrojo) intentando emular la respuesta espectral del ojo humano (figura 4.3). La curva que describe el filtro V se parece mucho a la que traza la sensibilidad fotópica del ojo.

Denominemos FV al flujo recibido de un objeto astronómico en el intervalo de longitudes de onda definido por el perfil de ese filtro. Entonces el brillo del astro medido en magnitudes estelares se expresa como

$$SQM = V - 2,5 \log_{10} FV \quad (4.1)$$

donde V es la constante de la banda V. Este es el valor que nos devuelve el fotómetro.

La precisión de cada medidor así como también la diferencia en punto cero entre cada SQM-L calibrado es de aproximadamente 10 % ($0.10 \text{ mag/arcsec}^2$).

Por último la lectura del SQM indica el brillo del cielo dentro de su campo de visión, es decir, en la región angular de cielo que puede abarcar. La media del ancho (HWHM) de sensibilidad angular es de 10° . Por tanto la media del máximo (FWHM) y el ancho total es entonces de 20° .

4.2. Otros dispositivos

El fotómetro SQM es una manera sencilla, barata y eficiente de realizar mapas de brillo de fondo de cielo y así comprobar su calidad. No obstante existen otros aparatos de medida también válidos para este fin. Sin entrar en detalles se citarán algunos de ellos. A pesar de que nada tiene que ver con un dispositivo, durante bastante tiempo se ha utilizado el **método de observación visual clásico**; conteo a ojo desnudo del número de estrellas visibles dentro de un conjunto de asterismos establecidos. Aunque claramete este es un método muy subjetivo alguna vez es tenido en cuenta ya que puede, en una primera aproximación, decirnos algo sobre la calidad del cielo.

- Unihedron fabricó además **dos variantes del SQM**, ambas con el objetivo de automatizar las medidas. Una esta dotada de puerto USB(SQM-LU) para conectar al ordenador y la otra es manejable por internet a través de entrada ethernet. [**unihedron**]
- Una opción buena y barata consiste en una **cámara digital con objetivo de ojo de pez** que abarque toda la bóveda celeste. Es una forma de conseguir mapa de brillo de fondo de cielo y estudiar su calidad. El principal problema de este dispositivo es que sus filtros no se corresponden exactamente con los filtros típicos de Johnson, por tanto precisa de correcciones.

Otra opción es sustituir la cámara digital por una cámara CCD.

- **AstMon(en inglés AllSky Transmission MONitor)** es un instrumento científico cuyo objetivo es realizar un monitoreo continuo del cielo nocturno de un cierto lugar, obteniendo la medida del brillo de fondo de cielo y la extinción. Es un dispositivo pensado para lugares fijos, recogiendo datos continuamente allí donde esté colocado. Así, después de varias noches de medición seremos capaces de evaluar la calidad astronómica del lugar. Además de ser capaz de generar con su propio software brillos de fondo de cielo, también puede hacer mapas de nubes. Debido a estas prestaciones se trata de un dispositivo de precio elevado.
- **Telescope Encoder and Sky Sensor (TESS)** es un dispositivo auxiliar para el observatorio astronómico con dos funciones: Encoder Absoluto de baja resolución para el telescopio remoto (transforma el movimiento en señal eléctrica). Y Sensor de Calidad del Cielo y Detector de Nubes. El sensor usado para

4. FOTÓMETRO SQM

monitorizar el brillo del cielo es el mismo que el SQM y el Skymonitor. Pero sin el filtro que contiene el SQM que elimina la contribución infrarroja del espectro. [**observatorioremoto**]

Toma de datos y análisis de resultados

5.1. Proceso de medida



Figura 5.1: *Montaje de medida con el fotómetro SQM*

En primer lugar debemos de disponer de un montaje para colocar el fotómetro y poder medir asegurándonos de que este no se moverá en el proceso y que cuente con algún sistema que nos permita medir los ángulos de altura y acimut (ejemplo, ver imágenes 5.1 y 5.2).

Las medidas deben realizarse en noches oscuras, esto quiere decir noches sin luna y con cielo despejado (las nubes pueden hacer rebotar la luz proporcionándonos medidas erróneas). Y lo haremos en áreas abiertas, lo más alejadas posible de luces directas, donde pueda visualizarse toda la bóveda celeste evitando que quede tapada tras edificios, árboles, etc. Preferiblemente que todo el horizonte sea visible para que nada nos moleste si acudiéramos con nuestro telescopio.

Una vez hemos llegado a la zona elegida en una noche de las características ya mencionadas colocamos nuestro montaje con el dispositivo orientado correctamente y perfectamente perpendicular al suelo (nos ayudaremos con un nivel). A pesar de que el SQM compensa las medidas según la temperatura, es aconsejable esperar unos minutos a que se iguale con el entorno.

La primera medida se tomará apuntando directamente hacia el cenit (que será la parte más oscura) y a partir de aquí iremos modificando los ángulos hasta cubrir toda la bóveda. Sabremos que estamos midiendo cuando oigamos un “beep”, el fotómetro emite una señal acústica mientras está recogiendo fotones que para cuando tiene suficientes para proporcionar una medida. Si nos encontramos en una zona muy



Figura 5.2: Sistema de medición de ángulos en acimut y altura

oscura el SQM puede tardar varios segundos en tomar los datos. Empezando por el sur tomaremos medidas cada 30 grados de acimut cubriendo toda la circunferencia, y en altura bajaremos cada 20 grados de modo que mediremos a alturas de 20, 40, 60 y 80 grados hasta completar una tabla como la que aparece en la figura 5.3.

Una vez que hemos completado todas estas posiciones tomamos una última medida dirigiendo de nuevo el fotómetro hacia el cenit. No debemos olvidarnos de anotar la temperatura. Completada esta tabla tendremos una medida para cada uno de los puntos mostrados en la figura 5.4.

El proceso completo de medida suele tomar un tiempo de entre 20 y 30 minutos.

Para mayor comodidad guardaremos los datos en un fichero de formato txt, que es el usado por la aplicación de generación de mapas de brillo. Podemos encontrar el archivo listo para introducir los datos en la página del proyecto NixNox. Además de los valores de las medidas anotaremos las coordenadas del lugar y otras características, o cualquier información relevante para que las medidas tengan la mayor exactitud posible.

El fichero será tratado en Matplotlib a través de un Código de Python que interpolará los datos de los puntos tomados generándonos un mapa de brillo de fondo de cielo. Se trata de un mapa de “curvas de nivel” en el que la variación de color nos mostrará la diferencia de brillo y serán localizables fácilmente los focos de luz más contaminantes como podremos ver a continuación.

```

# FECHA:
# FOTOMETRO (Número de serie o número SEA) :
# HORA INICIO (UT):
# TEMPERATURA (°C):
# HORA FINAL (UT):
# LOCALIZACIÓN:
# PARAJE:
# LATITUD:
# LONGITUD:
# ALTITUD (m):

# OBSERVACIONES:

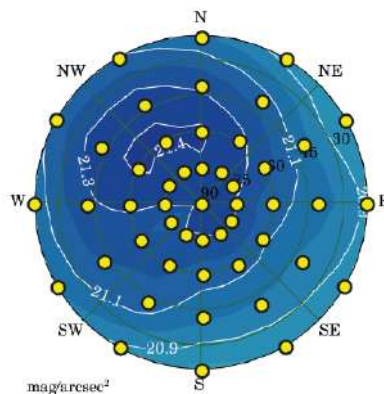
# MEDIDA EN EL CENIT:

# Además del cenit (m90), se están tomando medidas en alturas de 20, 40, 60 y 80 así como en doce acimutes
# empezando desde el sur y continuando hacia el oeste. (S,W,N,E,S) espaciados 30 grados.
# Es muy importante que los datos se completen en el formato que mostramos a continuación,
# que es el único que acepta el software que genera el mapa de brillo de cielo.

# Sur      Oeste      Norte      Este
#ACINUT-> 0   30    60    90    120    150    180    210    240    270    300    330

m20 = [
m40 = [
m60 = [
m80 = [
m90 = [

```

Figura 5.3: *Plantilla de medidas*Figura 5.4: *Puntos medidos en la bóveda celeste para construcción del mapa*

5.2. Análisis de datos

El SQM toma medidas entre los valores 16 y 22, donde 22 corresponde a un cielo muy oscuro y 16 a uno de gran contaminación lumínica.

En cielos de gran calidad astronómica se puede ver trazada la trayectoria de la Vía Láctea en el mapa de brillo de cielo.

Es muy importante fijarse en aquellas escalas que se encuentren desplazadas, ya que el brillo del cielo variará con respecto a estas en un factor multiplicado por 10. Es decir si tenemos dos medidas con una diferencia de 3 magnitudes entre ellas, significa que la de menor magnitud corresponde a un cielo 30 veces más brillante, lo que refleja su nivel de contaminación.

Existe una dependencia con la hora de la noche a la que se realizan las medidas.

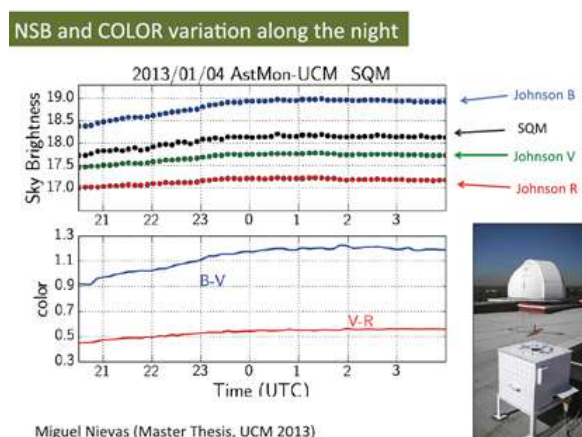


Figura 5.5: Variación del brillo y color del fondo de cielo a lo largo de la noche en el observatorio UCM

Valores más oscuros se registrarán en las horas centrales de la noche cuando haya desaparecido el efecto del crepúsculo y la atmósfera se encuentre más reposada. Disminuye la cantidad de partículas en suspensión en otros motivos por efecto de la disminución de temperaturas.

Con respecto a este punto unos mayores niveles de contaminación favorecerán la dispersión de la luz a mayor distancia.

La contribución de edificios en las grandes ciudades desaparecerá también, puesto que se están adoptando medidas para que sean apagados a partir de cierta hora.

En la imagen 5.5 se visualiza esta variación de brillo y color para el fondo de cielo a lo largo de la noche en el puesto fijo del observatorio UCM para diferentes bandas. [eprintsucm-fotometria]

Para cielos sin contaminación se pueden observar variaciones en el brillo de cielo de más de 0.5 mag/arcsec^2 incluso en la misma noche.

Del mismo modo hay una dependencia con el día de la semana. Durante los días laborables habrá muchas viviendas apagadas ya que la mayor parte de la población trabaja durante el día desde horas tempranas. Los fines de semana aumentan las actividades de ocio nocturnas y con ello la necesidad de iluminación.

Otras modificaciones puntuales observadas durante los procesos de medida son las formas de luces atípicas como las usadas en las fiestas de los municipios.

Desde hace algunos años las luces rojas estipuladas para marcar la posición de los parques eólicos están siendo sustituidas por luces blancas parpadeantes que cada ciertos segundos iluminan completamente el cielo. Luces que deslumbran y dado el intervalo de tiempo tan corto entre fogonazos el ojo no termina de adaptarse a este tipo de iluminación. Este problema tiene el añadido de que muchos parques se encuentran alrededor de carreteras principales. Este es por ejemplo el caso de

Alcolea del Pinar.

Si queremos ser un poco más estrictos en el caso de las medidas realizadas por los satélites, aunque no sufrirán de grandes modificaciones, pueden afectar luces como las provenientes de invernaderos, luces de pesca u otros satélites inactivos. Así como superficies terrestres cubiertas de nieve en lugares de climas más fríos.

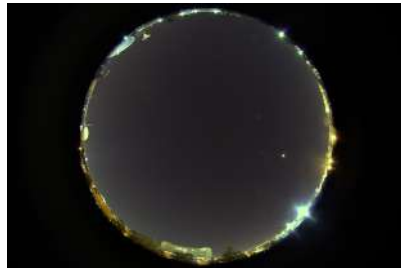
5.3. Resultados

Todas las medidas han sido realizadas por Azahara Rojas Roncero con el fotómetro SEA número 4, con número de referencia: 5697.

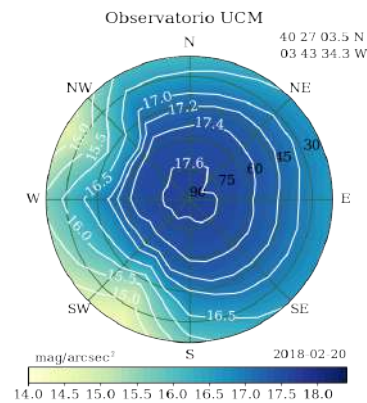
La letra A en la parte superior de la tabla indica el valor del acimut.

5. TOMA DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.3.1. Medida 1: Observatorio UCM (Ciudad universitaria)



(a) Ojo de pez del observatorio UCM⁵



(b) Mapa de contaminación lumínica observatorio UCM

FECHA: 2018/02/20

TEMPERATURA (°C): 9.0

HORA INICIO (UT): 20:00

HORA FINAL (UT): 20:34

PARAJE: Terraza/Observatorio

LATITUD: 40.450977

LONGITUD: -3.726200

ALTITUD (m):640

OBSERVACIONES: Los focos de los campos de fútbol estaban encendidos así como los de la Torre Picaso. Encendidas también las luces del edificio en dirección norte. En la dirección W hay un foco cercano apuntando casi directamente hacia nosotros, en acimut 120° aproximadamente altura 40°. En acimut 210° hay una antena parabólica. Aproximadamente a altura 40°.

Medida en el cenit: 17.59

	Sur			Oeste			Norte			Este		
A	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
20	15.83	14.33	15.17	15.63	14.56	16.11	16.15	16.39	16.72	16.59	16.69	16.39
40	16.84	15.25	16.07	16.56	15.62	17.01	17.09	17.20	17.17	17.09	17.10	17.07
60	17.43	17.29	17.26	17.42	17.46	17.53	17.53	17.54	17.49	17.42	17.45	17.43
80	17.59	17.63	17.62	17.63	17.62	17.64	17.64	17.64	17.57	17.64	17.64	17.63
90	17.67											

⁵Datos de las imágenes: Canon EOS 5D Mark II. Objetivo Sigma 8 mm, diafragma f/5.6 .Tiempo de exposición 15 s. ISO 800. Fecha 2018/02/20 19:15:17 UT

5.3.2. Medida 2: Cerro Almodóvar (Vicálvaro)

FECHA: 2018/04/19

PARAJE: Cerro

TEMPERATURA (°C): 16

LATITUD: 40.385875

HORA INICIO (UT): 01:15

LONGITUD: -3.600173

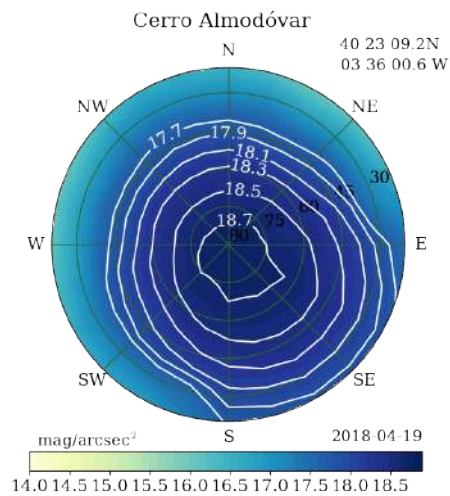
HORA FINAL (UT): 01:38

ALTITUD (m): 693

OBSERVACIONES: Existencia de una luz cercana en el NE

Medida en el cenit: 18.78

	Sur			Oeste			Norte			Este		
A	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
20	17.75	16.82	16.63	16.14	16.10	16.63	16.50	16.03	16.35	17.48	17.83	17.85
40	18.27	18.05	17.84	17.62	17.60	17.69	17.69	17.62	17.82	18.17	18.34	18.37
60	18.64	18.52	18.40	18.32	18.33	18.32	18.34	18.36	18.43	18.55	18.68	18.66
80	18.80	18.76	18.77	18.73	18.70	18.69	18.70	18.72	18.74	18.75	18.77	18.78
90	18.78											



5. TOMA DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.3.3. Medida 3: Parque de la maceta (Vicálvaro)

FECHA: 2018/04/18

TEMPERATURA (°C): 13°C

HORA INICIO (UT): 01:35

HORA FINAL (UT): 02:08

PARAJE: Parque

LATITUD: 40.409197

LONGITUD: -3.621467

ALTITUD (m): 692

OBSERVACIONES: Carretera en el oeste con tráfico moderado

Medida en el cenit: 18.75

	Sur			Oeste			Norte			Este		
A	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
20	17.88	16.24	15.67	15.83	15.57	15.40	15.46	16.59	17.43	17.73	17.79	17.68
40	18.20	17.90	17.55	17.43	16.98	17.00	17.09	17.53	18.00	18.19	18.26	18.31
60	18.55	18.36	18.34	18.18	18.12	18.10	18.12	18.32	18.45	18.53	18.59	18.61
80	18.75	18.74	18.68	18.62	18.69	18.57	18.60	18.60	18.64	18.70	18.73	18.74
90	18.72											

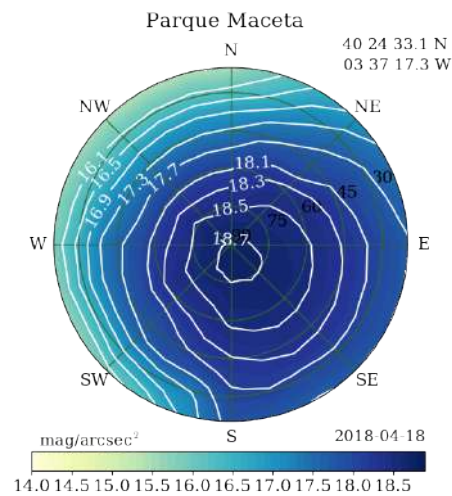


Figura 5.8: Mapa de contaminación lumínica del parque de la maceta

5.3.4. Medida 4: Parque forestal de Vicálvaro

FECHA: 2018/04/18

PARAJE: Parque

TEMPERATURA (°C): 12°C

LATITUD: 40.391576

HORA INICIO (UT): 00:36

LONGITUD: -3.607987

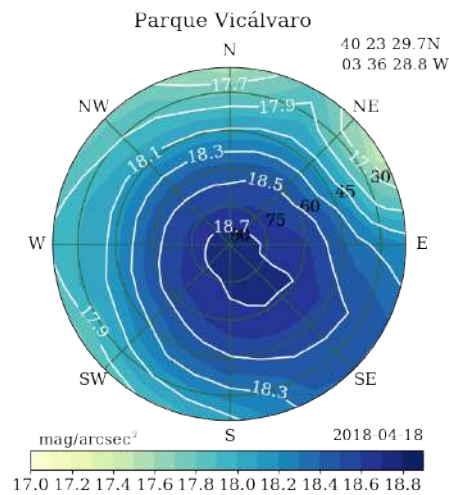
HORA FINAL (UT): 01:03

ALTITUD (m): 658

OBSERVACIONES: Farolas del parque encendidas, una especialmente molesta en el oeste. Carretera y cartel luminoso en el sur.

Medida en el cenit: 18.70

	Sur			Oeste			Norte			Este		
A	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
20	18.06	17.91	17.76	17.94	17.79	17.73	17.53	17.84	17.39	18.19	18.43	18.38
40	18.43	18.31	18.14	18.06	18.06	18.01	18.01	18.07	18.07	18.34	18.52	18.51
60	18.67	18.58	18.53	18.47	18.45	18.44	18.44	18.49	18.52	18.62	18.71	18.70
80	18.74	18.72	18.71	18.69	18.67	18.64	18.64	18.66	18.68	18.71	18.71	18.76
90	18.79											



5. TOMA DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.3.5. Medida 5: Parque de Vallecas

FECHA: 2018/04/19

TEMPERATURA (°C): 14

HORA INICIO (UT): 04:06

HORA FINAL (UT): 04:34

PARAJE: Parque

LATITUD: 40.379742

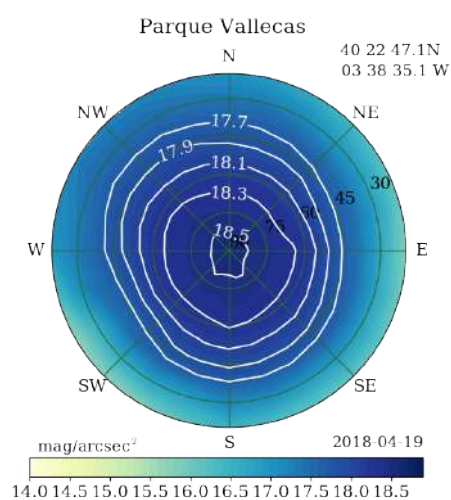
LONGITUD: -3.643095

ALTITUD (m): 659

OBSERVACIONES: tráfico fluido

Medida en el cenit: 18.52

	Sur			Oeste			Norte			Este		
A	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
20	16.51	15.82	15.65	16.93	17.26	17.22	17.03	16.61	16.17	15.85	16.08	16.11
40	17.82	17.73	17.49	17.68	17.77	17.78	17.72	17.68	17.54	17.50	17.65	17.77
60	18.33	18.26	18.26	18.25	18.27	18.23	18.20	18.19	18.17	18.27	18.27	18.28
80	18.50	18.52	18.48	18.47	18.48	18.49	18.45	18.48	18.46	18.48	18.47	18.52
90	18.57											



5.3.6. Medida 6: Garda (Italia)

FECHA: 2018/05/15

PARAJE: colina

TEMPERATURA (°C): 17

LATITUD: 45.580557

HORA INICIO (UT): 23:38

LONGITUD: 10.701092

HORA FINAL (UT): 00:09

ALTITUD (m): 118

OBSERVACIONES: Zona alta con la ciudad iluminada al sur y la montaña al NW

Medida en el cenit: 19.95

	Sur			Oeste			Norte			Este		
A	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
20	18.86	19.05	19.26	19.47	20.11	20.43	20.19	19.79	18.48	18.65	18.27	18.53
40	19.21	19.46	19.57	19.70	19.83	19.91	19.88	19.75	19.19	18.96	18.99	18.97
60	19.66	19.80	19.86	19.91	20.01	20.04	20.01	19.94	19.76	19.62	19.64	19.76
80	19.90	19.91	19.92	19.95	19.99	19.97	19.99	19.97	19.97	19.95	19.97	19.95
90	19.89											

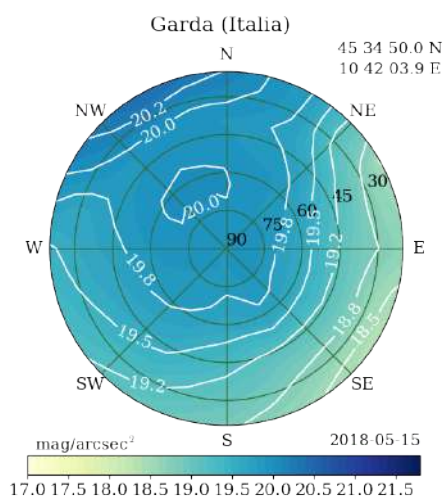


Figura 5.11: Mapa de contaminación lumínica de Garda (Italia)

5. TOMA DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.3.7. Medida 7: Observatorio astronómico “El Castillo” (Borobia, Soria)



Figura 5.12: Panorámica del observatorio astronómico “El Castillo” (Borobia, Soria)

FECHA: 2018/08/08

PARAJE: Monte

TEMPERATURA (°C): 16.0

LATITUD: 41.6642

HORA INICIO (UT): 02:50

LONGITUD: -1.8964

HORA FINAL (UT): 03:09

ALTITUD (m):1138

OBSERVACIONES: Lugar más alto del pueblo quedando este al NE y monte hacia el S.

Medida en el cenit: 21.56

	Sur			Oeste			Norte			Este		
A	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
20	19.16	19.09	18.13	19.04	20.63	21.21	21.39	21.16	19.71	20.03	20.55	19.58
40	20.86	20.72	20.64	20.86	21.31	21.47	21.48	21.32	21.12	21.05	21.10	20.83
60	21.33	21.24	21.24	21.37	21.55	21.58	21.60	21.49	21.38	21.29	21.39	21.41
80	21.50	21.43	21.46	21.48	21.56	21.55	21.58	21.53	21.55	21.45	21.47	21.43
90	21.53											

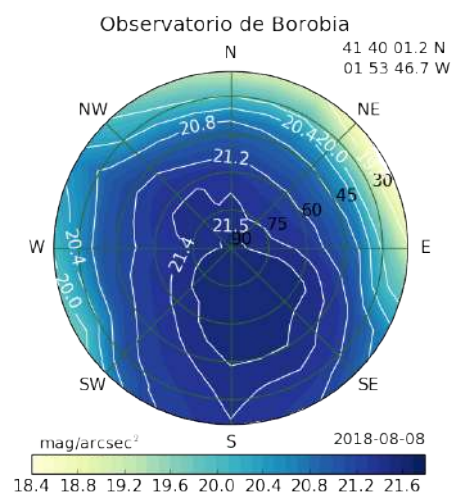


Figura 5.13: Mapa de contaminación lumínica del observatorio astronómico “El Castillo” (Borobia, Soria)

5.3.8. Medida 8: Refugio de Borobia 1 (Soria)

FECHA: 2018/08/09

PARAJE: Monte

TEMPERATURA (°C): 20.0

LATITUD: 41.687341

HORA INICIO (UT): 01:58

LONGITUD: -1.890334

HORA FINAL (UT): 02:20

ALTITUD (m):1161

OBSERVACIONES: Pueblo de Borobia al SW. Pueblo de Ólvega al N, tras la montaña. Se distingue perfectamente la vía láctea.

Medida en el cenit: 21.88

	Sur			Oeste			Norte			Este		
A	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
20	21.84	21.62	21.75	21.84	21.67	21.43	21.51	21.53	21.58	21.69	21.81	21.84
40	21.75	21.72	21.69	21.81	21.79	21.69	21.71	21.66	21.67	21.82	21.83	21.82
60	21.89	21.77	21.72	21.83	21.90	21.90	21.89	21.78	21.76	21.89	21.92	21.93
80	21.85	21.80	21.77	21.79	21.76	21.76	21.81	21.76	21.77	21.78	21.87	21.88
90	21.87											

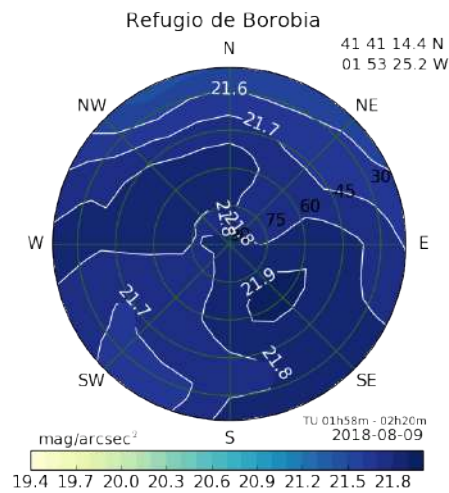


Figura 5.14: Mapa de contaminación lumínica del refugio de Borobia 1 (Soria)

5. TOMA DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.3.9. Medida 9: Refugio de Borobia 2 (Soria)

FECHA: 2018/08/09

TEMPERATURA (°C): 15.0

HORA INICIO (UT): 02:57

HORA FINAL (UT): 03:19

PARAJE: Monte

LATITUD: 41.687341

LONGITUD: -1.890334

ALTITUD (m):1161

OBSERVACIONES: Pueblo de Borobia al SW. Pueblo de Ólvega al N, tras la montaña. Se distingue perfectamente la vía láctea.

Medida en el cenit: 21.94

	Sur			Oeste			Norte			Este		
A	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
20	21.91	21.55	21.73	21.82	21.74	21.53	21.59	21.57	21.54	21.59	21.76	21.85
40	21.81	21.72	21.63	21.72	21.79	21.73	21.83	21.72	21.61	21.78	21.79	21.90
60	21.94	21.89	21.76	21.68	21.78	21.87	21.88	21.80	21.78	21.91	21.95	21.97
80	21.98	21.95	21.92	21.85	21.82	21.80	21.87	21.80	21.83	21.88	21.94	22.04
90	21.94											

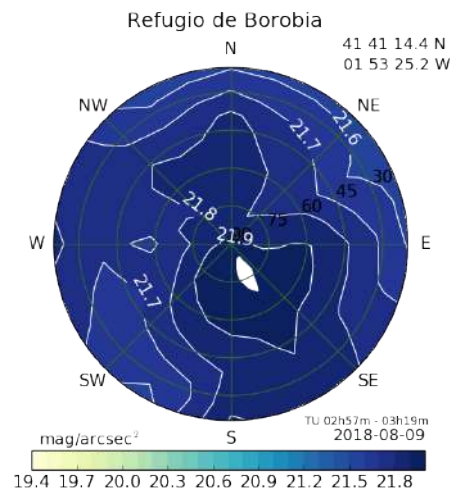


Figura 5.15: Mapa de contaminación lumínica del refugio de Borobia 2 (Soria)

5.3.10. Medida 10: Carretera de Borobia a Pomer (Soria)

FECHA: 2018/08/12

PARAJE: Monte

TEMPERATURA (°C): 16.0

LATITUD: 41.655280

HORA INICIO (UT): 04:36

LONGITUD: -1.877834

HORA FINAL (UT): 04:56

ALTITUD (m): 1183

OBSERVACIONES: Por orden Soria, Borobia y Ólvega en el horizonte W hacia el NW, Pomer al E.

Medida en el cenit: 22.06

	Sur			Oeste			Norte			Este		
A	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
20	21.81	21.78	21.69	21.55	21.42	21.43	21.53	21.53	21.40	21.43	21.56	21.72
40	21.92	21.91	21.88	21.69	21.63	21.76	21.82	21.77	21.58	21.59	21.75	21.87
60	22.00	22.01	22.03	21.90	21.74	21.81	21.90	21.82	21.79	21.83	21.88	21.96
80	22.03	22.04	22.04	22.02	21.98	21.94	21.96	21.94	21.92	21.95	21.98	22.00
90	22.05											

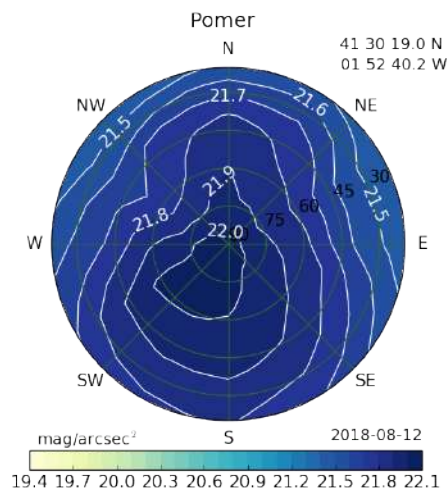


Figura 5.16: *Mapa de contaminación lumínica de la carretera de Borobia a Pomer*

5. TOMA DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.3.11. Medida 11: Carretera de Ciria (Soria)

FECHA: 2018/08/13

TEMPERATURA (°C): 18.0

HORA INICIO (UT): 23:50

HORA FINAL (UT): 0:10

PARAJE: Monte

LATITUD: 41.6495510

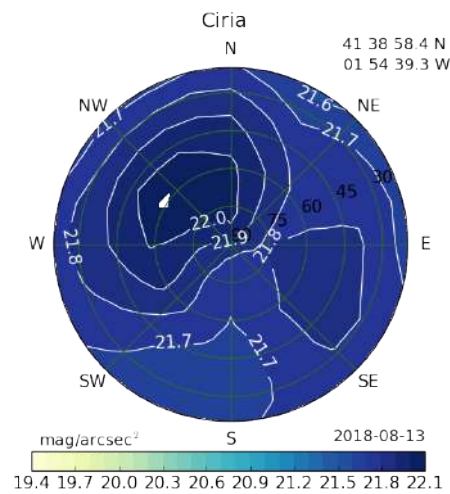
LONGITUD: -1.9109050

ALTITUD (m): 1149

OBSERVACIONES: Pueblo de Borobia al NE y Ólvega al NW.

Medida en el cenit: 21.95

	Sur			Oeste			Norte			Este		
A	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
20	21.67	21.60	21.72	21.76	21.68, 21.68	21.72	21.56	21.67	21.66	21.75	21.76	
40	21.62	21.67	21.80	21.89	21.92, 21.93	21.91	21.75	21.76	21.82	21.84	21.78	
60	21.70	21.79	21.93	22.02	22.13, 22.10	22.03	21.89	21.75	21.83	21.87	21.78	
80	21.73	21.79	21.84	21.90	21.95, 22.00	22.04	21.95	21.86	21.79	21.74	21.71	
90	21.88											



5.3.12. Medida 12: Sauquillo de Boñices (Soria)

FECHA: 2018/08/14

TEMPERATURA (°C): 18.0

HORA INICIO (UT): 01:48

HORA FINAL (UT): 02:05

PARAJE: Carretera afueras del pueblo

LATITUD: 41.584831

LONGITUD: -2.341596

ALTITUD (m): 976

OBSERVACIONES: Muy buena iluminación, tan solo con apartarse un poco del pueblo se encuentra muy buen cielo. Vía láctea en el cenit. Carretera entre azimuts 60-180. Pueblo Sauquillo en azimut 120, otro más lejano en azimut 60 y hongo más grande en azimut 330.

Medida en el cenit: 21.67

	Sur			Oeste			Norte			Este		
A	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
20	21.47	21.16	21.18	21.21	21.27	21.15	21.37	21.39	21.42	21.39	21.32	21.41
40	21.55	21.40	21.32	21.45	21.54	21.52	21.58	21.56	21.54	21.58	21.56	21.55
60	21.68	21.55	21.44	21.54	21.64	21.74	21.75	21.64	21.62	21.73	21.73	21.73
80	21.68	21.62	21.56	21.53	21.54	21.56	21.61	21.63	21.60	21.65	21.70	21.71
90	21.62											

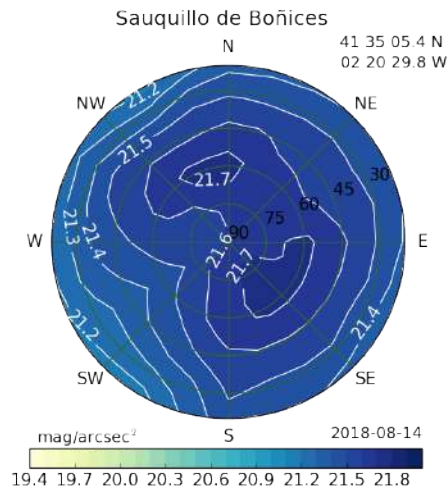


Figura 5.18: Mapa de contaminación lumínica de Sauquillo de Boñices

5. TOMA DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.3.13. Medida 13: Observatorio de Alcolea del Pinar (Guadalajara)

FECHA: 2018/08/14

TEMPERATURA (°C): 14.0

HORA INICIO (UT): 03:40

HORA FINAL (UT): 03:57

PARAJE: Monte

LATITUD: 41.045

LONGITUD: -2.455149

ALTITUD (m): 1285

OBSERVACIONES: Aproximadamente la carretera cruza toda la parte sur de E a W reflejando luz. En casi todo el horizonte están repartidos molinos eólicos con luz blanca parpadeante bastante molesta.

Medida en el cenit: 21.86

	Sur			Oeste			Norte			Este		
A	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
20	21.12	21.08	20.99	21.13	21.33	21.39	21.24	21.27	21.12	21.10	21.23	21.08
40	21.49	21.46	21.39	21.36	21.52	21.69	21.73	21.60	21.50	21.50	21.55	21.50
60	21.74	21.72	21.67	21.56	21.54	21.71	21.77	21.67	21.65	21.74	21.76	21.75
80	21.85	21.84	21.82	21.79	21.75	21.70	21.76	21.71	21.74	21.78	21.83	21.84
90	21.84											

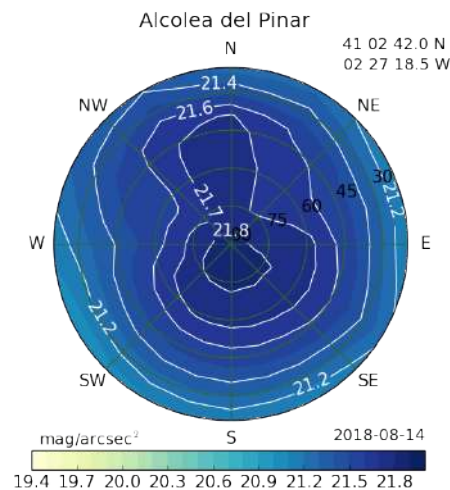


Figura 5.19: Mapa de contaminación lumínica del observatorio de Alcolea del Pinar

5.3.14. Medida 14: Brihuega (Guadalajara)

FECHA: 2018/08/14

TEMPERATURA (°C): 15.0

HORA INICIO (UT): 05:19

HORA FINAL (UT): 05:35

PARAJE: Camino afueras del pueblo

LATITUD: 40.7681580

LONGITUD: -2.8889480

ALTITUD (m): 1020

OBSERVACIONES: Dos pequeños hongos al NE. Brihuega hacia el S (en fiestas, algo más iluminado de lo normal, con algún rayo de luz). Claridad de Guadalajara hacia el W y polígono industrial en azimut 270-330.

Medida en el cenit: 21.78

	Sur			Oeste			Norte			Este		
A	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
20	21.21	20.89	20.29	20.25	20.77	21.16	21.38	21.31	21.08	20.91	20.74	20.94
40	21.40	21.30	21.08	21.06	21.13	21.39	21.53	21.49	21.30	21.16	21.16	21.29
60	21.60	21.60	21.56	21.53	21.47	21.47	21.58	21.56	21.50	21.53	21.50	21.56
80	21.69	21.71	21.71	21.71	21.69	21.67	21.69	21.65	21.64	21.65	21.66	21.68
90	21.74											

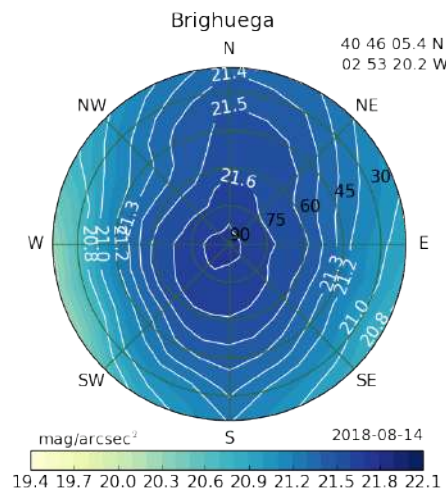


Figura 5.20: *Mapa de contaminación lumínica de Brihuega*

5. TOMA DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.3.15. Medida 15: Villatobas (Toledo)

FECHA: 2018/08/15

LATITUD: 39.9094477

TEMPERATURA (°C): 22.0

LONGITUD: -3.3298415

HORA INICIO (UT): 03:01

ALTITUD (m): 746

HORA FINAL (UT): 03:15

OBSERVACIONES: Luces blancas al N (como de polígono). Zona más oscura al E. Villatobas al S con iluminación bastante molesta. Carretera en el W. En el NW horizonte bastante claro.

Medida en el cenit: 21.24

	Sur			Oeste			Norte			Este		
A	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
20	20.17	20.51	20.55	20.29	19.78	19.53	20.05	20.66	20.78	20.75	20.31	19.76
40	20.59	20.74	20.74	20.63	20.43	20.42	20.62	20.89	20.93	20.93	20.68	20.44
60	21.01	21.05	21.01	20.93	20.93	20.97	21.06	21.18	21.11	21.13	21.06	20.99
80	21.20	21.19	21.15	21.12	21.10	21.10	21.14	21.14	21.15	21.19	21.24	21.21
90	21.24											

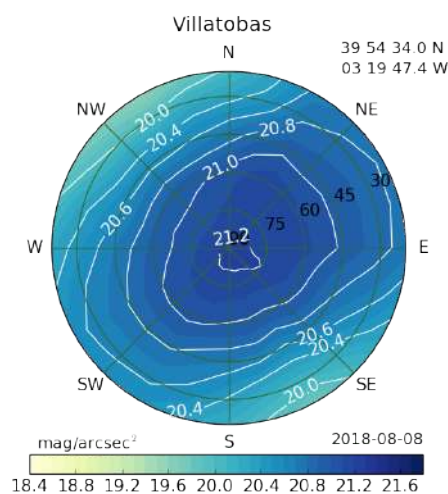


Figura 5.21: Mapa de contaminación lumínica de Villatobas (Toledo)

5.3.16. Medida 16: Carretera a Quintanar de la Orden (Toledo)

FECHA: 2018/08/15

TEMPERATURA (°C): 22.0

HORA INICIO (UT): 04:11

HORA FINAL (UT): 04:38

PARAJE: Carretera

LATITUD: 39.693177

LONGITUD: -3.116999

ALTITUD (m): 720

OBSERVACIONES: Sitio muy malo para medir, entre dos carreteras con paso continuado de vehículos. Peores zonas N con bastante luz y toda la zona sur con un horizontes de mucha claridad.

Medida en el cenit: 21.71

	Sur			Oeste			Norte			Este		
A	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
20	20.82	21.02	21.06	21.07	20.90	20.48	20.92	21.18	21.22	21.16	21.06	20.77
40	21.19	21.31	21.36	21.26	21.24	21.12	21.28	21.38	21.33	21.30	21.23	21.25
60	21.63	21.62	21.65	21.60	21.43	21.46	21.53	21.51	21.53	21.56	21.58	21.58
80	21.71	21.77	21.73	21.71	21.67	21.67	21.67	21.64	21.65	21.69	21.70	21.76
90	21.73											

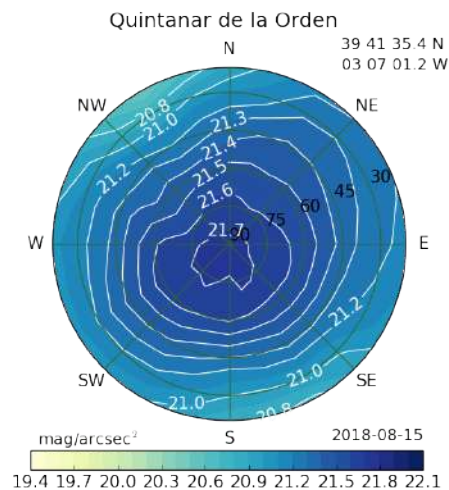


Figura 5.22: Mapa de contaminación lumínica de la carretera a Quintanar de la Orden

5. TOMA DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.3.17. Medida 17: Bosque de San Clemente (Cuenca)

FECHA: 2018/08/15

TEMPERATURA (°C): 22.0

HORA INICIO (UT): 05:50

HORA FINAL (UT): 06:04

PARAJE: Pequeña montaña alrededor de bosque

LATITUD: 39.343391

LONGITUD: -2.464932

ALTITUD (m): 712

OBSERVACIONES: Focos amarillos pero intensos (cercanos) en el NE. Bosque en el W.

Medida en el cenit: 21.54

	Sur	Oeste				Norte				Este		
A	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
20	20.64	20.78	21.06	21.29	20.80	20.71	20.69	19.91	19.38	19.88	20.37	20.64
40	20.94	20.98	21.04	20.99	20.95	20.91	20.90	20.48	20.14	20.32	20.62	20.91
60	21.33	21.37	21.39	21.39	21.36	21.23	21.27	21.05	20.89	20.99	21.10	21.24
80	21.49	21.51	21.54	21.54	21.52	21.47	21.50	21.44	21.42	21.40	21.42	21.46
90	21.31											

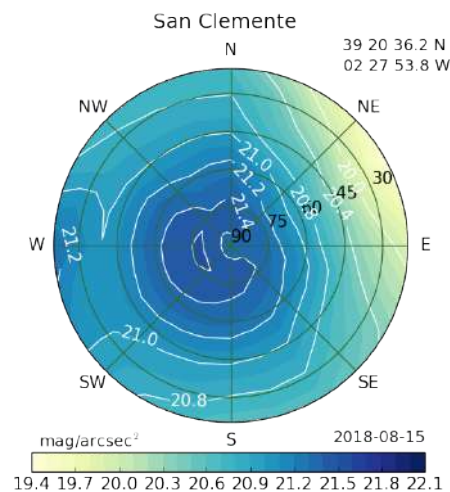


Figura 5.23: Mapa de contaminación lumínica del bosque de San Clemente

5.4. Comparación de resultados

Para la realización de este trabajo se ha tomado un número total de 17 medidas en los puntos indicados en el mapa de la figura 5.24. [lightpollutionmap]

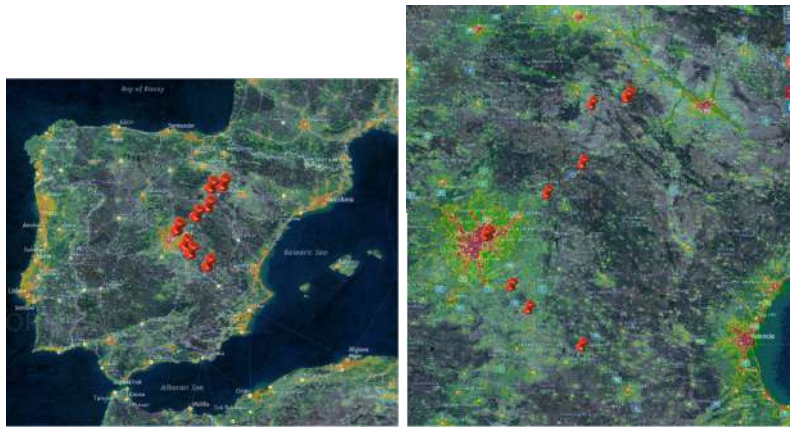


Figura 5.24: *Puntos de medición*

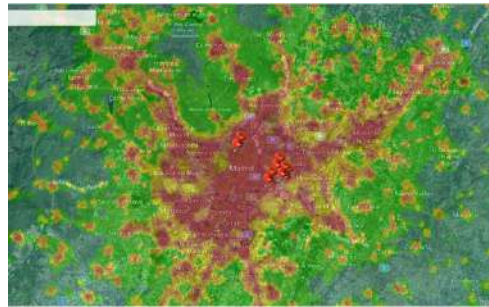


Figura 5.25: *Puntos de medición en la capital*



Figura 5.26: *Puntos de medición en Soria*

Para una mayor comodidad, los mapas de brillo de cielo se encuentran unificados al final de este apartado.

La tabla 5.1 muestra para cada lugar los valores medios del cenit, los valores máximo y mínimo de toda la medición y la diferencia entre ellos. Esta diferencia además está representada en la gráfica 5.28. Todos los datos están en $\text{mag}/\text{arcseg}^2$.

- La medida de cielo más oscuro corresponde a la carretera de de Borobia a Pomer (10) con un valor de calidad de cielo sorprendente. Seguida por muy poca diferencia del resto de datos de la provincia de Soria y Castilla La Mancha exceptuando Villatobas, que es la medida en zona rural más cercana a Madrid.
- En el otro lado, el cielo más contaminado es el del observatorio UCM. Correspondiente al lugar de medida más céntrico en zona urbana.
- Es fácilmente observable la gran diferencia entre zona urbana (medidas 1 a 5) y rural (medidas 7 a 17). Por la diferencia de magnitudes los cielos de la ciudad son alrededor de 30 veces más luminosos.

Nótese la gran contaminación lumínica de Madrid y su efecto incluso a largas distancias.

Como hemos mencionado la medida más céntrica (1) es la de cielo más contaminado. Seguida por las tomadas en el extrarradio de Madrid (2 a 5). El resto de medidas (hechas en zona rural) están varias magnitudes por encima, pero Villatobas no parece alcanzar en su totalidad la misma calidad de cielo. Esto se debe a su cercanía a Madrid con respecto al resto de pueblos, a pesar de encontrarse a 67 km de distancia. Esta disminución está representada en la gráfica 5.27.

La visualización de los mapas nos ayudará también a detectar este hecho. La zona del extrarradio de la capital corresponde al SE de Madrid, por eso el mayor foco de contaminación lumínica se encuentra al NW. Al igual que Villatobas, que aunque más lejos está en la misma posición relativa.

En cuanto la gráfica 5.28 se ha tomado el mayor y el menor valor de cada lugar para estudiar la homogeneidad del brillo del cielo. Ambos valores coinciden con el cenit o acimutes de 80° y la zona más iluminada del horizonte respectivamente. La homogeneidad también apreciable en los mapas.

En este aspecto la tendencia sigue siendo similar. Las zonas rurales poseen cielos de brillo más homogéneo mientras que en la ciudad hay una diferencia de magnitud de hasta 3 entre cenit y horizonte, es decir, 30 veces más luminoso. Misma diferencia que entre zonas rurales y urbanas de modo que para el horizonte se duplica la luminosidad.

A pesar de esto la contradicción está en el observatorio de Borobia, que presenta el cielo con mayor diferencia de magnitud entre su zona más oscura y más contaminada. Esto se debe a su cercanía al pueblo por una parte, y al mal uso de la iluminación, que fue cambiada años atrás sin seguir los criterios para el mantenimiento de un cielo de calidad. Actualmente se estudia en el cambio de las luminarias siguiendo los máximos criterios de protección.

La medida 6 es la única tomada fuera de España, en Italia. Por ello no ha sido incluida en el mapa ni en la gráfica 5.27. A pesar de ser una medida de una ciudad

5.4. Comparación de resultados

N	Lugar	Cenit	Magnitud máxima	Magnitud mínima	Diferencia
1	Observatorio UCM	17,6	17,6	14,3	3,3
2	Cerro Almodóvar	18,8	18,8	16,0	2,8
3	Parque de la maceta	18,7	18,7	15,4	3,3
4	Parque forestal de Vicálvaro	18,7	18,7	17,4	1,3
5	Parque de Vallecas	18,5	18,5	15,6	2,9
6	Garda	19,9	20,4	18,3	2,2
7	Observatorio Astronómico "El Castillo"	21,5	21,6	18,1	3,5
8	Refugio de Borobia 1	21,9	21,9	21,4	0,5
9	Refugio de Borobia 2	21,9	22,0	21,5	0,5
10	Carretera de Borobia a Pomer	22,0	22,0	21,4	0,6
11	Carretera de Borobia a Ciria	21,9	22,1	21,6	0,6
12	Sauquillo de Boñices	21,6	21,7	21,1	0,6
13	Alcolea del Pinar	21,8	21,8	21,0	0,9
14	Brihuega	21,8	21,7	20,1	1,6
15	Vilatobas	21,2	21,2	19,5	1,7
16	Carretera a Quintanar de la Orden	21,7	21,8	20,5	1,3
17	Bosque de San Clemente	21,4	21,5	19,4	2,2

Cuadro 5.1: *Valores principales de las medidas*

vemos que su iluminación no tiene el mismo impacto que Madrid debido a su tamaño.

El efecto de la disminución del brillo del cielo con la hora puede notarse en las medidas del refugio de Borobia (medidas ?? y ??). Además en los lugares con este nivel de oscuridad puede notarse el efecto de la vía láctea.

Podemos comparar los valores de SQM fijos para la misma noche en caso de realizar medidas en lugares cercanos. En nuestro caso dos medidas son comparables en cuanto a la distancia.

■ Observatorio UCM

Las medidas fueron tomadas entre las 20:00 h y las 20:34 h. El valor de la medida es de 17.63 mag/arcseg². A esa misma hora el valor del SQM fijo es de aproximadamente 19.50 mag/arcseg². Como vemos los valores son prácticamente iguales.

(Ver gráfica 5.29)

■ Villaverde del Ducado

Las medidas de Alcolea del Pinar pueden ser comparadas con este SQM fijo ya que se encuentra a tan solo 4 km de distancia.

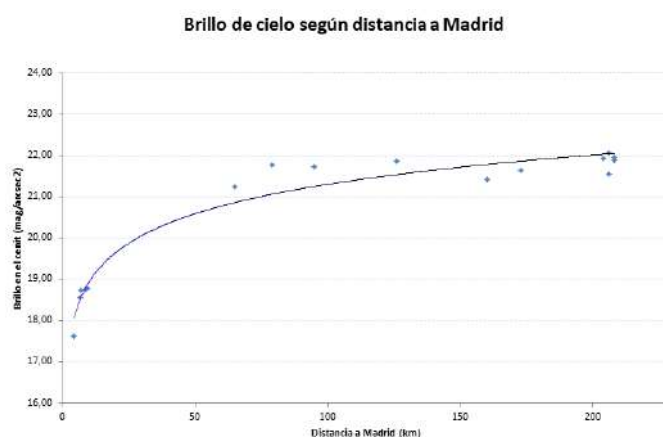


Figura 5.27: Brillo del cielo según distancia a Madrid

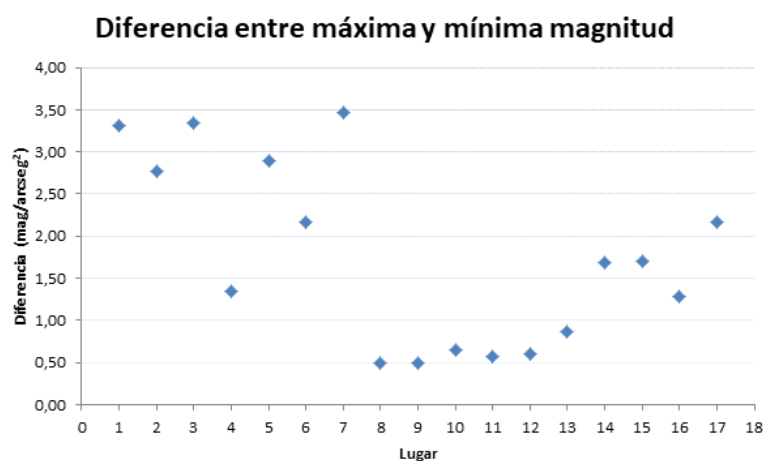


Figura 5.28: Diferencia entre la máxima y mínima magnitud medida

Las medidas fueron tomadas entre las 03:40 h y las 03:57 h. El valor de la medida es de $21.85 \text{ mag/arcsec}^2$. A esa misma hora el valor del SQM fijo es de aproximadamente $21.00 \text{ mag/arcsec}^2$, de hecho como podemos observar es una cota superior de esa noche. En este caso los valores difieren bastante, recordemos que al ser una escala logarítmica una pequeña diferencia supone un aumento considerable en el brillo de cielo, en este caso de casi 10 veces más. Esto puede deberse a un desajuste de punto cero en el fotómetro o a que el lugar de medición estuviera más cubierto.

(Ver gráfica 5.30)

En resumen:

- Madrid es un foco luminoso potentísimo, la calidad del cielo aumenta

5.4. Comparación de resultados

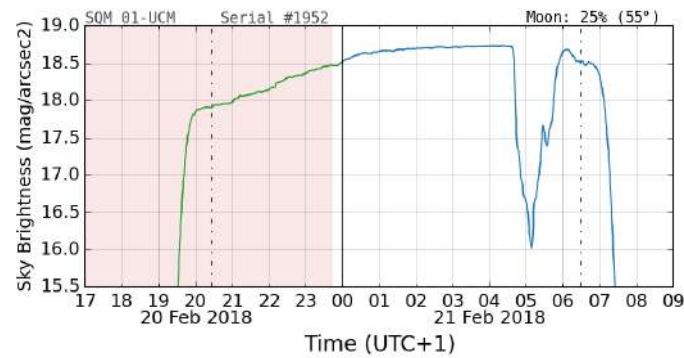


Figura 5.29: SQM fijo en el observatorio UCM

hasta en tres magnitudes a medida que nos alejamos. Sin embargo son muy largas las distancias que alcanza el hongo lumínico, en estos datos a unos 70 km seguimos notando el efecto.

- Recordemos que una diferencia de magnitud equivale a un cielo 10 veces más contaminado, por tanto estas diferencias no son despreciables.
- Se confirma, como ya sabíamos, que los grandes núcleos de población generan un impacto que perjudica al entorno inmediato y alrededores, mientras que las zonas menos pobladas no generan estos efectos.
- De la misma manera se observa las diferencias en las horas de la noche, obteniendo en las centrales mejores resultados, esto puede verse en las medidas tomadas a distintas horas alrededor de Borobia, donde los parajes son de tipo similar.

Se visualiza también como en cielos de mejores condiciones se puede intuir el rastro de la vía láctea.

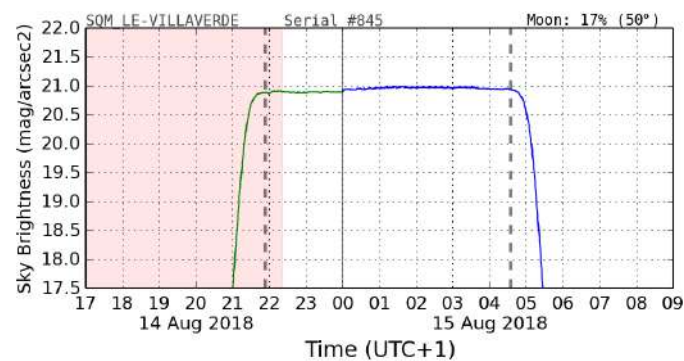
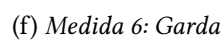
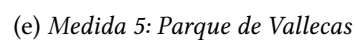
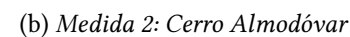
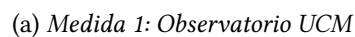
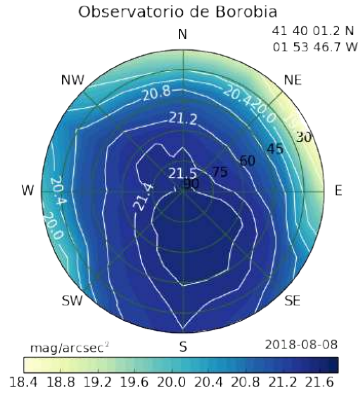


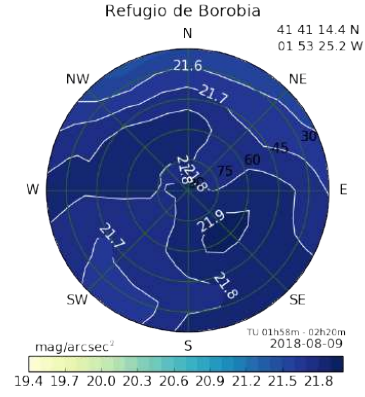
Figura 5.30: SQM fijo en Villaverde del Ducado



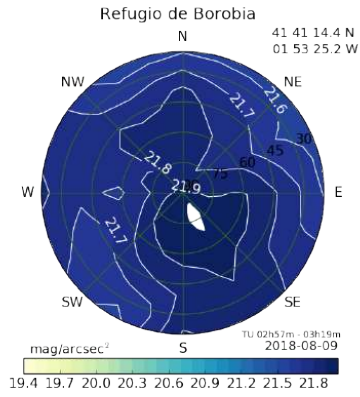
5.4. Comparación de resultados



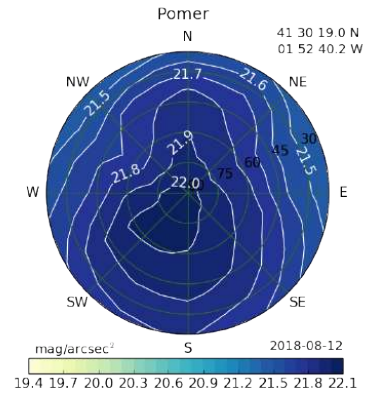
(a) Medida 7: Observatorio astronómico "El Castillo"



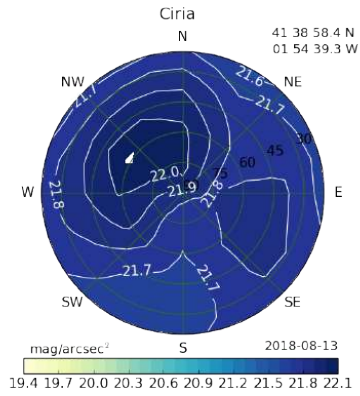
(b) Medida 8: Refugio de Borobia 1



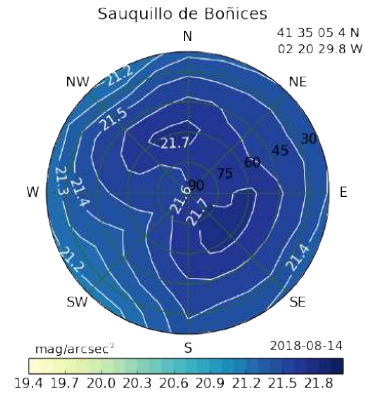
(c) Medida 9: Refugio de Borobia 2



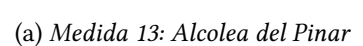
(d) Medida 10: Carretera Borobia a Pomer



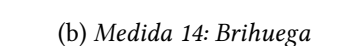
(e) Medida 11: Carretera Borobia a Ciria



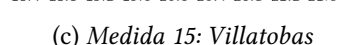
(f) Medida 12: Sauquillo de Boñices



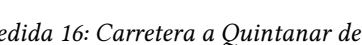
(a) *Medida 13: Alcolea del Pinar*



(b) *Medida 14: Brihuega*



(c) *Medida 15: Villatobas*



(d) *Medida 16: Carretera a Quintanar de la Orden*



(e) *Medida 17: Bosque de San Clemente*

Conclusión

Es necesario tomar conciencia de los efectos que puede producir un mal uso de los recursos de los que disponemos. El avance tecnológico y el desarrollo, en ocasiones deja de lado otros aspectos importantes provocando unas consecuencias de repercusión global a pesar de que tenemos la capacidad de hacerlo responsablemente. Aunque como hemos visto se trata de un problema de gran índole, la contaminación lumínica es en ese sentido tiene una venataja frente a otros tipos excesos; reparar su daño parte de un gesto tan simple como apagar un interruptor. La toma de medidas para este trabajo ha supuesto toda una aventura, y es en este tipo de actividades donde la realidad se muestra enseñando que es todo un trabajo de investigación encontrar hoy un lugar que se pueda definir como oscuro. Por eso tiene tanta importancia que preservemos aquellos que aún no hayan sido alcanzados por los excesos del hombre. No es una causa perdida, tenemos en nuestras manos la capacidad de mantener unas condiciones de visibilidad tanto hacia dentro, como hacia fuera de nuestra atmósfera para poder así ver y ser vistos.

Unidades

- El brillo del firmamento nocturno se mide en $mag/arcsec^2$ (**magnitud entre arcosegundo cuadrado, también denominado MPSAS**) que equivale a la magnitud aparente de flujo recibido por un objeto en un espacio que abarca un ángulo sólido de un segundo de arco al cuadrado. De modo que si tenemos el valor de por ejemplo $22 mag/arcsec^2$ significa que tiene un brillo similar al que tendría una estrella de magnitud 22 en un área de un arcosegundo al cuadrado. [meteogalicia]

La escala de magnitudes es una escala logarítmica inversa en la que por definición si un objeto tiene 5 magnitudes más que otro, el brillo recibido del primero es 50 veces menor que el del segundo.

- **Relación brillo-flujo:** Si denominamos FV al flujo recibido de un objeto astronómico en un intervalo de longitudes de onda de cierto filtro. Entonces el brillo del astro medido en magnitudes estelares se expresa como

$$SQM = V - 2,5 \log_{10} FV \quad (A.1)$$

donde V es la constante de la banda del filtro.

- **Magnitud límite estelar (MALE):** magnitud de la estrella más débil que puede observarse a simple vista dadas unas determinadas condiciones ambientales y que se correspondería con el método de observación visual clásico (el conteo a ojo desnudo del número de estrellas visibles dentro de un conjunto de asterismos establecidos). Nuestra capacidad visual alcanza hasta estrellas de MALE +6. Se trata de una medida subjetiva y por tanto no muy exacta que depende de varios factores como la agudeza visual del observador. Sin embargo puede ser un indicativo válido para la observación dado que es una medida con la que los aficionados están más familiarizados.

Las fórmulas de conversión son las siguientes:

$$MALE = 7,93 - 5 \log_{10} [10^{4,316 - \frac{MPSAS}{5}} + 1] \quad (A.2)$$

$$MPSAS = 21,58 - 5 \log_{10} [10^{1,586 - \frac{MALE}{5}} - 1] \quad (A.3)$$

- Otra unidad de medida de intensidad lumínica por área (luminancia) es la **candela por metro cuadrado (cd/m²)**, también llamada ‘nit’. La transformación de unidades puede llevarse a cabo con las siguientes fórmulas:

$$[mag/acrseg^2] = \frac{\log_{10} \frac{cd/m^2}{108000}}{-0,4} \quad (A.4)$$

$$[cd/m^2] = 108000 \times 10^{-0,4 * [mag/acrseg^2]} \quad (A.5)$$

- El flujo o potencia luminosa puede ser medido en **lúmenes (lm)**. $Lm = cd * sr$
Un **lux o lx** es equivalente a dividirlo entre la superficie
 $1 lx = 1 lm/m^2$ (iluminancia: luz incidida o emitida por una superficie)
- **Watt-hora (Wh)** tasa a la que la energía se produce o se consume por cada hora

Tipos de visión

- **Visión fotópica:** Es la percepción visual que se produce con niveles de iluminación diurnos (a plena luz del día). Este tipo de visión, hace posible la correcta interpretación del rango de colores por el ojo. Está basada en la respuesta de los conos del ojo, que son mucho menos sensibles y sólo se activan cuando los niveles de iluminación son muy elevados.
- **Visión mesópica:** Es la visión intermedia (situada entre la fotópica y la escotópica) que se da en situación de iluminación, que sin llegar a ser de oscuridad total, no llegan a ser la luz que tenemos en un día a pleno sol. Es el tipo de visión empleada en condiciones de luz artificial, donde actúan los conos y bastones del ojo. La mayoría de espacios nocturnos exteriores y de iluminación de alumbrado público, se encuentran dentro del rango mesápico.
- **Visión escotópica:** Es el tipo de percepción visual que se produce con unos niveles de iluminación muy bajos. La agudeza visual es muy baja y la recepción de la luz se realiza principalmente con los bastones de la retina, que son muy sensibles al color azul del espectro (por lo que son completamente nulos para percibir el rojo). Este tipo de visión es monocromática.

[lumiere-studio]

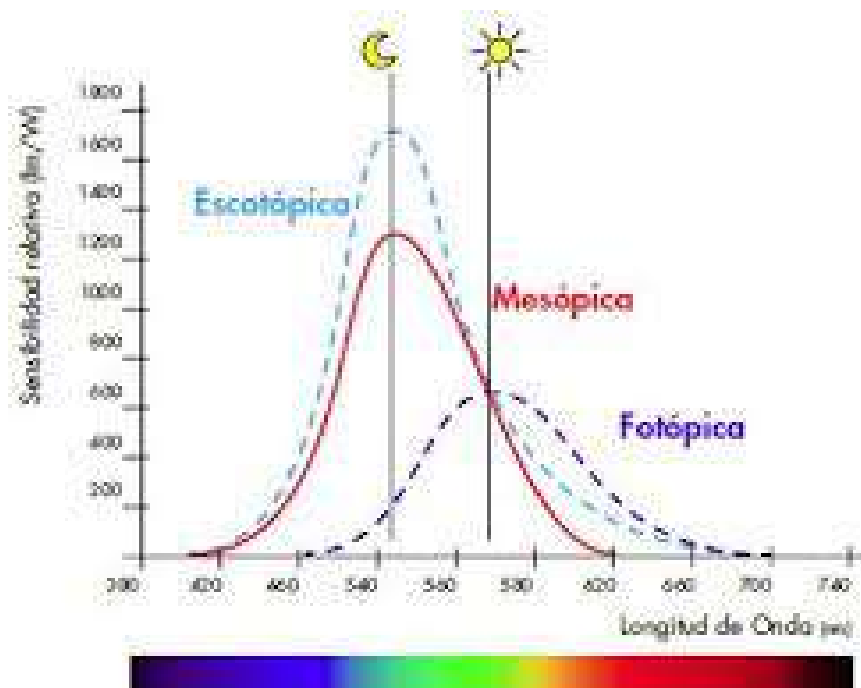


Figura B.1: Sensibilidad del ojo humano en las distintas regiones del espectro

Abbreviations

UCM Universidad Complutense de Madrid

SEA Sociedad Española de Física

UE Unión Europea

CO² Dióxido de Carbono

UNESCO Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

NSQ Núcleo Supraquiasmático

TNF Factor de Necrosis Tumoral

ADN Ácido Desoxirribonucleico

REECL Red Española de Estudios sobre la Contaminación Lumínica

SQM Sky Quality Meter

UPM Universidad Politécnica de Madrid

SOTON Universidad de Southampton

IGB Instituto Leibniz de Ecología de AguaDulce y Pesca Continental

ECN Red Europea de Crowdfunding

IAC Instituto Astrofísico de Canarias

ONG Organización No Gubernamental

INC Incandescente

HAL Halógena

C. ABBREVIATIONS

VM o VMAP Vapor de Mercurio

FL-C Fluorescente Compacto

FL Fluorescente

HM Halógeno Metálico

VSAP o HSP Vapor de Sodio de Alta Presión

VSBP o LSP Vapor de Sodio de Baja Presión

LED Light-Emitting Diode

IRC Índice de Reproducción Cromática

FHS Flujo Hemisférico Superior

FV Flujo recibido

HWHM Half Width at Half Maximum

FWHM Full Width at Half Maximum

LICA Laboratorio de Instrumentación Científica Avanzada

CCD Charge-Coupled Device

AstMon AllSky Transmission MONitor

sr esteroradián