



Posibles riesgos de la iluminación LED

Conclusiones del Grupo de trabajo Comité Español de Iluminación

Posibles riesgos de la iluminación LED

Conclusiones del Grupo de trabajo Comité Español de Iluminación

Edita: Comité Español de Iluminación

© Copyright de la edición: Comité Español de Iluminación

Producción editorial: Editorial MIC · www.editorialmic.com

D.L.: LE 234-2018

ISBN: 978-84-946991-7-7

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción total o parcial sin permiso expreso del Comité Español de Iluminación.

Posibles riesgos de la iluminación LED

Conclusiones del Grupo de trabajo Comité Español de Iluminación

Las conclusiones se presentan en tres documentos independientes:

1. Contaminación luminosa y LED	7
1.1 Anexo: Índices Espectrales	16
2. Posibles riesgos de la iluminación LED para la salud.	53
3. Consideraciones sobre los efectos de la luz en el ecosistema nocturno	81

Introducción



Los siguientes tres documentos de opinión recogen el análisis realizado durante dos años por un grupo de trabajo multidisciplinar sobre los posibles riesgos de la iluminación mediante diodos LED. La redacción de estos documentos se finalizó el 2 de Octubre del 2017.

Los siguientes miembros han formado parte de este grupo de trabajo:

- David Galalí Enríquez, Astrofísico Calar Alto
- María Angeles Rol de Lama, Universidad de Murcia
- Salvador Bará Viñas, Universidad de Santiago de Compostela
- Javier Díaz Castro, Oficina Protección del Cielo del Instituto Astrofísico de Canarias
- David Baeza Moyano, Universidad San Pablo CEU
- Ángela Ranea Palma, Junta de Andalucía
- Estefanía Cañavate García, Junta de Andalucía
- Sonia Márquez Varo, Ayuntamiento de Mijas
- David Latorre, Tecnocer
- Gustavo Rodríguez García, Ayuntamiento de Almería
- Joaquin Merchant Ferreira, Ayuntamiento Bollullos del Condado
- Francisco Cavaller Galí, Salvi
- Félix Garcia Rodríguez, Servicios y sistemas de Iluminación
- Jose Luis Gonzalez Cano, Iluminación técnica
- Susana Malón Giménez, Lumínica Ambiental
- Salvador J. Ribas, Montsec REECL
- Ramón Llorens Soler, Sacopa-Ignialight
- Jordi Moncanut Vilá, Sacopa-Ignialight
- Jorge Hernandez Amorós, Grupo Sering
- Manuel Garcia Gil, Generalitat de Catalunya
- Joaquín Baixeras Almela, Universitat de València
- Ángel Morales Rubio, Universitat de València
- Alejandro Sánchez de Miguel, University of Exeter
- José Antonio Martínez, Diputación de Soria
- Josep Maria Ollé, Ayuntamiento de Reus
- Laura Guzmán Varo
- Mar Gandolfo de Luque, Philips Lighting SL

Se ha abordado el problema en tres grandes campos: la protección del cielo nocturno y el resplandor luminoso, la salud humana en lo referido especialmente a la iluminación en horas nocturnas y la interacción con el ciclo circadiano, y por último los efectos de la luz en los ecosistemas nocturnos.

El primer documento se centra en la contaminación luminosa y si los Diodos LED producen un riesgo mayor de contaminación luminosas que otras fuentes de luz, sobre esta problemática hay mayor consenso que en el resto de los campos en que ha trabajado el grupo. La iluminación

LED bien usada puede contribuir a disminuir el resplandor luminoso nocturno, pero se advierte que el hecho de poder usar una tecnología mucho más eficiente puede llevar a incrementar los niveles luminosos lo que conllevaría un mayor resplandor luminoso.

Por eso, desde este grupo de trabajo se formula la recomendación de acompañar la difusión de la tecnología LED con acciones para el fomento de una nueva cultura de la luz, que evite las tendencias al exceso tan arraigadas en nuestra sociedad, de manera que pueda lograrse de manera efectiva un ahorro de recursos gracias a la iluminación con LED, a la vez que se limite la contaminación lumínica. En esto los LED pueden ser un gran aliado si se combinan con adecuados sistemas de control para la regulación del flujo luminoso y adecuados sistemas ópticos para cada aplicación.

Por otro lado, el grupo ha analizado con detalle el hecho de que la luz blanca producida por la mayor parte de los diodos actuales se realiza mediante la emisión en color azul y su posterior conversión a otros colores mediante los fósforos, dando como resultado el típico espectro de los Diodos LED con un pico de emisión en el azul más o menos pronunciado en función de la temperatura de color correlacionada final del Diodo blanco. Este pico de emisión azul es la causa principal de preocupación del colectivo que quiere preservar el cielo nocturno ya sea por interés científico o por conservación del cielo estrellado. En una atmósfera limpia, con contenido de aerosoles normal, el proceso físico dominante en la formación del brillo de fondo debido a luz artificial es el esparcimiento de Rayleigh. Este fenómeno físico depende mucho del color de la luz, al ser inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda, por lo que la parte azul del espectro tiene un potencial intrínseco de esparcimiento mucho mayor que otros colores.

Hasta ahora, la comparación de las diversas fuentes de luz respecto a la contaminación luminosa nocturna se ha realizado comparando el tanto por ciento de emisión de azul respecto al total de emisión del espectro de la fuente de luz. Esta aproximación puede resultar engañosa y una de las conclusiones de este grupo de trabajo apunta a la necesidad de formular tales comparaciones en términos de luz azul frente al espectro normalizado según la curva de sensibilidad espectral del ojo humano, es decir, la potencia de luz azul (W/nm) frente al flujo o potencia luminosa (lm).

De esta manera se puede comparar de modo más adecuado y equitativo la cantidad de luz azul radiada para un nivel de iluminación determinado. A raíz de las comparaciones hechas por el grupo de trabajo David Galadí-Enríquez ha desarrollado una serie de índices espectrales que permiten caracterizar de manera numérica y objetiva las diversas fuentes de luz.

El segundo documento referido a los riesgos de los LED para la salud humana tiene en cuenta los efectos en la salud de la exposición a la luz artificial, y en particular a la producida por fuentes LED, en el documento se consideran entre otros aspectos:

La incidencia de la luz procedente de LED sobre los procesos de **regulación circadiana** y las enfermedades sistémicas asociadas.

Los posibles **daños oculares** derivados de la exposición a este tipo de iluminación.

El papel de los LED en la generación o agravamiento de **otras patologías**.

La existencia de situaciones asociadas al uso de LED que dificultan la **función visual** y pueden representar un riesgo para la salud.

Otros aspectos relacionados con la **percepción visual y el bienestar**.

También en este aspecto pueden ser de gran utilidad los índices espectrales desarrollados en el primer documento para una comparativa más objetiva entre diversas fuentes de luz.

El tercer documento trata sobre los efectos que puede producir la luz en los ecosistemas nocturnos cuando deberían permanecer en oscuridad. Se recogen algunas de las investigaciones hechas hasta la fecha sobre el efecto de la luz en la biodiversidad. La mayor parte de las investigaciones que se citan en el documento analizan la afección a la luz y no concretamente a la luz LED. Se hacen consideraciones sobre la distribución espectral y su afectación en algunas especies. En este campo se necesita mayor investigación sobre la afectación concreta de los LED en las diversas especies.

1

DOCUMENTO

**Grupo de trabajo Comité Español de Iluminación sobre los
posibles riesgos de la iluminación LED**

Contaminación Luminosa y LED

Redactores:

*David Galadí Enríquez / Ángela Ranea Palma / Estefanía Cañavate García
Javier Díaz Castro / María del Mar Gandolfo de Luque*

El alumbrado con LED y el cielo nocturno

La iluminación de poblaciones, vías de comunicación y otras instalaciones con luz artificial provoca en el cielo un resplandor luminoso que es necesario minimizar si se pretende disfrutar de un cielo limpio, en condiciones lo más parecidas posible a su estado natural de oscuridad. Esto es relevante tanto para realizar investigaciones astronómicas, sea en observatorios profesionales o de aficionados, como para disfrutar del maravilloso espectáculo de un cielo estrellado.

Si se entiende por contaminación lumínica su definición más general, como la introducción de luz artificial en el medio ambiente nocturno, se deduce que no es posible su supresión absoluta. Sin embargo, la tecnología de la iluminación, si se usa de manera adecuada, permite limitar la mayoría de los efectos de la contaminación lumínica. Desde este punto de vista, hace tiempo que cunde un consenso interdisciplinar que suele resumirse en una serie de puntos que ya forman parte de las buenas prácticas en ingeniería del alumbrado:

1. Iluminar aquello que realmente lo necesita.
2. Iluminar en los intervalos temporales en los que es realmente necesario.
3. Evitar la emisión de flujo luminoso por encima de la horizontal.
4. Evitar la intrusión lumínica (emisión de flujo luminoso hacia áreas diferentes de la que se necesita iluminar).
5. Emplear niveles de iluminación ajustados a las necesidades del uso, con posible regulación temporal no ya del encendido o apagado (punto 2), sino de la intensidad.
6. Emplear luz con las características espectrales adecuadas para el uso previsto, limitando en lo posible la luz de longitud de onda corta (azules).

Este grupo de trabajo se centra en la tecnología de alumbrado con diodos emisores de luz, o LED. Es evidente, de entrada, que las medidas para limitar la contaminación lumínica se aplican de manera general a todas las tecnologías de alumbrado, no solo a los LED. Pero también es cierto que esta tecnología, relativamente reciente, presenta algunas peculiaridades que conviene tener en cuenta a la hora de aplicarle algunos de los seis puntos de consenso general plasmados más arriba.

Regulación y direccionalidad

La tecnología de alumbrado por medio de LED ofrece algunas prestaciones que, al menos de manera potencial, podrían contribuir a cumplir los seis puntos de manera incluso mejor que con otras tecnologías. Las posibilidades de regulación instantánea de la potencia luminosa de los LED pueden favorecer la aplicación de los puntos 2 y 5. Por otra parte, la direccionalidad de estas fuentes de luz puede contribuir a los puntos 1, 3 y 4, especialmente si las lámparas LED se acompañan de ópticas adecuadas, específicamente diseñadas, en las luminarias. Por lo tanto, desde el punto de vista de la contaminación lumínica, puede afirmarse que el diseño cuidadoso de instalaciones de alumbrado basadas en LED, si sacan partido de todas las prestaciones potenciales de esta tecnología (regulación, direccionalidad) y de ópticas específicas, son capaces de mejorar la situación medioambiental en el tema que nos ocupa.

Las consideraciones temporales, es decir, de regulación horaria y estacional, empiezan a aparecer en algunas normativas de alumbrado, pero en cualquier caso el criterio que debe regir es el de racionalidad, adaptando encendido y apagado (punto 2), o cambio de potencia (punto 5), a las necesidades y usos cambiantes de la zona iluminada, a lo largo de la noche o con el cambio de las estaciones.

La direccionalidad (puntos 1, 3, 4) está vinculada de manera muy estrecha al concepto, tradicional en ingeniería del alumbrado, de *utilancia*. La utilancia U de una instalación o tramo de una instalación, se define como la relación entre el producto del nivel de iluminación medio (sin mantenimiento, $f_m=1$) por la superficie de cálculo (flujo útil que llega a la superficie de cálculo) dividido por el flujo saliente de las luminarias en el tramo de estudio. $U = f_u / \eta$, donde f_u es el factor de utilización de la instalación o tramo de estudio y η el rendimiento de la luminaria (cociente entre los lúmenes salientes de la luminaria respecto al flujo instalado de su fuente de luz). De la definición se deduce el carácter adimensional de la utilancia, que se suele expresar en forma de porcentaje. Aunque el mínimo exigible es del 50%, es posible alcanzar el 75% en casos necesarios si se trata de tramos rectos y, en cualquier caso, el objetivo consiste en maximizar el parámetro. Para evaluar este parámetro se recomienda incluir en la superficie útil o de cálculo los entornos previstos en la norma EN13201.

Este grupo formula la recomendación de que se introduzcan en los proyectos, siempre que sea posible, los medios técnicos necesarios para aprovechar las posibilidades de reducción de la contaminación lumínica gracias a las características de regulabilidad y direccionalidad de los LED.

Rendimiento energético y contaminación lumínica

La tecnología LED recurre a un mecanismo físico de emisión de luz radicalmente diferente al de las otras tecnologías de alumbrado. Esto se pone de manifiesto tanto en el tipo de luz que se genera, con una distribución espectral de características específicas, como en el rendimiento energético del proceso físico en términos de lúmenes producidos por cada vatio de energía eléctrica consumido. También estos dos rasgos específicos de la luz LED entran en contacto con la prevención de la contaminación lumínica.

Desde el punto de vista del rendimiento, la historia social y política del alumbrado en España, así como en otros países de nuestro entorno, ha mostrado que las mejoras en eficiencia energética de las fuentes de luz rara vez han conducido a un ahorro económico efectivo, porque la sociedad ha preferido mantener el nivel de gasto pero producir más luz. Este hecho cultural debe tenerse a la vista ante la revolución que se avecina, gracias a la tecnología LED, en las instalaciones de alumbrado. Todo indica que los LED mejorarán el rendimiento de los sistemas, es decir, hacen posible emitir más luz con menos coste.

Por tanto, una ventaja objetiva de esta nueva tecnología (mayor eficiencia) corre el riesgo de convertirse en desventaja desde el punto de vista de la conservación del cielo nocturno.

Por eso, desde este grupo de trabajo se formula la recomendación de acompañar la difusión de la tecnología LED con acciones para el fomento de una nueva cultura de la luz, que evite las tendencias al exceso (puntos 1 y 5 del consenso general) tan arraigadas en nuestra sociedad, de manera que pueda lograrse de manera efectiva un ahorro de recursos gracias a la iluminación con LED, a la vez que se limite la contaminación lumínica.

Consideraciones espectrales: luz azul y contaminación lumínica

Pero si lo que se desea es proteger el cielo para su observación debemos tener en cuenta que el esparcimiento de la luz en la atmósfera es responsable del resplandor artificial del cielo nocturno, que se manifiesta en forma de halo luminoso que envuelve pueblos y ciudades. Esto ocurre cuando la luz procedente de los sistemas de alumbrado, sea directa o reflejada, interacciona con las moléculas del aire y con las partículas en suspensión (aerosoles).

La relación entre la cantidad de luz útil y el resplandor del cielo depende del diseño de las luminarias y del tipo de lámparas empleadas, y también de los factores de reflexión de los materiales iluminados. En una atmósfera limpia, con contenido de aerosoles normal, el proceso físico dominante en la formación del brillo de fondo debido a luz artificial es el esparcimiento de Rayleigh (también llamado a veces difusión de Rayleigh o dispersión de Rayleigh, *Rayleigh scattering* en inglés). Este mecanismo físico depende mucho del color, al ser inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda (o directamente proporcional a la cuarta potencia de la frecuencia), lo que explica el tono azul del cielo durante el día: la parte azul de la luz procedente del Sol se esparce mucho más que las partes amarilla, anaranjada o roja. Lo mismo ocurre con la luz artificial de noche. En consecuencia, a los criterios tradicionales para reducir el resplandor artificial del cielo nocturno (puntos 1 a 5 de la lista de consenso) debe añadirse el criterio espectral (punto 6): la parte azul de la luz tiene un potencial intrínseco de esparcimiento muchísimo mayor.

Como resultado de estas leyes físicas fundamentales, una manera clave de reducir el impacto de la iluminación nocturna sobre la astronomía y sobre el paisaje natural consiste en reducir siempre que sea posible la cantidad absoluta de luz azul introducida en la atmósfera. Puede afirmarse de manera general, sobre la base de la pura ley física, que el uso de luz blanca fría para el alumbrado de exteriores perjudica la oscuridad natural del cielo nocturno más que otras luces con distribuciones espectrales más cálidas, si la cantidad total de energía emitida en forma de luz por ambas fuentes es la misma. Como queda dicho, el objetivo consiste en reducir la cantidad de luz azul en términos absolutos y, por tanto, no debe descartarse la posibilidad de que una instalación con fuentes de luz más azuladas resulte menos perjudicial para el cielo que otra con fuentes más rojizas, si la intensidad de

la primera es lo suficientemente baja. Dado que las fuentes de luz LED, en virtud del proceso físico de emisión que las caracteriza, poseen distribuciones espectrales peculiares, cabe plantearse la relación entre esta tecnología de alumbrado y la contaminación lumínica.

La inmensa mayoría de LED para alumbrado parte de un diodo emisor de luz azul, cuya radiación se convierte luego en un espectro más amplio a través de capas de fósforos. Este diseño explica que muchas lámparas LED posean una cantidad considerable de emisión en la parte azul del espectro. El resultado presenta ventajas desde el punto de vista de la reproducción cromática. El carácter continuo, y no de líneas, del espectro resultante también supone ventajas para ciertas aplicaciones.

Si antes se recomendaba evitar que la mejor eficacia del LED se traduzca en el incremento de niveles de alumbrado, ahora conviene mencionar la tendencia a sustituir fuentes de luz tradicionales, como el sodio a alta presión, por lámparas LED. Si se emplean para ello fuentes LED con gran contenido de luz azul, incluso manteniendo o reduciendo ligeramente los niveles de alumbrado, se causará un incremento de la luz esparcida. Por tanto, **cabe recomendar que en las reformas de alumbrado que impliquen el paso a luz más blanca o azulada que la existente, se tienda de manera sistemática a una reducción de niveles suficiente (siempre manteniendo lo requerido por la normativa, la seguridad y las necesidades de uso de los espacios iluminados).**

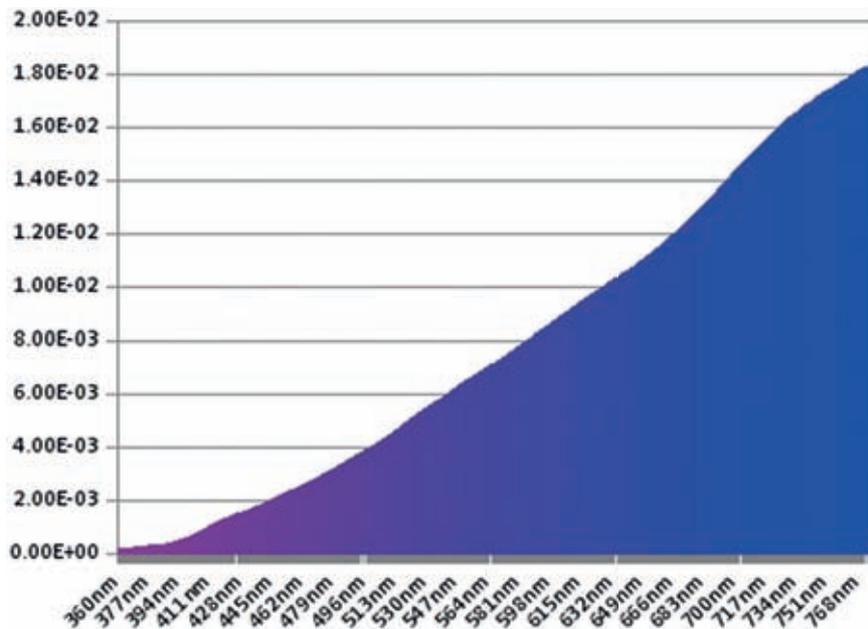
Tradicionalmente se ha caracterizado la distribución espectral de las lámparas mediante el concepto de temperatura de color correlacionada (CCT, *correlated colour temperature*). Este parámetro procede de los tiempos en que las fuentes emisoras de luz eran cuerpos negros y, por tanto, posee un sentido cuantitativo riguroso solamente para lámparas incandescentes. En la era de las lámparas de descarga o las fuentes de estado sólido, la CCT tiene un cierto sentido para la descripción estética o comercial de las lámparas, pero tanto la teoría como la experiencia demuestran que resulta poco preciso a la hora de efectuar valoraciones cuantitativas sobre el comportamiento espectral de la luz. En este sentido, uno de los puntos importantes de este grupo de trabajo ha sido el análisis cuantitativo de las características de las fuentes de luz por medio de indicadores más rigurosos que la temperatura de color correlacionada.

Hasta ahora, los intentos en esta línea han tratado de comparar las emisiones en el azul (por debajo de una cierta longitud de onda umbral) con el total de energía emitida por las lámparas. Esta aproximación puede resultar engañosa y una de las conclusiones de este grupo de trabajo apunta a la necesidad de formular tales comparaciones no en términos de luz azul frente al espectro total en su valor de potencia absoluta radiada en W/nm, sino en términos de luz azul frente al espectro normalizado según la curva de sensibilidad espectral del ojo humano, es decir, la potencia de luz azul (W/nm) frente al flujo o potencia luminosa (lm). De esta manera se puede comparar de modo más adecuado y equitativo la cantidad de luz azul radiada para un nivel de iluminación determinado.

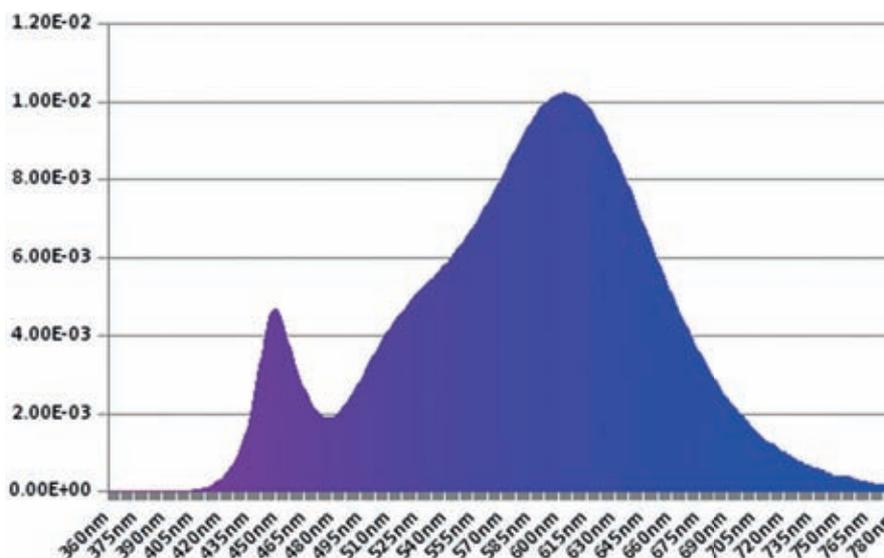
Sin entrar en detalles numéricos excesivos, que pueden consultarse en el anexo sobre índices espectrales, el argumento anterior se entiende incluso desde un punto de vista intuitivo si se considera el caso de las lámparas incandescentes. Si se observa el espectro de una de estas lámparas con CCT = 3000 K, puede parecer que la cantidad de luz azul (por ejemplo, por debajo de 500 nm) es muy baja comparada con el total de emisiones.

Si se considera ahora el espectro de una lámpara LED con la misma CCT (habitualmente descrito como “blanco cálido”), parece que la proporción entre luz azul y luz total es mucho mayor. De hecho, la comparación da un 8% de luz azul para la lámpara incandescente y un 14% para este LED concreto. Pero esta comparación pondera del mismo modo la luz verde que la enorme cantidad de luz roja emitida por la lámpara incandescente, de eficacia luminosa bastante escasa, por no hablar de la radiación infrarroja (de eficacia nula). La comparación rigurosa debería efectuarse en términos de luz azul frente a flujo luminoso (luz eficaz) desde el punto de vista perceptual. Para ello deben normalizarse los espectros a un cierto nivel intensidad luminosa, pesando para ello su emisión mediante la curva de sensibilidad espectral del ojo humano. Si se hace de este modo, al valorar la proporción de luz azul frente a luz eficaz en los espectros que se han puesto como ejemplo resulta una comparación mucho más equilibrada.

En este sentido, **este grupo recomienda que no se realicen comparaciones de emisión azul de una fuente**



Espectro de una lámpara incandescente de CCT = 3000 K

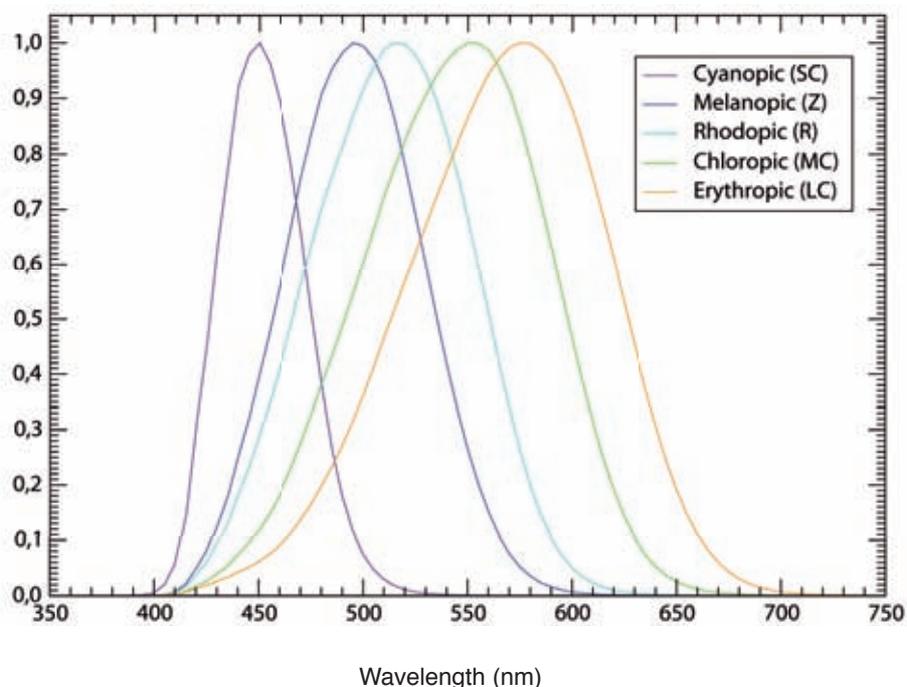


Espectro de una lámpara LED de CCT = 3000 K

de luz respecto a otra tan solo por su distribución de potencia radiada total, sino normalizando las radiaciones emitidas según la curva de sensibilidad espectral (normalizando los espectros al mismo “nivel de luz” o potencia luminosa).

Durante el desarrollo de este grupo de trabajo se ha analizado en profundidad este problema con el deseo de definir un índice espectral de las fuentes de luz que sí sea útil para comparar cualquier tipo de tecnología. Esto ha conducido a elaborar el método de índices espectrales para caracterizar

Filter values (normalised)
CIE TN 003:2015



Curvas de sensibilidad espectral de los diferentes pigmentos de la retina humana, según CIE TN 003:2015

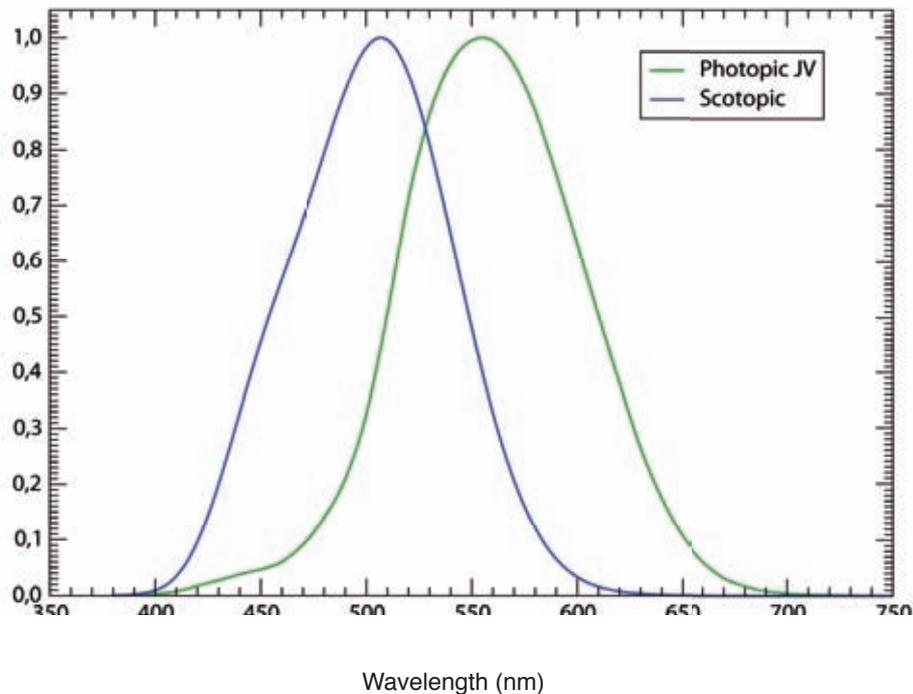
de manera numérica y objetiva las propiedades espectrales clave de las lámparas. El anexo contiene una descripción detallada del método, el cual se presentará próximamente en medios científicos y técnicos a través de publicaciones y comunicaciones en congresos. Aquí se expone ahora tan solo una explicación muy general, que en esencia consiste en formalizar y generalizar el ejemplo práctico expuesto más arriba.

El sistema de índices espectrales permite comparar la cantidad de luz emitida por una fuente luminosa en dos regiones distintas del espectro. Se toman dos regiones espectrales definidas cada una de ellas por un "filtro" o curva de sensibilidad. Por ejemplo, el filtro 1 podría venir dado por la curva de sensibilidad de las células ganglionares fotosensibles, implicadas en el ajuste de los ritmos circadianos (curva Z en la figura anterior, basada en datos de la publicación CIE TN 003:2015), mientras que el filtro 2 podría corresponder a la curva estándar de sensibilidad humana en condiciones fotópicas (véase la curva verde en la figura siguiente, según Judd-Voss (1978)).

Se procede a multiplicar el espectro de la lámpara problema por cada uno de los dos filtros elegidos, y a partir de los valores resultantes se calcula el índice espectral que compara ambos filtros, según una definición que requiere que el filtro 1 sea el más azul, y que implica lo siguiente:

1. Dados dos filtros, 1 y 2, el índice vale cero cuando por los dos pasa la misma cantidad de radiación. Índice nulo significa equilibrio entre las dos bandas.
2. El índice es negativo cuando pasa más energía por el filtro 1, el más azul, y positivo cuando pasa más energía por el filtro 2, el más rojo.
3. Una diferencia de valor de 5 unidades en el índice espectral implica un factor 100 en la radiación que pasa por los dos filtros. Por ejemplo, si el índice espectral de una lámpara para los filtros 1 y 2 fuera +5, eso querría decir que la lámpara emite cien veces más energía en el filtro 2 que el filtro 1.
4. Análogamente, si el índice espectral fuera negativo y de valor -5, por el filtro primero (el más azul) pasaría cien veces más energía que por el segundo.

Standard sensitivity curves (normalised)



Curvas de sensibilidad espectral de la vista humana en condiciones fotópicas y escotópicas

Como se ha indicado, en la mayor parte de las normativas existentes para la protección del cielo se habla o bien de tanto por ciento del espectro por debajo de una longitud de onda, o bien de temperatura de color correlacionada de la fuente de luz. Dentro de la misma tecnología, incandescencia o LED, es cierto de manera aproximada que cuanto mayor sea su temperatura de color más cantidad de luz azul estaremos emitiendo, pero el estado actual de la tecnología de alumbrado, y del análisis de los efectos de la luz artificial en la noche, requieren aplicar conceptos numéricos objetivos más precisos. Por eso un criterio de temperatura de color de carácter general no es adecuado, puesto que en función de las líneas espectrales que tenga la fuente de luz podemos tener más o menos cantidad de azul para las mismas temperaturas de color. El sistema de índices espectrales permite efectuar estas comparaciones de manera general. La flexibilidad del sistema yace en que los filtros 1 y 2 pueden definirse de manera totalmente arbitraria, de modo que para estudios sobre cronodisrupción, por ejemplo, puede calcularse el índice que evalúa la luz

eficaz desde el punto de vista del pigmento melanopsina (el de las células retinianas implicadas en la respuesta circadiana, curva Z) frente a la luz eficaz desde el punto de vista visual (fotópico, por ejemplo), pero en estudios sobre otro tipo de efectos cabría definir índices que comparen la curva de sensibilidad de una especie animal concreta frente a la radiación total emitida, etcétera.

Una ampliación del sistema de índices espectrales podría permitir, además, valorar el potencial de esparcimiento de Rayleigh de cada espectro. Se ofrecen algunos detalles adicionales en el anexo. El sistema de índices espectrales y su posible extensión al índice Rayleigh se proponen como herramientas objetivas, cuantitativas, útiles para la comparación de lámparas y espectros de una manera mucho más significativa y rigurosa que la temperatura de color correlacionada. Si la propuesta arraigara, sería posible basar los criterios de selección de lámparas sobre estos índices, evitando por completo algunas de las dificultades y errores descritos.

El debate sobre las propiedades espectrales de los LED puede ponerse así sobre bases cuantitativas rigurosas y justas para todas las tecnologías, trasladando la argumentación del terreno de “LED frente a descarga” o “LED frente a otras tecnologías” al territorio de “distribuciones espectrales frente a otras”, con independencia de su proceso físico de emisión. **Este grupo de trabajo recomienda, por tanto, considerar la difusión de métodos basados en índices espectrales para la comparación de lámparas, así como para el establecimiento de requisitos cuantitativos en las normativas.**

Dos ejemplos concretos

Describimos brevemente dos ejemplos concretos (véanse más detalles en el anexo). En primer lugar consideramos un índice que compara la cantidad total de energía emitida

en longitudes de onda inferiores a 500 nm con la parte de la luz eficaz desde el punto de vista lumínico según la curva fotópica $V(\lambda)$, índice que etiquetamos como $C_{L500,V}$. La tabla siguiente muestra el índice resultante, para una selección de lámparas de distintas tecnologías. Podría ser interesante basar las normativas de protección sobre criterios numéricos de este tipo, fijando límites al valor del índice espectral, que debería ser superior a un cierto umbral. En la tabla se han marcado en verde y solo a efectos de ilustración las lámparas con índice $C_{L500,V}$ superior a la unidad (la energía radiada por debajo de 500 nm asciende al 40% de la energía eficaz desde el punto de vista lumínico). Obsérvese que, aunque existe una correlación entre el índice y la temperatura de color, tal correlación no es perfecta y en ocasiones se producen incluso cambios en el orden en que quedan ordenadas las lámparas según $C_{L500,V}$ o según CCT.

Lámpara	L500 - V		CCT (K)
	Q	C	
PC ámbar	0.01056	4.94105	1727
Sodio baja presión	0.02994	3.80955	1834
Sodio alta presión	0.10498	2.44722	1906
Halogenuros metálicos	0.23292	1.58198	2424
Halogenuros metálicos	0.24949	1.50738	2561
LED	0.22687	1.61056	2680
Halogenuros metálicos	0.27930	1.38482	2749
LED	0.25330	1.49093	2769
LED	0.27730	1.39264	3002
LED	0.27759	1.39151	3024
LED	0.52059	0.70876	3782
Halogenuros metálicos	0.46428	0.83304	3786
LED	0.43531	0.90299	4007
Halogenuros metálicos	0.58053	0.59044	4062
LED	0.63557	0.49208	5655
LED	0.70540	0.37891	6050
LED	0.76680	0.28830	7005

Como segundo ejemplo, veamos el comportamiento de un índice que compare con la potencia luminosa no toda la luz emitida en longitudes de onda por debajo de cierto umbral, sino la luz azul que atraviesa un cierto filtro, que podría ser el correspondiente a la curva de acción de sensibilidad de la melanopsina (pigmento fotosensible implicado en la regulación de los ritmos circadianos, curva Z).

Resulta así el índice espectral C_{zV} :



Lámpara	Z-V		CCT (K)
	Q	C	
PC ámbar	0.06685	2.93722	1727
Sodio baja presión	0.04280	3.42150	1834
Sodio alta presión	0.12710	2.23965	1906
Halogenuros metálicos	0.30614	1.28520	2424
Halogenuros metálicos	0.33503	1.18730	2561
LED	0.36133	1.10524	2680
Halogenuros metálicos	0.38163	1.04590	2749
LED	0.33804	1.17757	2769
LED	0.41382	0.95798	3002
LED	0.42684	0.92434	3024
LED	0.48117	0.79426	3782
Halogenuros metálicos	0.48435	0.78710	3786
LED	0.54647	0.65609	4007
Halogenuros metálicos	0.42729	0.92320	4062
LED	0.56860	0.61299	5655
LED	0.74712	0.31652	6050
LED	0.69765	0.39090	7005

En la tabla anterior de nuevo se han marcado en verde las lámparas con índice superior a la unidad, sin que esto implique que se esté recomendando adoptar ese umbral. Se aprecia de nuevo que la correlación entre índice y CCT no es perfecta, incluso con cambios de orden ocasionales. En caso de establecerse limitaciones basadas en un índice de

este tipo, que compara la radiación emitida en una banda azul con la luz eficaz en términos de potencia lumínica, sería necesario acordar el filtro azul elegido (que podría ser el melanópico, Z, o la curva de acción *blue hazard*, B, o incluso alguna otra de carácter más arbitrario) y, también, los límites numéricos recomendables, previo estudio detallado del problema.

Anexo al Documento 1

El sistema de índices espectrales como recurso para la caracterización de las lámparas

Grupo de trabajo Comité Español de Iluminación sobre los posibles riesgos de la iluminación LED

Subgrupo de Contaminación Luminosa y LED

Autor:

David Galadí Enríquez

Incluye aplicación a espectros empíricos de lámparas, procedentes de diferentes fuentes, medidos en rangos espectrales variados y con resoluciones espectrales también diversas.

Espectros proporcionados por:

Manuel García Gil

(Generalitat de Catalunya, Servei per a la Prevenció de la Contaminació Lumínica)

Mar Gandolfo de Luque

(Comité Español de Iluminación-Philips)

Javier Díaz de Castro

(Instituto de Astrofísica de Canarias)

Laura Guzmán Varo

(Comité Español de Iluminación-Light Environment Control)

Ramon Llorens

(SACOPA-IgniaLight)

Light Spectral Power Distribution Database

(www.lspdd.com)

Basado en las curvas de sensibilidad espectral propuestas por la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) en su nota técnica CIE TN 003:2015, «Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry, 2013», y en «ICNIRP Guidelines on Limits of Exposure to Incoherent Visible and Infrared Radiation» (*Health Physics* **105(1)**: 74-96; 2013).

Resumen

Se describe un método numérico objetivo para la caracterización de las propiedades espectrales de las lámparas, el de los índices espectrales, basado en una escala logarítmica para valorar y comparar la cantidad de flujo emitido por en una serie de bandas espectrales definidas de acuerdo con criterios numéricos. El procedimiento es de carácter *totalmente general* y, por tanto, aplicable a bandas espectrales arbitrarias (definidas por las curvas de sensibilidad que se deseen). También es independiente de las unidades de me-

didada de los espectros de partida, y no requiere hacer referencia a ninguna fuente de iluminación estándar determinada. Su carácter logarítmico simplifica las comparaciones entre distintas bandas y lámparas, permite un encaje sencillo con el tratamiento de fenómenos de esparcimiento y extinción (en la atmósfera o en otros medios de propagación) y, si se adoptan las convenciones adecuadas, resulta 100% compatible con las técnicas fotométricas empleadas actualmente en astrofísica.

1. Introducción: paralelismo entre iluminación y astronomía observacional

La astronomía observacional se desarrolló durante siglos trabajando casi exclusivamente con cuerpos negros (o emisores térmicos) como las estrellas, y recurriendo al ojo humano y, por tanto, a la banda definida por su curva de sensibilidad espectral, como único detector. A finales del siglo XIX se introdujo la fotografía, con una curva de sensibilidad espectral distinta a la del ojo humano, mucho más sensible y sesgada hacia longitudes de onda del azul. Al mismo tiempo se empezaron a aplicar técnicas espectroscópicas que permitieron descubrir

y estudiar emisores no térmicos, con espectros con líneas de emisión como las nebulosas. Más tarde se han descubierto otros objetos astrofísicos con espectros no térmicos. La proliferación de tecnologías de detección acabó conduciendo a definir sistemas fotométricos basados en el uso de muchas bandas espectrales, cada una de ellas definida por un filtro específico. Uno de los sistemas más utilizados, entre los centenares existentes, es el de Johnson-Cousins basado en los filtros *U, B, V, R, I* (fig. 1 y tabla 1).

Johnson-Cousins passbands

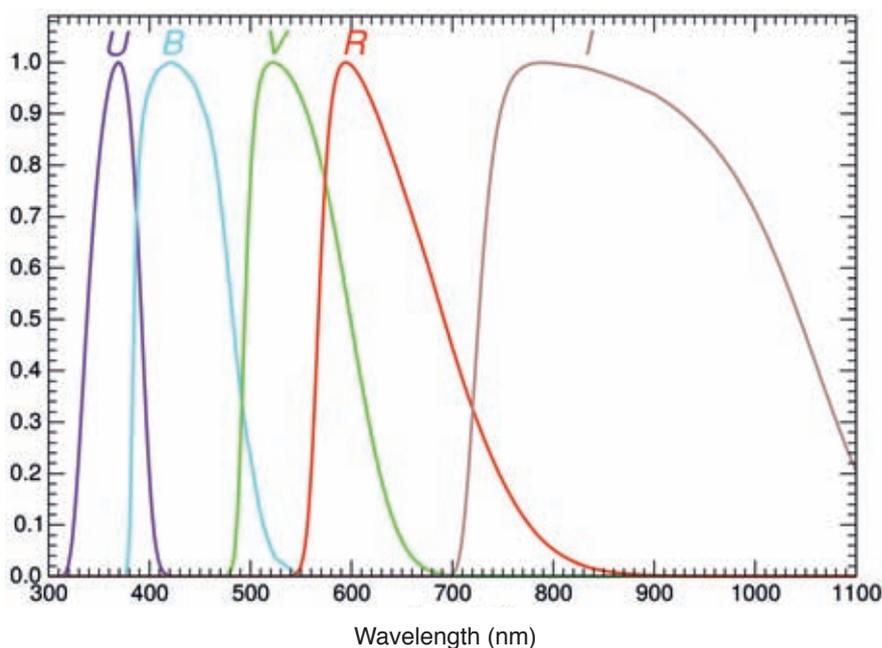


Figura 1. Curvas de sensibilidad espectral (normalizadas a máximo = 1) de los filtros del sistema fotométrico Johnson-Cousins, uno de los más empleados en astronomía observacional. www.aip.de

FILTRO	U	B	V	R	I
λ central (nm)	360	440	550	650	800
Anchura a media altura (nm)	70	100	80	160	160

Tabla 1. Descripción simplificada (longitud de onda central y anchura a media altura) de los filtros del sistema Johnson-Cousins.

El paralelismo entre la evolución de la fotometría astronómica y algunos aspectos de la ingeniería de la iluminación es más que notable. También en este campo se empezó trabajando casi exclusivamente con cuerpos negros (lámparas incandescentes) y una única curva de sensibilidad, la del ojo humano en condiciones fotópicas. Poco después se añadió la curva de sensibilidad escotópica (con mayor sensibilidad en términos absolutos, y desviada hacia el azul respecto de la fotópica), y el avance de las tecnologías de alumbrado ha conducido al empleo de multitud de fuentes de luz que no son cuerpos negros, como las lámparas de descarga o los diodos emisores de luz (LED).

Además, en décadas recientes se ha avanzado mucho en el estudio de los pigmentos fotosensibles tanto del ser humano como de otras especies animales y vegetales, lo que ha llevado a caracterizar multitud de curvas de sensibilidad

espectral complementarias a las tradicionales. En este contexto de emisores no térmicos y multiplicidad de bandas espectrales de interés, totalmente análogo al experimentado en fotometría astronómica, aquellos conceptos que nacen del estudio de emisores térmicos y del sistema visual humano como el de temperatura de color correlacionada (CCT) pierden parte de su significado. Cabe plantearse de qué manera se podría desarrollar un método riguroso para la caracterización espectral que no requiera especificar la distribución espectral completa de las lámparas, pero sobre el que puedan efectuarse cálculos con significado físico inequívoco. Una posibilidad prometedora consiste en adaptar algunas de las técnicas fotométricas aplicadas en astronomía observacional, en particular el sistema de los denominados índices de color, el cual proponemos adaptar a la evaluación de lámparas con el nombre de *índices espectrales*.

	Astronomía observacional	Luminotecnia
Espectro problema original	Cuerpos negros (estrellas)	Cuerpos negros (lámparas incandescentes)
Banda espectral original	Sensibilidad del ojo humano	Sensibilidad del ojo humano (fotópica)
Primeras bandas espectrales adicionales	Banda fotográfica (sesgada al azul)	Sensibilidad escotópica (sesgada al azul)
Espectros problema adicionales	Emisores no térmicos: espectros nebulares de emisión, radiación sincrotrón, etc. Espectros desplazados al rojo.	Emisores no térmicos: lámparas de descarga, diodos emisores de luz.
Bandas adicionales posteriores	Multitud de bandas dentro y fuera del espectro visible, con la evolución de la tecnología de detectores. Sistema UBVRI.	Bandas vinculadas a pigmentos visuales y circadianos: LC, MC, R, Z, CS. Curvas de sensibilidad espectral de otras especies.

Tabla 2. Paralelismo entre la evolución de las técnicas fotométricas en astronomía observacional y en luminotecnia

2. Conceptos básicos: espectro y filtro

Los datos básicos de partida son la distribución espectral de la luz emitida por la lámpara objeto de estudio, y la banda o bandas espectrales en las que se desea evaluar su emisión.

2.1. Espectros

Para los fines que nos ocupan no resultan especialmente relevantes las unidades en las que se exprese la distribución espectral, $E(\lambda)$, siempre y cuando esas unidades sean de carácter físico, es decir, no hayan sido filtradas ni alteradas por ninguna función de sensibilidad espectral, y que vengan dadas en términos de energía, y no de flujo de fotones. Estas condiciones suelen darse en luminotec-

nia cuando se trabaja con espectrógrafos bien calibrados. Son frecuentes en estos contextos unidades de medida como W/nm , $\mu W/(cm^2 nm)$ a x metros de distancia, $W/(m^2 sr nm)$, etcétera. La diferencia entre un mismo espectro expresado en unas de estas unidades o en otras consiste en un factor multiplicativo: dado el espectro en unas unidades, $E(\lambda)$, para pasar a otras basta aplicar un factor adecuado que podemos representar como ϵ para pasar a tener así $\epsilon E(\lambda)$. Como veremos más adelante, el sistema de índices espectrales brinda resultados independientes de estos factores ϵ y, en consecuencia, no hay que preocuparse por las unidades en las que venga expresado el espectro.

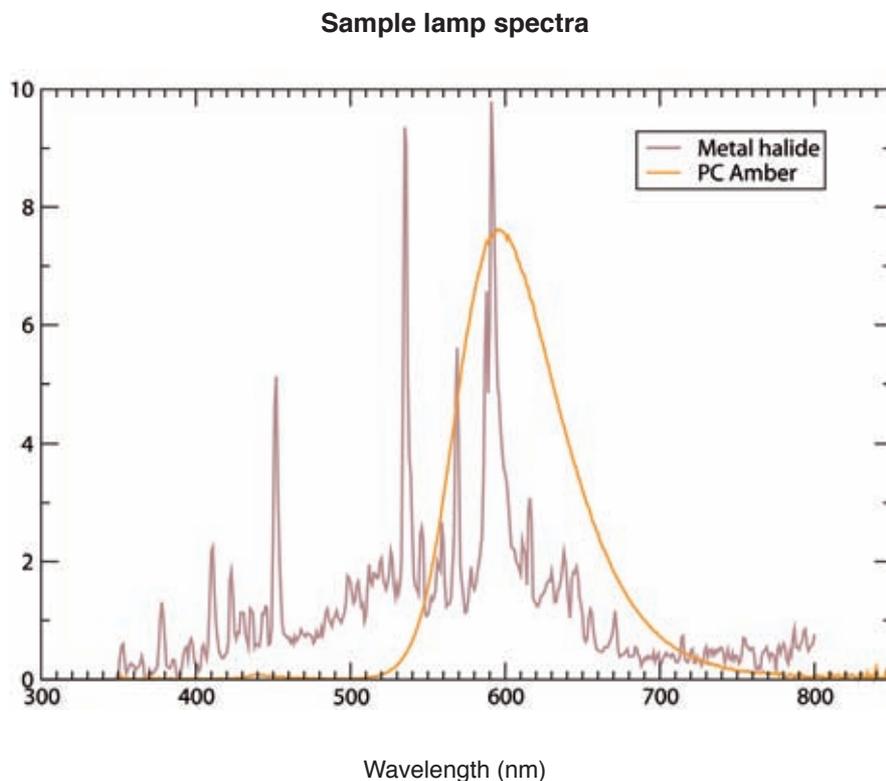


Figura 2. Dos ejemplos de espectros de lámparas, procedentes de fuentes distintas: una lámpara de halogenuros metálicos y un diodo emisor de luz con tecnología LED PC ámbar. Las unidades del eje vertical no son relevantes para nuestros fines, siempre que se trate de una medida de la energía (y no del flujo de fotones), y que el espectro esté bien calibrado (sin alteraciones de sensibilidad en función de la longitud de onda).

2.2. Filtros o curvas de sensibilidad espectral

La luz emitida por la lámpara actúa sobre un sistema receptor que es sensible a ciertas longitudes de onda, y no a otras. Los ejemplos más conocidos de curvas de sensibilidad espectral son las funciones que describen la respuesta del ojo humano a la luz en condiciones fotópicas y escotópicas.

CIE recomienda seguir la costumbre más difundida en física y también, por tanto, en astrofísica, de describir las curvas de sensibilidad (o de transmitancia de los filtros) $F(\lambda)$ normalizándolas de manera que su máximo sea igual a la unidad. Esto permite describir todas las curvas de un modo intercomparable, a la vez que mantiene el sentido físico de las unidades espectrales cuando se aplica la función a un espectro.

Por supuesto, una cosa es la curva de sensibilidad de un detector (o de transmitancia espectral de un filtro, como las mostradas en la figura 1), y otra la intensidad del efecto que inducen, lo que en las publicaciones CIE suele denominarse *espectro de acción* (o *action spectrum*). Por ejemplo, en las conocidísimas curvas mostradas en la figura 3, es bien sabido que, aunque se hayan representado ambas con máximo

unidad, en régimen escotópico el ojo humano es muchísimo más sensible a la luz que en régimen fotópico, de manera que la *acción* inducida por la curva escotópica, evaluada en lúmenes (por ejemplo) resulta mayor. Si se trata de evaluar *acciones* espectrales, por tanto, a la curva normalizada $F(\lambda)$ debe aplicarse una constante multiplicativa ϕ que altere *tanto la escala de la acción como las unidades resultantes*. Así, si $F(\lambda)$ es la curva normalizada en unidades adimensionales, su acción correspondiente será $\phi F(\lambda)$, en unidades que dependen de la acción en cuestión, lúmenes por vatio en el caso de la acción visual o luminosidad. Si se pretende aplicar una curva de acción espectral es muy importante hacerlo sobre un espectro expresado en las unidades adecuadas al valor de la constante ϕ que se utilice. Como es bien sabido, los valores de ϕ para las curvas de la figura 3 son 683 lm/W en el caso fotópico y 1700 lm/W en el escotópico, y su aplicación requiere disponer de espectros expresados en unidades de vatio por unidad de longitud de onda.

En lo que sigue mantendremos las constantes ϕ en la notación, aunque en la práctica se aplicará siempre, al final, la curva normalizada, es decir, $\phi = 1$ en todos los casos.

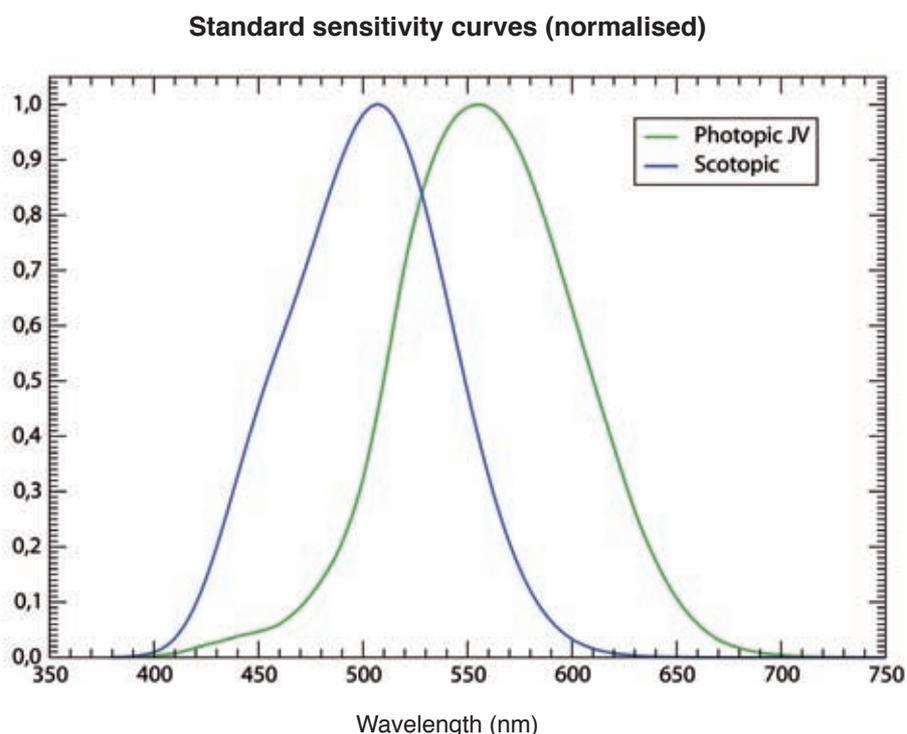


Figura 3. Curvas estándar de sensibilidad del ojo humano en condiciones fotópicas y escotópicas. La curva fotópica es la modificada según Judd-Voss (1978). Normalizadas a máximo unidad, siguiendo las recomendaciones CIE.

3. Interacción espectro-filtro

Estamos ya en condiciones de combinar los dos conceptos comentados más arriba, espectro y curva de sensibilidad espectral (o filtro).

3.1. Flujo filtrado

Dado un espectro $E(\lambda)$ y un filtro $F(\lambda)$, el espectro filtrado equivale al producto de ambas funciones, $F(\lambda) E(\lambda)$, y el flujo total filtrado Φ_{EF} equivale a la integral de la función resultante, sobre todas las longitudes de onda:

$$\Phi_{E,F} = \int \varphi F(\lambda) \varepsilon E(\lambda) d\lambda = \varphi \varepsilon \int F(\lambda) E(\lambda) d\lambda$$

Donde se han mantenido, por completitud, los factores de escala (unidad de medida) del espectro, ε , y de acción espectral φ .

3.2. Flujo bolométrico o total

Un caso particular trivial de flujo filtrado, pero ciertamente útil para lo que sigue, es el de un filtro que no filtre nada, es decir, $F(\lambda) = 1$ para cualquier λ . Este no-filtro, que en astronomía suele recibir el nombre de *bolométrico*, conduce al *flujo bolométrico*, que no es más que la intensidad total emitida en todas las longitudes de onda:

$$\Phi_{E,\text{bol}} = \int \varepsilon E(\lambda) d\lambda = \varepsilon \int E(\lambda) d\lambda$$

Obviamente, para el filtro bolométrico $\phi_{\text{bol}} = 1$ siempre.

3.3. Flujo relativo en dos filtros

Damos un paso más hacia nuestro objetivo al plantearnos cocientes entre flujos filtrados en dos bandas distintas. Dado un espectro, $E(\lambda)$, y dos filtros, $F_1(\lambda)$ y $F_2(\lambda)$, consideramos el cociente:

$$Q_{1,2}(E) = \frac{\Phi_{E,F1}}{\Phi_{E,F2}} = \frac{\int \varphi_1 F_1(\lambda) \varepsilon E(\lambda) d\lambda}{\int \varphi_2 F_2(\lambda) \varepsilon E(\lambda) d\lambda} = \frac{\varphi_1 \varepsilon \int F_1(\lambda) E(\lambda) d\lambda}{\varphi_2 \varepsilon \int F_2(\lambda) E(\lambda) d\lambda} = \frac{\varphi_1 \int F_1(\lambda) E(\lambda) d\lambda}{\varphi_2 \int F_2(\lambda) E(\lambda) d\lambda}$$

Donde se aprecia con claridad que, al ser un cociente, el resultado es independiente de las unidades concretas en las que se exprese el espectro. Si los filtros o curvas de sensi-

bilidad espectral están normalizados, el cociente de factores ante la integral es igual a la unidad y queda:

$$Q_{1,2}(E) = \frac{\Phi_{E,F1}}{\Phi_{E,F2}} = \frac{\int F_1(\lambda) E(\lambda) d\lambda}{\int F_2(\lambda) E(\lambda) d\lambda}$$

3.4 La eficacia luminosa como un caso particular de flujo relativo

La eficacia luminosa clásica puede entenderse como un caso particular de flujo relativo, en el que F_1 es la curva de sensibilidad espectral fotópica del ojo humano $V(\lambda)$, con $\varphi_V = 683 \text{ lm/W}$, y F_2 es el filtro bolométrico (ausencia de filtro):

$$\text{Eficacia luminosa} = \frac{\Phi_{E,V}}{\Phi_{E,\text{bol}}} = 683 \frac{\int V(\lambda) E(\lambda) d\lambda}{\int E(\lambda) d\lambda}$$

3.5. Algunas curvas de sensibilidad de interés

Estamos a un paso de introducir la escala logarítmica para convertir los flujos relativos en índices espectrales. Pero antes, hagamos una parada para considerar qué filtros o funciones de sensibilidad espectral podrían ser interesantes en ingeniería del alumbrado.

Al igual que en astronomía observacional, donde están en uso habitual muchos centenares de filtros diferentes, sin duda el número total de filtros de interés luminotécnico podría ser enorme. Entre ellos deben contarse, por supuesto, las funciones estándar de visibilidad fotópica $V(\lambda)$ y escotópica $V'(\lambda)$, pero pretendemos ir mucho más allá.

3.5.1. Curvas de sensibilidad espectral CIE TN 003:2015

El CIE define en su nota técnica 003:2015 las curvas de sensibilidad espectral de cinco pigmentos fotosensibles humanos, junto a la curva de transmitancia pre-receptoral (que evalúa la absorción espectral de los tejidos situados ante los receptores propiamente dichos). Consúltense la tabla del anexo A de la publicación CIE TN 003:2015. Resultan así cinco curvas de sensibilidad que reciben las denominaciones de cianópica (SC), melanópica (Z), rodópica (R), clorópica (MC)

y eritrópica (LC). Cuando se incorpora la función de transmitancia pre-receptoral $\tau(\lambda)$ y se normalizan las curvas resultantes a máxima unidad, se obtienen las curvas de sensibilidad que se describen en la tabla y la figura siguientes.

Aplicaremos también las curvas de acción denominadas *blue light hazard function* (B) y *aphakic hazard function* (A),

relacionadas con el daño retiniano causado por luz no coherente de longitud de onda corta, como se describen en «ICNIRP Guidelines on Limits of Exposure to Incoherent Visible and Infrared Radiation» (*Health Physics* **105(1)**: 74-96; 2013) (véase la figura 5). Debe advertirse que, por los motivos que se especifican en la publicación citada, el filtro A no suele normalizarse a máxima unidad.

Curva de sensibilidad	V'	V	SC	Z	R	MC	LC
λ central (nm)	507	555	450	495	515	550	575
Anchura a media altura (nm)	95	100	50	80	95	110	110

Tabla 3. Descripción simplificada (longitud de onda central y anchura a media altura) de las curvas de sensibilidad espectral de cinco fotorreceptores humanos, según CIE TN 003:2015. Curvas normalizadas tras aplicar la función de transmitancia pre-receptoral τ . Se incluyen las curvas estándar escotópica V' y fotópica V a efectos comparativos.

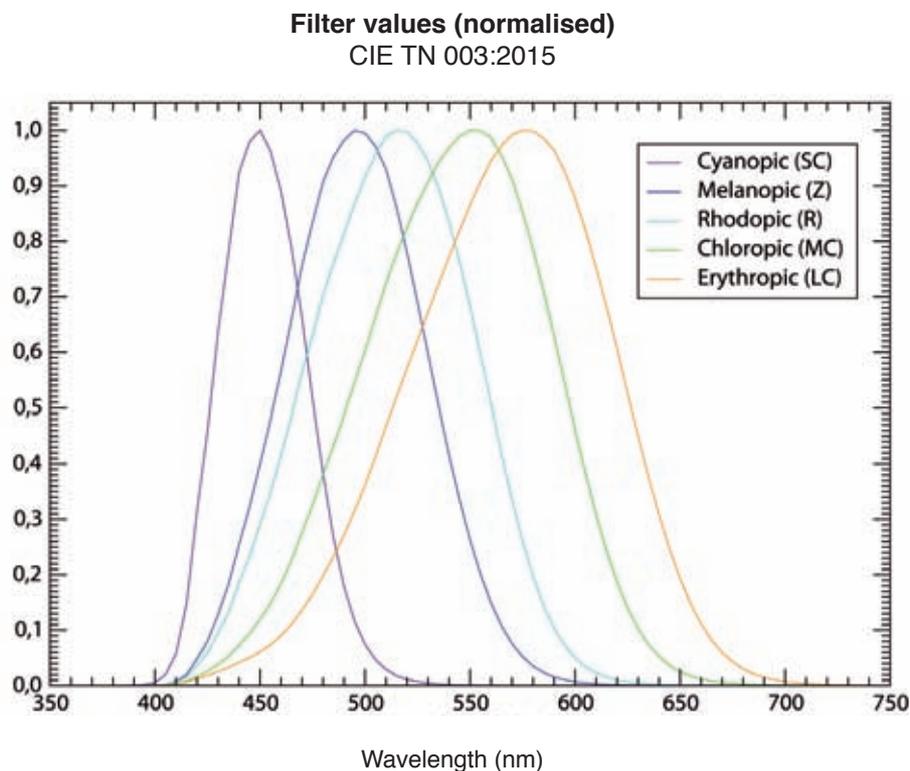


Figura 4. Curvas normalizadas de sensibilidad espectral de los cinco fotorreceptores humanos, tras aplicar la función de transmitancia pre-receptoral $\tau(\lambda)$ (véase anexo A de CIE TN 003:2015).

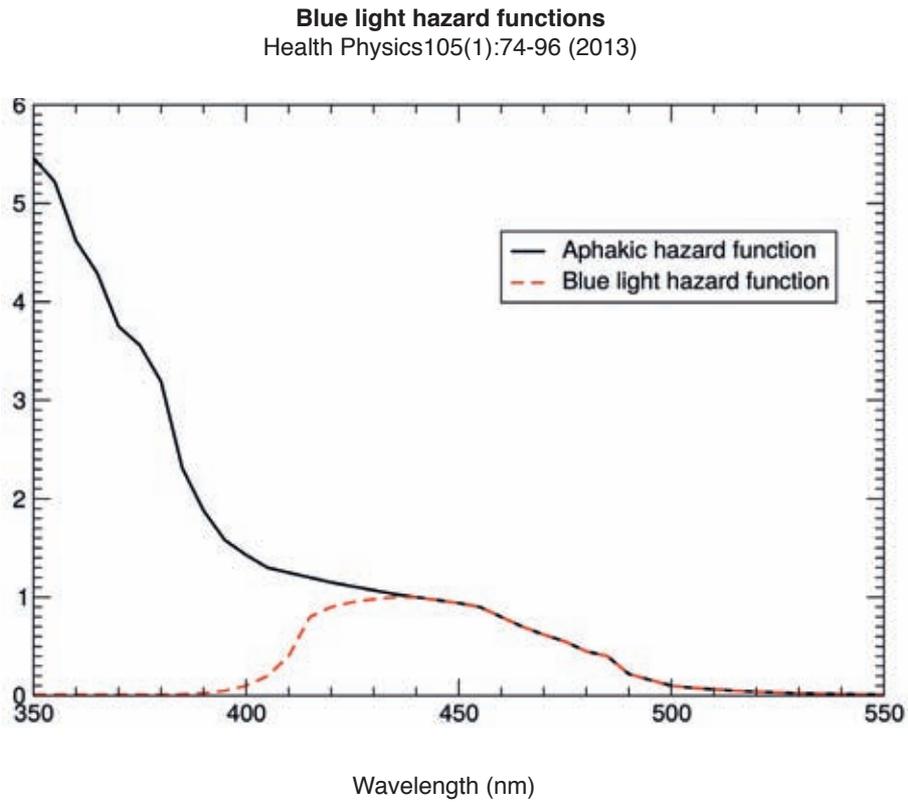


Figura 5. Curvas de acción denominadas *blue light hazard function* (B) y *aphakic hazard function* (A), de «ICNIRP Guidelines on Limits of Exposure to Incoherent Visible and Infrared Radiation» (Health Physics 105(1): 74-96; 2013). Obsérvese la normalización anómala de la curva A.

3.5.2. Filtros de paso

Otros filtros de interés son los que pueden definirse mediante funciones escalón, en particular los filtros que dejan pasar tan solo longitudes de onda bajas. Un filtro de este tipo se puede denotar como L_{λ_0} , donde λ_0 es una

longitud de onda por debajo de la cual pasa toda la radiación, y por encima de la cual no pasa ninguna. Como ejemplo, la figura siguiente ilustra el filtro L_{500} . Quizá menos útiles, pero posibles en teoría, serían los filtros opuestos de paso-alta.

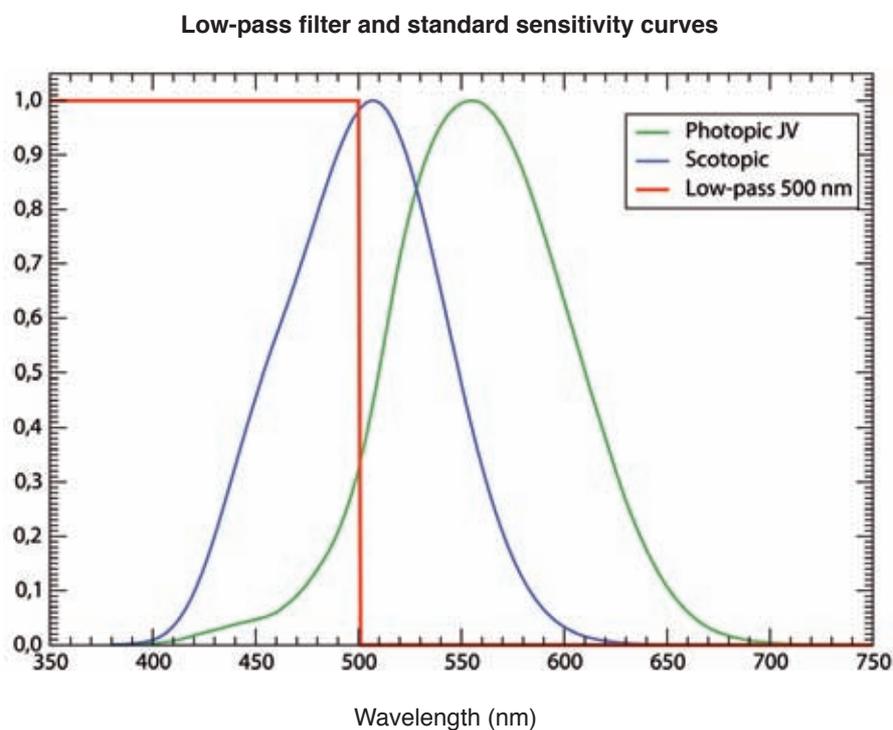


Figura 6. Se representa en rojo la función escalón correspondiente al filtro de paso baja L_{500} . Se superponen las curvas de sensibilidad fotópica y escotópica como referencia.

4. Índices espectrales

Ya disponemos de toda la información y las definiciones que necesitamos para proceder a definir los índices espectrales logarítmicos.

4.1. Definición

Un índice espectral no es más que el logaritmo decimal de un flujo relativo (apartado 3.3), afectado de un coeficiente multiplicativo igual a -2.5 (menos cinco medios). Si se considera el espectro E y los filtros 1 y 2, el índice espectral de ese espectro para esos filtros, $C_{1,2}(E)$, resultaría como sigue:

$$C_{1,2}(E) = -2.5 \log_{10} Q_{1,2}(E) = -2.5 \log_{10} \left(\frac{\Phi_{EF1}}{\Phi_{EF2}} \right) = -2.5 \log_{10} \frac{\varphi_1 \int F_1(\lambda) E(\lambda) d\lambda}{\varphi_2 \int F_2(\lambda) E(\lambda) d\lambda} = \dots$$

$$\dots = -2.5 \log_{10} \frac{\varphi_1}{\varphi_2} - 2.5 \log_{10} \int F_1(\lambda) E(\lambda) d\lambda + 2.5 \log_{10} \int F_2(\lambda) E(\lambda) d\lambda$$

Si se tiene en cuenta que normalmente trabajaremos con filtros normalizados, el primer término se anula y queda tan solo:

$$C_{1,2}(E) = -2.5 \log_{10} \int F_1(\lambda) E(\lambda) d\lambda + 2.5 \log_{10} \int F_2(\lambda) E(\lambda) d\lambda$$

Cada uno de los términos del segundo miembro recibe un nombre tradicional en fotometría astronómica: *magnitud instrumental de la fuente E en el filtro F*, $m_f(E)$. Por tanto, suele decirse que un índice espectral es una diferencia de magnitudes instrumentales:

$$C_{1,2}(E) = m_1(E) - m_2(E)$$

La magnitud instrumental no es más que -2.5 veces el logaritmo decimal del flujo filtrado (apartado 3.1) de la fuente,.

$$m_f(E) = -2.5 \log_{10} \int F(\lambda) E(\lambda) d\lambda$$

Reparemos en que, como consecuencia del signo negativo introducido en la definición de magnitud instrumental con el factor -2.5, cuanto *mayor* sea la cantidad de radiación, *menor* resultará el valor numérico de la magnitud instrumental asociada.

Cuando el filtro es el bolométrico (es decir, ausencia de filtro) resulta la magnitud bolométrica instrumental, que representa la emisión total de la lámpara a todo lo ancho del espectro:

$$m_{bol}(E) = -2.5 \log_{10} \int E(\lambda) d\lambda$$

Siempre que se combinan dos filtros para calcular un índice espectral, se adopta el convenio de colocar primero (filtro 1) el más azul, y en segundo lugar (afectado del signo menos, filtro 2) el más rojo. Se puede comprobar que, con este convenio, los índices de color de valores más elevados corresponden a fuentes más rojas, mientras que los índices de color de valores más pequeños (incluso negativos) describen fuentes más azules.

Por supuesto, tanto la elección de logaritmos decimales (en lugar de naturales, o en cualquier otra base) como el coeficiente -2.5 (valor concreto y, sobre todo, su signo) son de carácter muy arbitrario, pero parece muy recomendable mantener las mismas convenciones, con el fin de conservar la unidad con todo el trabajo fotométrico realizado en astronomía, y muy en particular (para el campo que nos ocupa) con toda la tradición metrológica en brillo del cielo nocturno, que emplea de manera universal todos estos convenios.

4.2. Del índice espectral al cociente de flujos

Los índices de color así definidos pueden calcularse para cualquier espectro y cualquier par de filtros. El carácter logarítmico simplifica la comparación de datos al convertir los productos y cocientes en simples sumas y restas, de ahí que incluso las tablas en las que el CIE define las curvas de sensibilidad en CIE TN 003:2015 vengan en formato logarítmico (véanse las notas explicativas del anexo A de esa publicación para entender las ventajas de este enfoque).

Dado que un índice espectral es una diferencia de logaritmos, representa en el fondo un cociente de cantidades, un cociente de flujos filtrados, y el paso de una forma a otra es muy sencillo:

$$Q_{1,2}(E) = \frac{\Phi_{E,F1}}{\Phi_{E,F2}} = 10^{-C_{1,2}(E)/2.5}$$

4.3. Casos particulares de especial interés

Ya estamos en condiciones de considerar ejemplos concretos de índices espectrales, eligiendo por ello pares concretos de filtros o curvas de sensibilidad espectral. Veamos varios casos de especial interés.

4.3.1. Índices bolométricos

Un caso de interés obvio es aquel en el que el segundo filtro es el bolométrico, es decir, se integra toda la emisión del

espectro. El índice espectral resultante dará una medida de cuánta luz (o radiación) se emite en la banda del filtro 1, en comparación con la radiación emitida a lo ancho de todo el espectro. En el apartado 3.4 hemos tratado la eficacia luminosa como un caso particular, aunque introduciendo un coeficiente de acción distinto a la unidad. En general, para filtros arbitrarios y al menos de entrada, emplearemos filtros normalizados a máxima unidad, con constante de acción $\phi = 1$. El índice espectral bolométrico de la fuente E en el filtro F será, pues:

$$C_{F,\text{bol}}(E) = m_F(E) - m_{\text{bol}}(E)$$

En estas condiciones es evidente que *siempre* habrá más luz en el segundo filtro (bolométrico, lo incluye todo) que en el primero (incluye solo una parte de la energía emitida) y, por tanto, la magnitud instrumental bolométrica m_B será menor que la magnitud instrumental filtrada m_F (a más luz menor magnitud instrumental, debido al valor negativo de la constante -2.5). En consecuencia, *todos los índices de color bolométricos serán siempre positivos*.

Manos a la obra: tomemos el espectro de la lámpara LED PC ámbar que se representa en naranja en la figura 2, y calculemos su índice espectral bolométrico para la curva de sensibilidad visual fotópica estándar (en verde en las figuras 3 y 5). El resultado es el siguiente:

$$C_{V,\text{bol}}(\text{PC ámbar}) = 0.721$$

Podemos pasar trivialmente a cociente de flujos y deducir que, en este caso:

O, dicho de otro modo, algo más de mitad de la energía del espectro atraviesa de manera efectiva el filtro fotópico. Una fuente que emita justo la mitad de su flujo dentro de un filtro cualquiera tendrá siempre un índice espectral bolométrico, en ese filtro, igual a $-2.5 \log_{10}(0.5) = 0.753$. La máxima eficacia correspondería a un emisor monocromático en la longitud de onda en la que el filtro alcanza el máximo. En ese caso el índice espectral sería nulo. Cuanto menor sea el índice espectral bolométrico (cuanto más parecido a cero), mayor es la eficacia de la fuente emisora para el filtro considerado.

$$Q_{V,\text{bol}}(\text{PC ámbar}) = \frac{\Phi_{\text{PC ámbar},V}}{\Phi_{\text{PC ámbar},\text{bol}}} = 0.515$$

4.3.2. Índices bolométricos para filtros de paso baja

Un filtro definido como función escalón, tal como el L_{500} representado en rojo en la figura 5, puede ser útil para valorar la cantidad de energía emitida por una lámpara por debajo de cierta longitud de onda. Ya existen normativas que establecen restricciones al uso de ciertas lámparas sobre la base de filtros de ese estilo. Por ejemplo, el reglamento andaluz (decreto 357/2010 de 3 de agosto) fue modificado a través del decreto 6/2012 de 17 de enero de manera que en su artículo 13.a establecía:

En zonas E1 y E2 colindantes con E1 las lámparas deben evitar en lo posible la emisión en la banda de longitudes de onda corta del espectro visible, concentrando la luz mayoritariamente en longitudes de onda superiores a 525 nm. La distribución espectral de la luz emitida por las lámparas ha de ser tal que la suma de las radiancias espectrales para todas las longitudes de onda menores de 440 nm sea inferior al 15% de su radiancia total. En el caso de emplearse leds, la suma de las radiancias espectrales para todas las longitudes de onda menores de 500 nm será inferior al 15% de su radiancia total.

Como vemos, el decreto andaluz establecía criterios numéricos que pueden expresarse en términos de índices espectrales bolométricos, dado que compara la luz emitida en ciertas bandas (por encima o por debajo de longitudes de onda concretas, por tanto se trata de filtros con forma de función escalón) con la emisión total en el espectro (filtro bolométrico, o ausencia de filtro). Aparecen tres criterios en el párrafo citado. Véamoslos uno a uno.

En primer lugar, se establece que en determinadas zonas la luz debe emitirse *mayoritariamente* por encima de 525 nm. Debemos considerar, por tanto, el filtro de paso-baja L_{525} , y la condición es que el cociente entre el flujo en ese filtro y el flujo bolométrico sea inferior a la mitad del total:

$$Q_{L_{525},\text{bol}}(E) = \frac{\Phi_{E,L_{525}}}{\Phi_{E,\text{bol}}} < \frac{1}{2}$$

En términos de índice espectral, el requisito puede expresarse como que el índice espectral bolométrico para el filtro de paso-baja L_{525} adopte un valor numérico mayor que $-2.5 \log_{10}(0.5) = 0.753$:

$$C_{L_{525},\text{bol}}(E) > 0.753$$

Podemos aplicar estos criterios a algunos espectros concretos: los de las dos lámparas (PC ámbar y halogenuros metálicos) de la figura 2 y algunos de los cuerpos negros que se representan en las figuras 7 y 8.

Los resultados son:

Lámpara	$C_{L525,bol}$
PC ámbar	5.326
Halogenuros metálicos	1.339
Cuerpo negro 2400 K	6.183
Cuerpo negro 6000 K	1.279

Tabla 4. Índice espectral $C_{L525,bol}$ para cuatro espectros seleccionados.

Donde, como a lo largo de todo el texto, el punto es el marcador de decimales, no de millares. Como vemos este requisito bolométrico no resulta especialmente restrictivo y todas las fuentes de luz consideradas en la tabla lo cumplen. Sin embargo, este requisito laxo se complementa con otros dos adicionales y más restrictivos. Para lámparas que no sean de tecnología LED, se establece:

Veamos los índices espectrales bolométricos de las mismas fuentes de luz para este filtro:

Lámpara	$C_{L440,bol}$
PC ámbar	6.424
Halogenuros metálicos	2.578
Cuerpo negro 2400 K	8.047
Cuerpo negro 6000 K	1.787

Tabla 5. Índice espectral $C_{L440,bol}$ para cuatro espectros seleccionados.

Este criterio no rige para el PC ámbar, al ser de tecnología LED, pero se ha consignado su índice espectral a efectos

de comparación. Como vemos, la lámpara de halogenuros metálicos concreta sometida al cálculo cumple el criterio y su índice espectral indica que emite por debajo de 440 nm un 9.3% de la radiación (su estudio fotométrico indica para esta lámpara una CCT de 3800 K). De las cuatro fuentes de la tabla, solo el cuerpo negro de 6000 K no cumpliría, al emitir por debajo de 440 nm nada menos que el 19.3% de la radiación total (¡incluyendo hasta el infrarrojo en el cálculo!).

Para el caso de la tecnología LED la norma adopta un filtro de paso-baja diferente, el L_{500} :

Apliquemos el criterio a los espectros anteriores:

Lámpara	$C_{L500,bol}$
PC ámbar	5.662
Halogenuros metálicos	1.652
Cuerpo negro 2400 K	6.657
Cuerpo negro 6000 K	1.405

Tabla 6. Índice espectral $C_{L500,bol}$ para cuatro espectros seleccionados.

Observamos que en este caso la lámpara de halogenuros metálicos se beneficia, frente a la tecnología LED, de un criterio que la hace aceptable con un filtro, pero inadecuada con el otro. Indiquemos de todos modos que el PC ámbar supera la prueba de manera amplísima. La lámpara de halogenuros emite el 21.8% por debajo de 500 nm, mientras que el cuerpo negro de 6000 K alcanza el 27.4%.

Estos criterios han sido objeto de crítica por su carácter bolométrico, es decir, porque comparan la radiación emitida en el filtro de interés (en este caso, filtros de paso-baja) con toda la radiación emitida por la lámpara, con independencia de su eficacia lumínica, es decir, considerando incluso las emisiones en el infrarrojo, carentes de eficacia lumínica. Por eso cabe plantearse la aplicación de índices espectrales no bolométricos, lo que tratamos en el apartado siguiente.

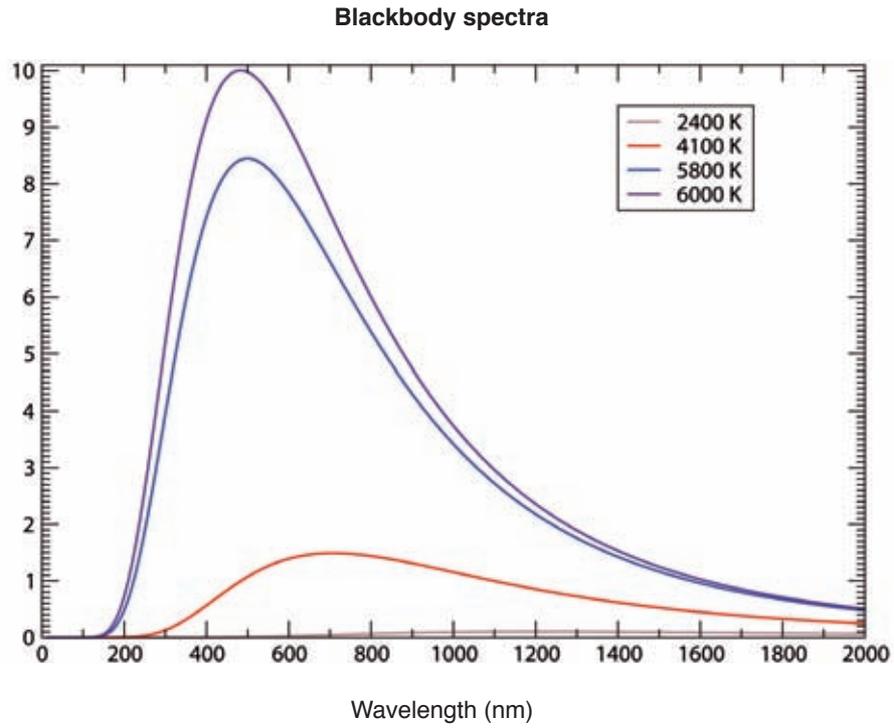


Figura 7. Espectros de cuatro cuerpos negros con diferentes temperaturas.

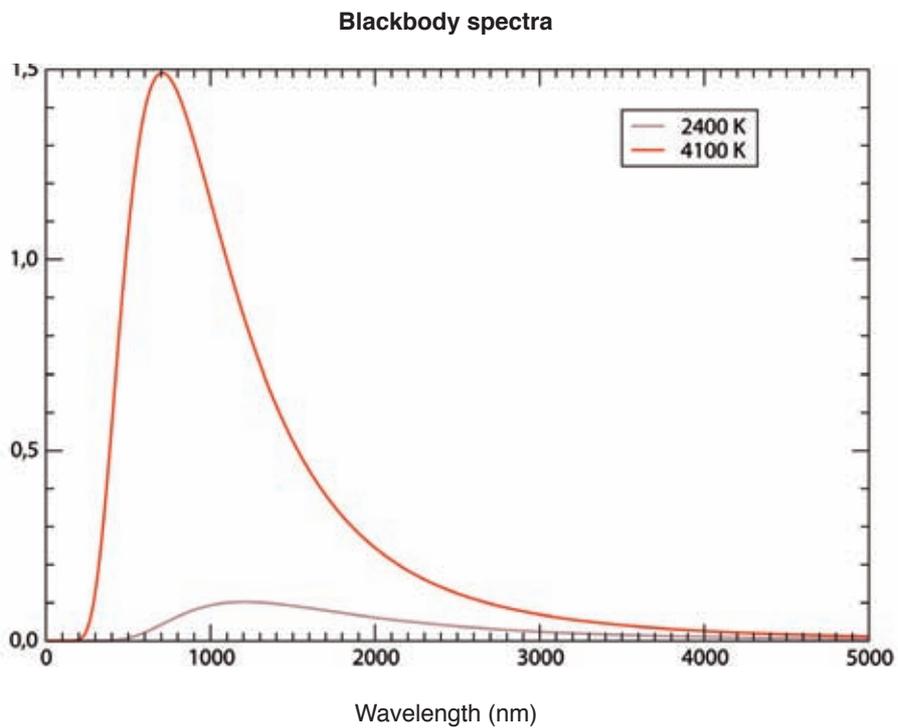


Figura 8. Ampliación de la figura anterior, para destacar los detalles de los dos cuerpos negros de temperaturas menores.

4.3.3. Índices espectrales genéricos para filtros de paso-baja

Si se plantea comparar un filtro de paso-baja con una banda concreta, y no con todo el espectro, obviamente es necesario escoger la banda de referencia. No hay (por el momento) ninguna normativa planteada en estos términos, pero una opción bastante obvia la ofrecería la curva de sensibilidad espectral fotópica estándar, $V(\lambda)$. Esta curva tiene su longitud de onda central en 555 nm, mientras que un filtro de paso-baja L_x la tendría en $x/2$, por tanto las longitudes de onda centrales de los filtros que estamos considerando están, en 263, 250 y 220 nm, respectivamente, para L_{525} , L_{500} y L_{440} . Por tanto todos los filtros de paso-baja son más «azules» que la curva fotópica y, de acuerdo con la convención indicada al definir los índices espectrales, en todos los casos el filtro fotópico debe ser el segundo (F_2) al efectuar los cálculos. Los resultados constan en la tabla 7.

Salta a la vista el cambio de valoración del cuerpo negro a 2400 K, que puede tomarse como un buen análogo de las lámparas incandescentes tradicionales. Vemos que los valores enormes (tan rojos) de sus índices espectrales bolométricos (tablas 3, 4, 5) se deben en buena medida a su abundante emisión infrarroja, pero que cuando se tiene en cuenta solo la parte de su emisión con eficacia visual los

índices espectrales se reducen hasta valores que empiezan a ser comparables con los de las lámparas de halogenuros metálicos. También se constata que, al no incluir en los cálculos la emisión infrarroja, el PC ámbar supera en todos los casos, y con mucha diferencia, los índices espectrales del cuerpo negro de 2400 K.

Los halogenuros aparecen como fuentes más «azules» que antes, con esta combinación de filtros. De nuevo se trata de una consecuencia de suprimir del cálculo sus emisiones en longitudes de onda largas.

El cambio más significativo es el del cuerpo negro más caliente, que ahora muestra índices espectrales negativos, lo cual quiere decir que, de los dos filtros considerados, emite más luz en el primero, en el más azul. Al eliminar toda su emisión infrarroja se pone de manifiesto la enorme cantidad de luz azul, e incluso ultravioleta, que produce un cuerpo negro de 6000 K, en comparación con la luz visible que proporciona. Si se traduce el índice espectral a porcentaje de luz en cada filtro, para el cuerpo negro de 6000 K se deduce que el cociente entre paso-baja y luz visible asciende al 223%, 199% y 140%, respectivamente, para los filtros L_{525} , L_{500} y L_{440} , siempre respecto de la curva de sensibilidad fotópica del ojo humano.

Lámpara	$C_{L_{525},V}$	$C_{L_{500},V}$	$C_{L_{440},V}$
PC ámbar	4.605	4.941	5.703
Halogenuros metálicos	0.520	0.833	1.759
Cuerpo negro 2400 K	1.087	1.561	2.951
Cuerpo negro 6000 K	-0.870	-0.744	-0.362

Tabla 7. Índices espectrales $C_{L_x,V}$ para cuatro espectros seleccionados y cuatro valores de longitud de onda de corte ($x = 525$ nm, 500 nm y 440 nm).

5. Otros ejemplos prácticos

La flexibilidad del sistema de índices espectrales es enorme, dado que admite introducir filtros arbitrarios. En la tabla 3 se han descrito sucintamente las curvas de sensibilidad correspondientes a los fotorreceptores humanos. Cabría definir índices espectrales para esas bandas. Consideremos, por ejemplo, la banda melanópica, Z , relacionada con el pigmento de las células ganglionares fotosensibles y, por tanto, vinculado a la regulación de los ritmos circadianos. Vamos a comparar esta banda Z con la curva fotópica estándar V . Como la curva melanópica tiene su longitud de onda central en 495 nm, es la más azul de las dos y por tanto le corresponde en las fórmulas la consideración de filtro F_1 . Definimos por tanto el índice espectral melanópico-fotópico, que también podría notarse como $C_{Z,V}(E)$ o, usando una simplificación de la notación muy habitual en fotometría astronómica, como $Z-V$ sin más. Para las cuatro fuentes que estamos considerando, más los cuerpos negros a 5800 K (que reproduciría el espectro solar) y a 4100 K (cercano a la luz de la Luna), obtenemos:

Lámpara	$C_{Z,V}$
PC ámbar	2.937
Halogenuros metálicos	0.787
Cuerpo negro 2400 K (incandescente)	1.091
Cuerpo negro 4100 K (Luna)	0.489
Cuerpo negro 5800 K (Sol)	0.247
Cuerpo negro 6000 K	0.228

Tabla 8. Índice espectral melanópico-fotópico para seis espectros seleccionados.

Todas las fuentes consideradas en la tabla 8 emiten más energía en la segunda banda (fotópica) que en la primera (melanópica), dado que los resultados son siempre positivos, aunque el cuerpo negro de 6000 K es el que más se acerca a la igualdad de emisión, que se habría alcanzado en el índice espectral nulo.

Una de las ventajas del sistema de índices espectrales radica en la facilidad con que permite establecer comparaciones entre distintos tipos de lámparas. Los números que constan en la tabla 8 comparan cada espectro consigo mismo, pero cabe preguntarse en qué medida la proporción melanópica-fotópica de una lámpara es mayor que la de otra. Para ello basta calcular la diferencia de índices espectrales. Por ejemplo, si tomamos como referencia la lámpara incandescente, representada en nuestro caso por el cuerpo negro a 2400 K, podemos restar su índice espectral al de la lámpara PC ámbar para obtener $2.937 - 1.091 = 1.846$. Tal sería el índice espectral del PC ámbar si se tomara como referencia la lámpara incandescente o, dicho de otro modo, el PC ámbar es 1.846 magnitudes más rojo que la incandescente, para este par de filtros. En términos de cocientes, esto implica que el cociente Z/V es un 18% menor en el caso del PC ámbar que en el caso incandescente, porque diez elevado a $-1.846/2.5$ es 0.183.

Podemos hacer la misma comparación entre el cuerpo negro de 6000 K y la lámpara incandescente: $0.228 - 1.091 = -0.863$. El resultado negativo indica que el cuerpo negro es más azul (casi una magnitud más azul) que la incandescente, y que su cociente Z/V es mayor que el de la incandescente en un factor equivalente a 2.21, es decir, un 221%.

6. Aplicación a un conjunto de espectros

Para los fines de este grupo de trabajo se ha dispuesto hasta ahora de un conjunto de espectros proporcionados por Manuel García Gil (Generalitat de Catalunya, Servei per a la Prevenció de la Contaminació Lumínica), Mar Gandolfo de Luque (Comité Español de Iluminación-Philips), Javier Díaz de Castro (Instituto de Astrofísica de Canarias), Laura Guzmán Varo (Comité Español de Iluminación-Light Environment Control) y Ramon Llorens (SACOPA-IgniaLight). Estos datos no son de libre distribución y se han cedido para los fines exclusivos de este trabajo. También se ha recurrido a una serie de espectros descargados de la base de datos pública LSPDD: Light Spectral Power Distribution Database (www.lspdd.com/).

Este conjunto de datos tiene la ventaja de cubrir distintas tecnologías de alumbrado, observadas además con espectrómetros de características diferentes, tanto desde el punto de vista de la cobertura espectral como de la resolución.

Solo como modo de ilustración se han calculado, para cada espectro disponible, los índices espectrales siguientes:

1. Fotópico-bolométrico. $C_{V,bol}$. Mide qué cantidad de la energía espectral se emite de manera efectiva dentro de la banda útil desde el punto de vista luminotécnico, en con-

diciones fotópicas. Es una buena medida del rendimiento lumínico de la lámpara, y si se dispusiera del rendimiento de cada lámpara (en lúmenes por vatio emitido, por ejemplo) sin duda se observaría una correlación muy buena.

2. Paso baja 500 nm – fotópico. $C_{L500,V}$. Compara la cantidad de energía emitida por debajo de 500 nm con la cantidad de energía emitida dentro de la banda fotópica útil para iluminación.
3. Melanópico-fotópico. $C_{z,V}$. Compara la luz emitida en el rango de sensibilidad circadiana con la luz útil en condiciones fotópicas. Puede decirse que un valor elevado de este índice espectral apunta a menor afectación circadiana.
4. Paso baja 500 nm – bolométrico. $C_{L500,bol}$. Compara la energía emitida por debajo de 500 nm con el total. Como se ha comentado más arriba, sigue la filosofía de la normativa andaluza actual (copiada de criterios de Canarias), aunque caben dudas acerca de la pertinencia de plantear la comparación en términos bolométricos.
5. Blue hazard – fotópico $C_{B,V}$ y aphakic – fotópico $C_{A,V}$.

Estos datos se ofrecen en las tablas finales de este documento tanto en forma de índice espectral C como en forma de cociente Q , de manera que $C = -2.5 \log_{10} Q$.

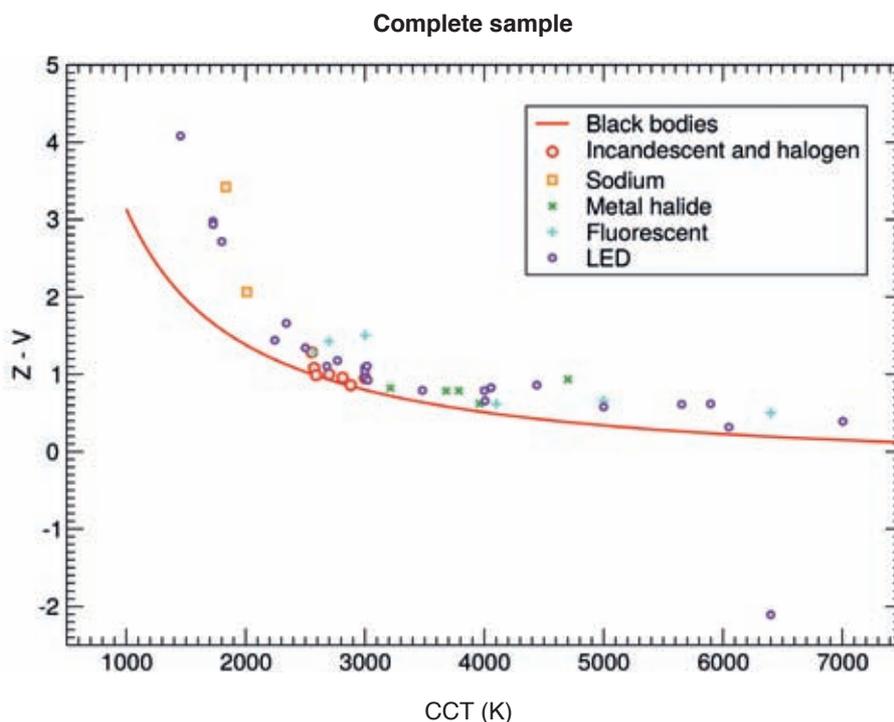


Figura 9. Índice espectral $Z-V$ melanópico-fotópico (una medida de la sensibilidad circadiana comparada con la eficacia luminosa, cuanto más arriba, menos sensibilidad circadiana) comparado con la temperatura de color correlacionada CCT.

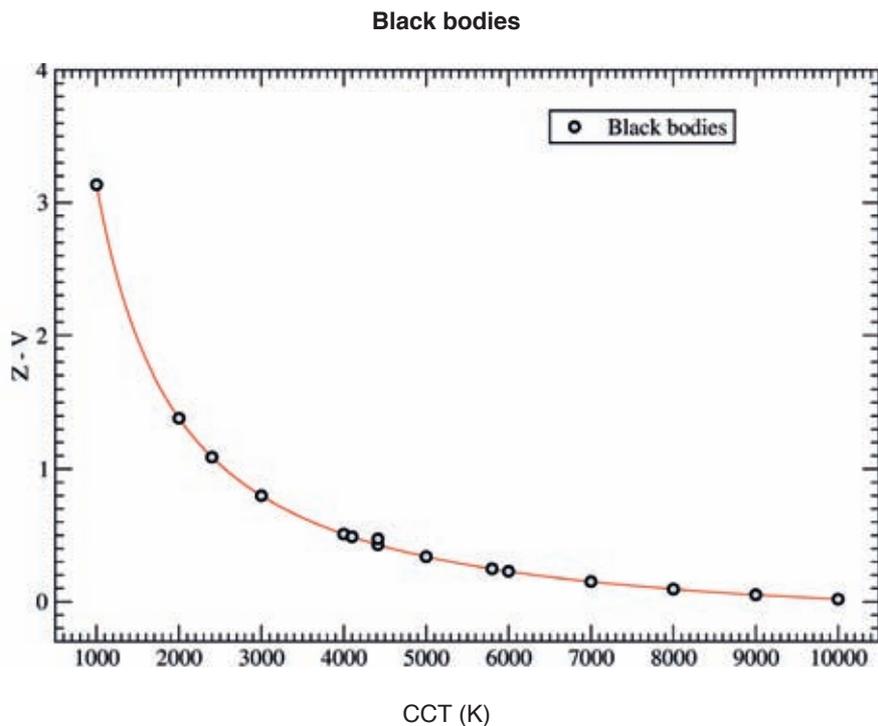


Figura 10. Índice Z-V frente a temperatura de color correlacionada CCT, para cuerpos negros y fuentes de luz asimilables.

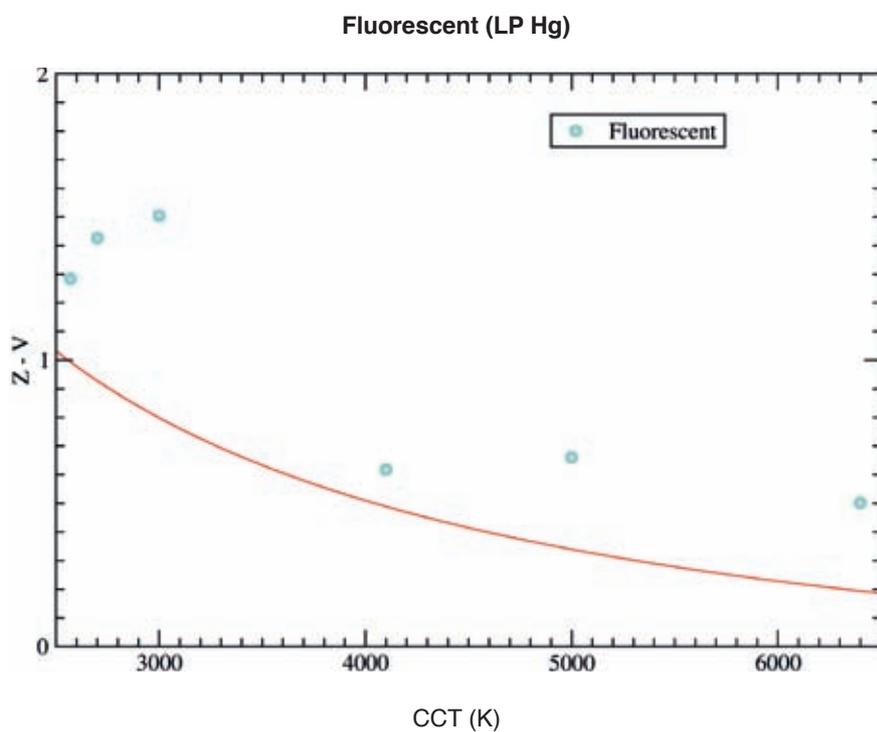


Figura 11. Índice Z-V frente a temperatura de color correlacionada CCT, para lámparas fluorescentes. Se aprecia la gran dispersión de la relación. En esta figura y en las siguientes, la línea roja continua representa la relación para cuerpos negros teóricos.

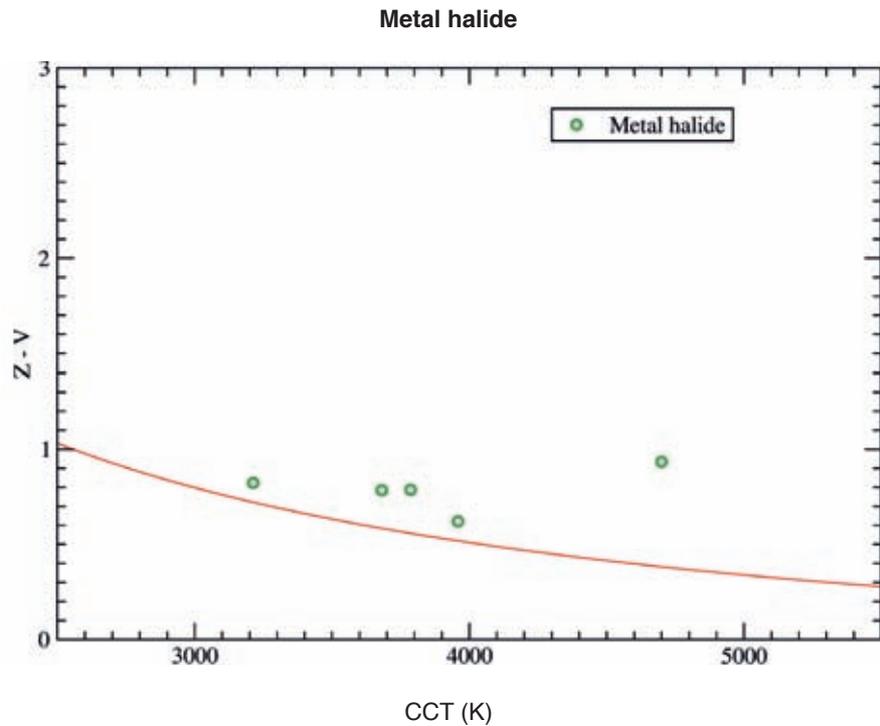


Figura 12. Índice Z-V frente a CCT para lámparas de halogenuros metálicos. La mala correlación entre el índice y la temperatura de color es especialmente llamativa en esta tecnología, al menos para las lámparas estudiadas.

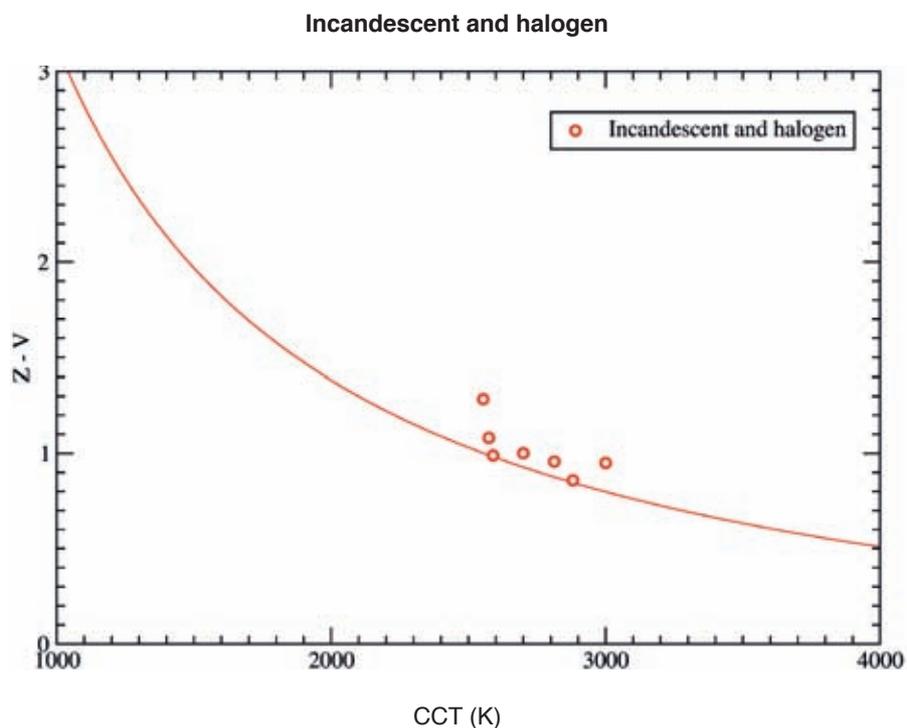


Figura 13. Índice Z-V frente a CCT para lámparas incandescentes y halógenas. Aunque las lámparas incandescentes puede asimilarse, al menos en teoría, a cuerpos negros, su comportamiento espectral a menudo es más rojo de lo esperado, probablemente debido a la absorción de ciertas longitudes de onda azules en la cápsula de vidrio de la lámpara.

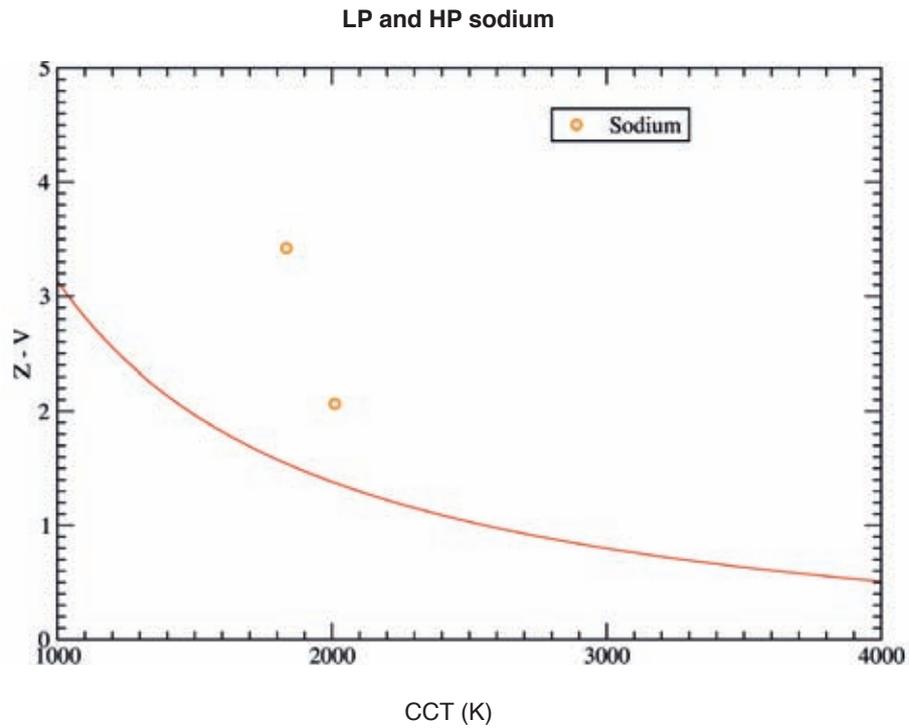


Figura 14. Índice Z-V frente a CCT para dos lámparas de sodio: baja presión (punto superior) y alta presión (punto inferior). Obsérvese cuánto se apartan estas lámparas de las ubicaciones que cabría esperar si se comportaran como cuerpos negros (línea continua). Por tanto, la valoración de sus propiedades espectrales por medio de la CCT infraestima mucho sus virtudes, desde el punto de vista de la eliminación de la luz azul.

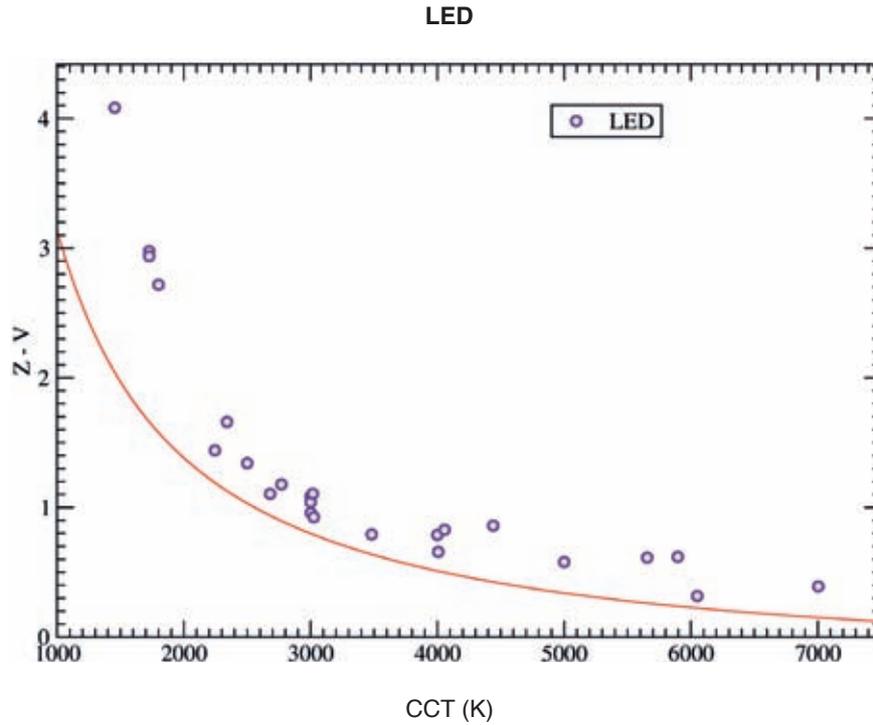


Figura 15. Índice Z-V frente a CCT para las lámparas de tecnología LED estudiadas. Las más rojas se apartan de la curva de cuerpos negros, siempre en el sentido de presentar características espectrales mejores (más rojas) que los cuerpos negros con la misma CCT.

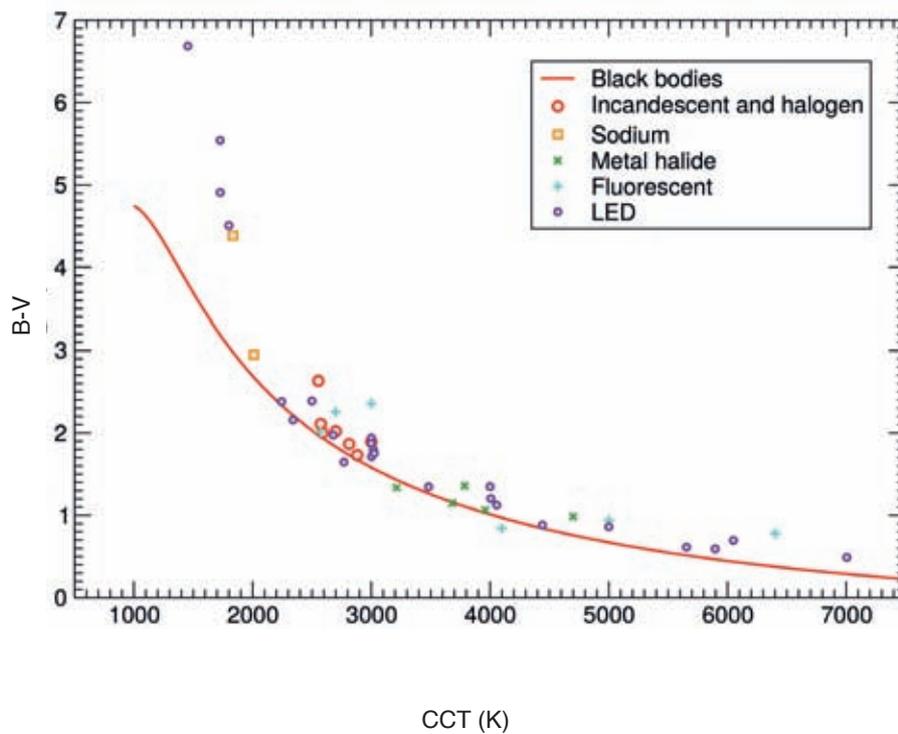


Figura 18. Índice B-V (blue-hazard - fotópico) frente a CCT. La correlación es mejor que con Z-V, aunque la dispersión sigue siendo muy considerable, y la diferencia con el comportamiento de los cuerpos negros es enorme para las fuentes de luz artificiales más rojas (CCT < 2000 K). A diferencia de Z-V, ahora hay algunas lámparas más azules que los cuerpos negros. Ahora hay lámparas LED más rojas, incluso, que el sodio a baja presión (LED ámbar puro, LED PC ámbar, y LED 1800 K).

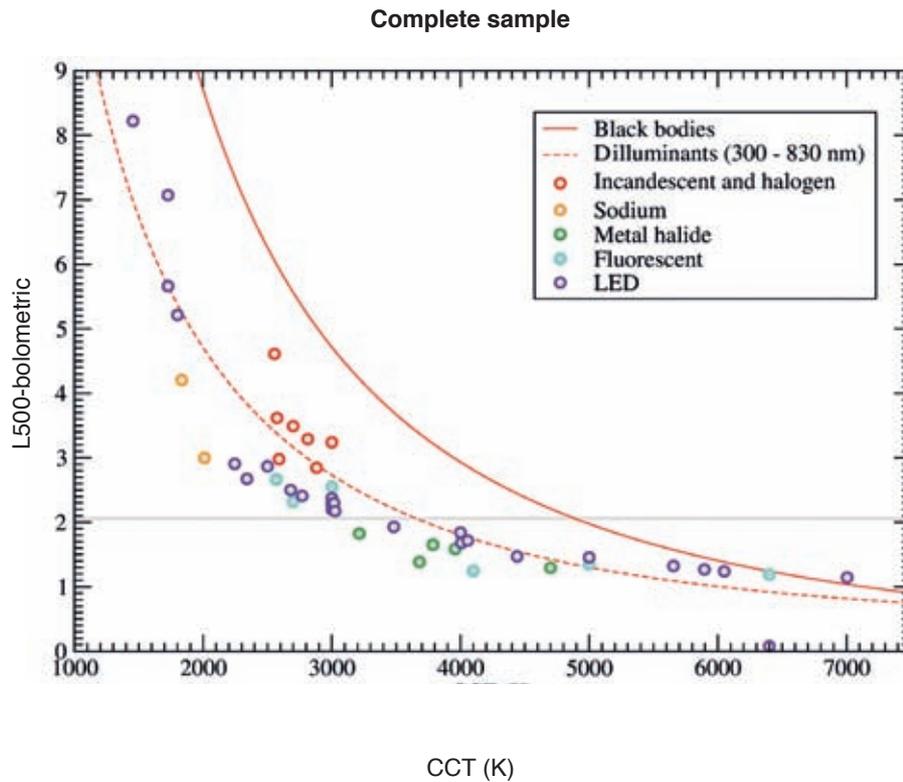


Figura 19. Índice L_{500} -bolom (compara la luz emitida por debajo de 500 nm con el total de la emisión del espectro de la lámpara) frente a CCT. La línea continua traza los cuerpos negros no truncados, «más rojos» que la mayoría de las lámparas porque en los cálculos se incluye toda su emisión infrarroja. Pero las lámparas no suelen emitir tanto en el infrarrojo o, aunque lo hagan, esa emisión no suele constar en los espectros empíricos. Por eso es más justo compararlas con la secuencia de cuerpos negros truncados al intervalo de los iluminantes estándar CIE (línea discontinua). Línea horizontal: umbral del 15% de emisión por debajo de 500 nm comparada con la energía total emitida por la fuente (índice igual a 2.06).

El índice que compara la luz más azul que 500 nm con el total de emisión de la lámpara, $C_{L500,bol}$, es el que sigue la filosofía de la normativa andaluza y del IAC (la normativa catalana actual sigue criterios parecidos pero algo matizados, y que también se podrían traducir fácilmente al lenguaje de los índices espectrales). Normalmente estos criterios establecen que la luz emitida por debajo de cierta longitud de onda debe ser inferior al 15% del total. Esto significa que el cociente $Q_{L500,bol}$ debe ser menor o igual que 0.15. Por tanto, en términos de índice espectral, los que tenemos es que el índice $C_{L500,bol}$ debe ser **mayor o igual que 2.06**. En la tabla

se han señalado en verde las fuentes de luz que cumplirían con este criterio.

La crítica habitual a esta filosofía consiste en que al comparar con toda la radiación emitida, se favorece de manera injusta, podríamos decir también que inadvertida, las lámparas que tienen una gran emisión en rojo y el infrarrojo, como las incandescentes. Este defecto del criterio queda superado si en lugar del índice L_{500} -bolométrico se toma el L_{500} -V, es decir, si la emisión azul se compara no con el total, sino solo con la emisión eficaz desde el punto de vista lumínico, en condiciones fotópicas.

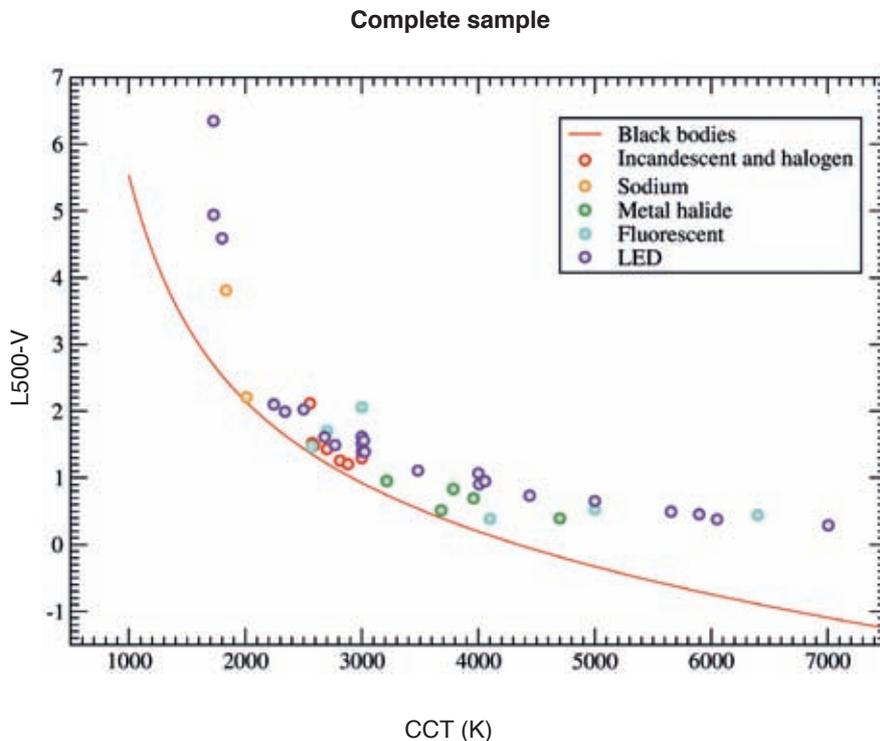


Figura 20. Cuando el flujo emitido por debajo de 500 nm se compara no con toda la energía radiada, sino solo con la que resulta eficaz desde el punto de vista luminoso (banda fotópica) resulta el índice L_{500} -V, en el que todas las fuentes de luz analizadas resultan más rojas que los cuerpos negros de la misma temperatura. La dispersión de la relación entre este índice y la temperatura de color correlacionada es considerable, sobre todo en el intervalo de temperaturas de color más habituales (de 2000 a 4000 K).

Pero al cambiar la banda espectral de comparación hay que alterar también el porcentaje de flujo permitido. Al observar en la tabla lámparas que evidentemente son de buenas características por su baja emisión en el azul, se ve que para el nuevo índice $L_{500}-V$ un umbral razonable sería exigir que la luz azul no rebase el 30% de la luz emitida en el rango fotópico. Aproximadamente, se permitiría emitir una cantidad de luz azul del orden de un tercio de la luz fotópicamente eficaz. Esto conduce a un valor del índice $C_{L500,V}$ **mayor o igual que 1.31**.

Advertimos que estos números se plantean aquí solo a efectos de ilustración del método, y que si se implementaran finalmente criterios basados en esta propuesta, sin duda habría que refinar los umbrales y basar las decisiones en criterios bien justificados. Con esa advertencia, si se observa la tabla, donde se han marcado en verde los espectros que superarían el criterio del 30%, empezamos a comprobar algunos aspectos interesantes:

- Como cabría esperar, la mayoría de lámparas que superan el criterio bolométrico del 15% (índice bolométrico mayor o igual que 2.060) superan también el criterio fotópico del 30% (índice fotópico mayor o igual que 1.31).
- Sin embargo, las lámparas de mayor emisión infrarroja, que antes superaban ampliamente el criterio bolométrico, ahora tienen más dificultades y quedan peor clasificadas. Véanse, por ejemplo, los casos de los espectros de cuerpos negros en el entorno de 3000-4000 K, así como algunas lámparas incandescentes y halógenas. Hay que indicar que, si los espectros de partida (datos disponibles) incluyeran más intervalo de medidas hacia el infrarrojo, el resultado habría sido aún más claro, y que probablemente habría otros espectros que también habrían quedado excluidos.
- También puede darse el caso contrario, aunque en la tabla que presentamos ahora no se haya registrado ninguno: puede haber lámparas que antes quedarán excluidas pero que con el criterio fotópico del 30% den un índice espectral mayor que 1.31 y, por tanto, pasen a ser aceptables.
- Obsérvese que la relación entre la temperatura de color correlacionada y la medida numérica precisa de los índices espectrales dista mucho de ser perfecta, sobre todo para las fuentes de luz que más se apartan de espectros similares a cuerpos negros.

7. Efectos espectrales: esparcimiento de Rayleigh

Nos referimos con el nombre de *efecto* a modificaciones del espectro que no son del carácter atenuativo característico de los filtros. Los filtros (y, como caso particular de los mismos, las curvas de sensibilidad) atenúan el espectro de acuerdo con un cierto perfil funcional que se aplica como un producto, según una función que alcanza el valor máximo de 1. En contraste, un efecto espectral implica aplicar una función dependiente de la longitud de onda (o de la frecuencia) y que puede implicar, de manera general, operaciones matemáticas más complejas que un simple producto, así como valores funcionales superiores a la unidad.

Quizá se entienda mejor con un ejemplo, que además es el que se aplicará a cálculos reales más adelante: el esparcimiento de Rayleigh. El esparcimiento de Rayleigh (*Rayleigh scattering* en inglés) es el efecto físico dominante en la propagación de la luz a través de una atmósfera limpia (sin aerosoles). Como puede consultarse en multitud de libros de

óptica elemental, la intensidad de este efecto viene dada por la *sección eficaz de esparcimiento*, s , que es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda (o directamente proporcional a la cuarta potencia de la frecuencia). Así, la función que describe este efecto sería:

$$s(\lambda) = \frac{1}{\lambda^4}$$

Al combinar funciones de efecto de este estilo a los espectros de las lámparas, y combinarlos con los filtros que se considere oportuno, se pueden obtener índices espectrales que evalúen la intensidad de los efectos para luz artificial de diferentes tipos. Está en estudio un análisis más profundo de esta extensión del sistema de índices espectrales, que próximamente conducirá a un método cuantitativo de estimación del potencial de esparcimiento de la luz por efecto Rayleigh, basado en conceptos similares a los descritos aquí.



Tablas

Black bodies and related spectra													
	V - bolom		L ₅₀₀ - V		Z - V		L ₅₀₀ - bolom		B - V		A-V		CCT (K)
	Q	C	Q	C	Q	C	Q	C	Q	C	Q	C	
01. blackbody_1000	0.00000	16.55689	0.00612	5.53391	0.05570	3.13543	0.00000	22.09080	0.01266	4.74417	0.01271	4.73997	1000
02. blackbody_2000	0.00239	6.55552	0.13796	2.15063	0.28001	1.38208	0.00033	8.70615	0.08380	2.69194	0.11142	2.38257	2000
03. blackbody_2400	0.00914	5.09770	0.23777	1.55962	0.36651	1.08979	0.00217	6.65732	0.13877	2.14430	0.22495	1.61976	2400
04. blackbody_3000	0.03046	3.79083	0.42686	0.92427	0.47926	0.79856	0.01300	4.71511	0.23293	1.58195	0.51312	0.72446	3000
05. blackbody_4000	0.08053	2.73512	0.83423	0.19679	0.62531	0.50977	0.06718	2.93190	0.39337	1.01299	1.34749	-0.32381	4000
06. blackbody_4100	0.08532	2.67236	0.88104	0.13751	0.63749	0.48882	0.07517	2.80988	0.40876	0.97133	1.45428	-0.40662	4100
07. blackbody_4415	0.09931	2.50751	1.03569	-0.03808	0.67345	0.42924	0.10286	2.46943	0.45603	0.85252	1.81517	-0.64729	4415
08. Empirical solar spectrum from LSPDD	0.26151	1.45628	0.70553	0.37871	0.64702	0.47271	0.18450	1.83498	0.39452	1.00982	0.87242	0.14818	4415
09. blackbody_5000	0.11985	2.30341	1.35229	-0.32768	0.73161	0.33929	0.16207	1.97574	0.53840	0.67224	2.57146	-1.02545	5000
10. blackbody_5800	0.13596	2.16646	1.84904	-0.66737	0.79644	0.24712	0.25140	1.49910	0.63907	0.48614	3.73980	-1.43212	5800
11. blackbody_6000	0.13807	2.14977	1.98515	-0.74448	0.81046	0.22817	0.27408	1.40529	0.66211	0.44768	4.04846	-1.51822	6000
12. Standard illuminant CEID65	0.2265	1.6125	1.9258	-0.71156	0.84233	0.1863	0.4361	0.90095	0.7162	0.36243	4.83783	-1.71163	6500
13. blackbody_7000	0.14003	2.13441	2.74075	-1.09467	0.87024	0.15090	0.38380	1.03974	0.76554	0.29008	5.64162	-1.87851	7000
14. blackbody_8000	0.13276	2.19233	3.62853	-1.39933	0.91655	0.09461	0.48172	0.79300	0.85164	0.17436	7.24886	-2.15067	8000
15. blackbody_9000	0.12130	2.29032	4.65860	-1.67064	0.95314	0.05211	0.56510	0.61969	0.92351	0.08640	8.80525	-2.36185	9000
16. blackbody_9999	0.10862	2.41018	5.84016	-1.91606	0.98254	0.01912	0.63438	0.49412	0.98380	0.01773	10.27323	-2.52927	9999



Fluorescent (low pressure mercury)													
	V - bolom		L ₅₀₀ - V		Z - V		L ₅₀₀ - bolom		B - V		A-V		CCT (K)
	Q	C	Q	C	Q	C	Q	C	Q	C	Q	C	
17. <u>Fluorescent (Globe)</u>	0.33150	1.19880	0.25920	1.46590	0.30656	1.28370	0.08592	2.66470	0.15679	2.01168	0.27591	1.39807	2569
18. <u>Fluorescent (Sylvania)</u>	0.56592	0.61811	0.20870	1.70121	0.26882	1.42635	0.11811	2.31933	0.12504	2.25738	0.20902	1.69952	2700
19. <u>Fluorescent (Globe)</u>	0.63435	0.49418	0.15010	2.05902	0.25022	1.50418	0.09522	2.55320	0.11398	2.35797	0.13415	2.18104	3000
Fluorescent (Philips)	0.47951	0.79801	0.65566	0.45831	0.45020	0.86648	0.31439	1.25632	0.37141	1.07535	0.93131	0.07726	4033
Fluorescent (Philips)	0.48091	0.79485	0.64876	0.46978	0.50969	0.73173	0.31199	1.26463	0.40712	0.97571	0.68151	0.41632	4071
20. <u>Fluorescent (Elume)</u>	0.45228	0.86149	0.70175	0.38455	0.56617	0.61764	0.31738	1.24604	0.46055	0.84182	0.63088	0.50013	4100
21. <u>Fluorescent (Globe)</u>	0.46882	0.82248	0.61435	0.52895	0.54435	0.66031	0.28802	1.35144	0.42005	0.94176	0.63047	0.50083	5000
22. <u>Fluorescent (Tensor)</u>	0.50140	0.74953	0.66613	0.44111	0.62990	0.50181	0.33400	1.19064	0.48750	0.78007	0.53793	0.67319	6400

Note: Non-numbered light sources are not represented in the graphs, nor their spectra are provided.

Metal halide													
	V - bolom		L ₅₀₀ - V		Z - V		L ₅₀₀ - bolom		B - V		A-V		CCT (K)
	Q	C	Q	C	Q	C	Q	C	Q	C	Q	C	
Metal halide (Philips)	0.46406	0.83356	0.39297	1.01411	0.36117	1.10571	0.18236	1.84767	0.22858	1.60243	0.53053	0.68822	2719
Metal halide (Philips)	0.40385	0.98445	0.53868	0.67168	0.39805	1.00017	0.21754	1.65613	0.28450	1.36480	1.00566	-0.00613	2864
23. <u>Metal halide (Philips)</u>	0.44839	0.87085	0.41562	0.95326	0.46865	0.82287	0.18636	1.82411	0.29167	1.33776	0.35593	1.12158	3213
24. <u>Metal halide (Philips)</u>	0.44848	0.87064	0.62319	0.51345	0.48556	0.78440	0.27949	1.38408	0.34743	1.14783	0.88356	0.13441	3681
25. <u>Metal halide (Philips)</u>	0.47029	0.81907	0.46429	0.83303	0.48436	0.78709	0.21835	1.65211	0.28643	1.35745	0.54781	0.65342	3786
26. <u>Metal halide (Philips)</u>	0.43985	0.89174	0.52733	0.69479	0.56450	0.62085	0.23195	1.58653	0.37548	1.06354	0.44662	0.87515	3959
27. <u>Metal halide (Venture)</u>	0.43513	0.90346	0.69698	0.39195	0.42300	0.93415	0.30327	1.29541	0.40299	0.98675	1.03491	-0.03726	4700

Note: Non-numbered light sources are not represented in the graphs, nor their spectra are provided.

Incandescent and halogen													
	V - bolom		L ₅₀₀ - V		Z - V		L ₅₀₀ - bolom		B - V		A-V		CCT (K)
	Q	C	Q	C	Q	C	Q	C	Q	C	Q	C	
28. Incandescent (Sylvania)	0.10033	2.49647	0.14262	2.11456	0.30650	1.28393	0.01431	4.61103	0.08844	2.63337	0.09897	2.51119	2554
29. Incandescent (General Electric)	0.14507	2.09608	0.24608	1.52229	0.36924	1.08173	0.03570	3.61837	0.14306	2.11120	0.24863	1.51113	2574
30. Halogen (unknown)	0.25234	1.49502	0.25503	1.48354	0.40218	0.98894	0.06435	2.97856	0.15802	2.00325	0.18861	1.81112	2590
31. Halogen (Sylvania)	0.14993	2.06025	0.26780	1.43047	0.39791	1.00053	0.04015	3.49073	0.15536	2.02166	0.26648	1.43584	2700
32. Incandescent (Sylvania)	0.15389	2.03200	0.31369	1.25876	0.41426	0.95681	0.04827	3.29076	0.17925	1.86637	0.33704	1.18079	2813
33. Incandescent (Philips)	0.22036	1.64218	0.32961	1.20498	0.45329	0.85906	0.07263	2.84716	0.20293	1.73164	0.27484	1.40231	2881
34. Halogen (Sylvania)	0.16706	1.94280	0.30281	1.29707	0.41700	0.94967	0.05059	3.23987	0.17472	1.89416	0.31044	1.27004	3000

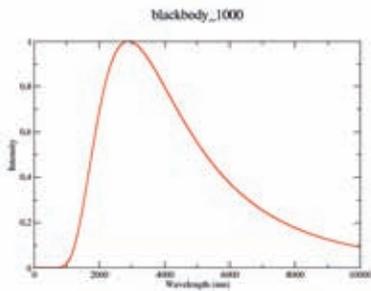
Sodium													
	V - bolom		L ₅₀₀ - V		Z - V		L ₅₀₀ - bolom		B - V		A-V		CCT (K)
	Q	C	Q	C	Q	C	Q	C	Q	C	Q	C	
35. Low-pressure sodium (unknown)	0.69461	0.39565	0.02994	3.80955	0.04280	3.42150	0.02079	4.20519	0.01764	4.38361	0.03480	3.64597	1834
High-pressure sodium (Philips)	0.55132	0.64649	0.12732	2.23772	0.12804	2.23159	0.07020	2.88421	0.06425	2.98025	0.14358	2.10726	1881
36. High-pressure sodium (Philips)	0.48322	0.78964	0.13074	2.20902	0.14931	2.06480	0.06317	2.99866	0.06607	2.94991	0.13390	2.18301	2010

Note: Non-numbered light sources are not represented in the graphs, nor their spectra are provided.

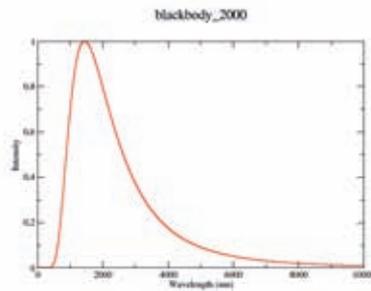
Light Emitting Diodes (LED)													
	V - bolom		L ₅₀₀ - V		Z - V		L ₅₀₀ - bolom		B - V		A-V		CCT (K)
	Q	C	Q	C	Q	C	Q	C	Q	C	Q	C	
37. LED amber (Osram)	0.66887	0.43665	0.00077	7.78544	0.02326	4.08337	0.00051	8.22209	0.00212	6.68333	0.00433	5.90960	1454
38. LED_PC amber (Osram)	0.51311	0.72448	0.00289	6.34808	0.06444	2.97717	0.00148	7.07256	0.00608	5.54062	0.00702	5.38464	1726
39. LED_PC amber (Sacopa)	0.51477	0.72096	0.01056	4.94105	0.06685	2.93722	0.00543	5.66201	0.01089	4.90732	0.01863	4.32427	1727
40. LED 1800 (Philips)	0.56212	0.62542	0.01460	4.58910	0.08187	2.71725	0.00821	5.21453	0.01576	4.50593	0.01653	4.45425	1800
41. LED (CREE)	0.47522	0.80776	0.14457	2.09984	0.26555	1.43964	0.06870	2.90760	0.11154	2.38145	0.11652	2.33404	2244
42. LED (Philips)	0.53408	0.68099	0.15961	1.99234	0.21695	1.65908	0.08524	2.67333	0.13697	2.15842	0.14838	2.07156	2340
43. LED (Philips)	0.46042	0.84212	0.15492	2.02474	0.29080	1.34101	0.07133	2.86686	0.11072	2.38940	0.12858	2.22703	2500
44. LED (unknown)	0.44034	0.89053	0.22687	1.61056	0.36133	1.10524	0.09990	2.50109	0.16231	1.97413	0.17333	1.90283	2680
45. LED (Philips)	0.42939	0.91788	0.25330	1.49093	0.33804	1.17757	0.10876	2.40880	0.21959	1.64598	0.23055	1.59307	2769
LED (Philips)	0.47880	0.79962	0.31314	1.26066	0.44883	0.86980	0.14993	2.06028	0.21611	1.66329	0.23094	1.59126	3000
46. LED (Philips)	0.49779	0.75738	0.22569	1.61620	0.36779	1.08600	0.11235	2.37358	0.16764	1.93908	0.16877	1.93179	3000
47. LED (General Electric)	0.48780	0.77940	0.24897	1.50965	0.38354	1.04046	0.12145	2.28905	0.17777	1.87536	0.19013	1.80239	3000
48. LED (Philips)	0.47634	0.80521	0.27730	1.39264	0.41382	0.95798	0.13209	2.19785	0.20635	1.71350	0.21233	1.68248	3001
49. LED (Osram)	0.50643	0.73870	0.23798	1.55866	0.36087	1.10663	0.12052	2.29735	0.19124	1.79606	0.19763	1.76039	3017
50. LED (Philips)	0.48592	0.78360	0.27759	1.39151	0.42684	0.92434	0.13488	2.17511	0.19875	1.75421	0.20139	1.73991	3024
51. LED (Philips)	0.47004	0.81965	0.36028	1.10840	0.48219	0.79195	0.16935	1.92806	0.28943	1.34615	0.29576	1.32263	3482
LED (Philips)	0.47981	0.79733	0.46290	0.83627	0.55279	0.64361	0.22210	1.63361	0.34511	1.15510	0.36681	1.08889	4000
52. LED (Philips)	0.49057	0.77324	0.37406	1.06763	0.48377	0.78840	0.18351	1.84088	0.28895	1.34793	0.29448	1.32736	4000
53. LED (Philips)	0.48862	0.77757	0.43531	0.90299	0.54647	0.65609	0.21270	1.68056	0.32958	1.20509	0.33436	1.18947	4006
54. LED (Osram)	0.49334	0.76714	0.41700	0.94967	0.46704	0.82662	0.20572	1.71681	0.35465	1.12551	0.37212	1.07330	4056
55. LED (LedTech)	0.50709	0.73728	0.50888	0.73346	0.45307	0.85958	0.25805	1.47074	0.44333	0.88317	0.47813	0.80113	4440
56. LED (Globe)	0.47710	0.80349	0.54875	0.65157	0.58684	0.57870	0.26180	1.45506	0.45207	0.86199	0.47532	0.80754	5000
57. LED (unknown)	0.46493	0.83152	0.63557	0.49208	0.56860	0.61299	0.29550	1.32361	0.56763	0.61484	0.58361	0.58470	5655
58. LED (LedTech)	0.47254	0.81390	0.65826	0.45401	0.56553	0.61887	0.31105	1.26791	0.57790	0.59537	0.62048	0.51818	5896
59. LED (Philips)	0.45267	0.86055	0.70540	0.37891	0.74712	0.31652	0.31931	1.23946	0.52642	0.69668	0.54810	0.65284	6050
60. LED_not for lighting (Globe)	0.07467	2.81718	12.4381	-2.73688	6.97065	-2.10818	0.92871	0.08030	9.64867	-2.46117	10.39001	-2.54154	6400
LED (Philips)	0.45189	0.86242	0.76537	0.29032	0.76042	0.29737	0.34586	1.15274	0.58388	0.58419	0.61664	0.52493	6500
61. LED (unknown)	0.45490	0.85520	0.76680	0.28830	0.69765	0.39090	0.34882	1.14350	0.63625	0.49094	0.66239	0.44722	7005

Note: Non-numbered light sources are not represented in the graphs, nor their spectra are provided.

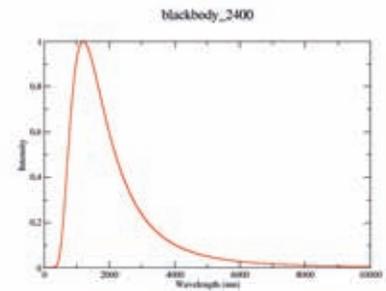
Complete sample



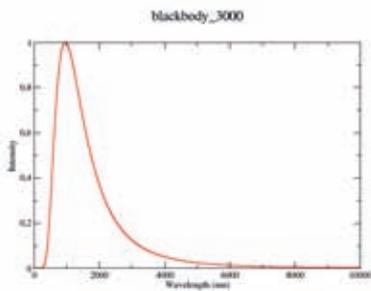
1



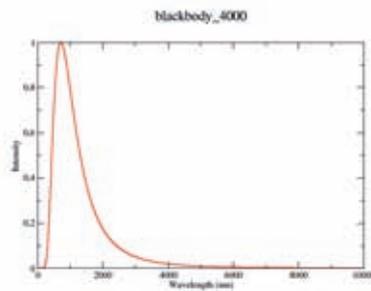
2



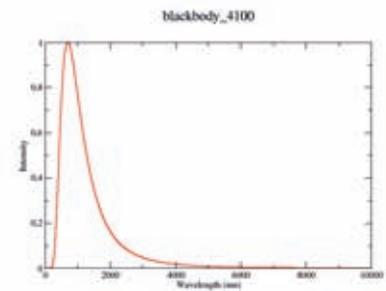
3



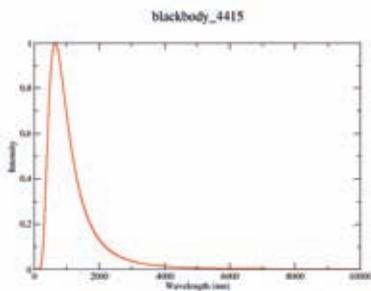
4



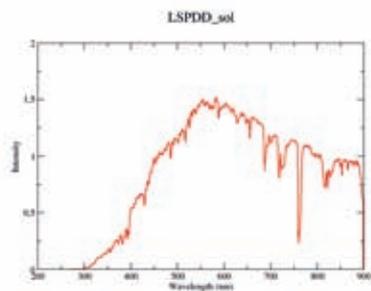
5



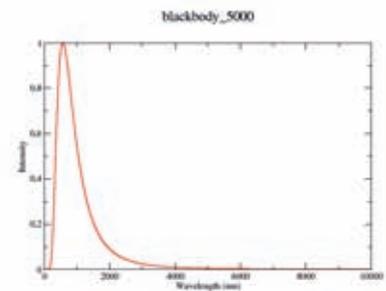
6



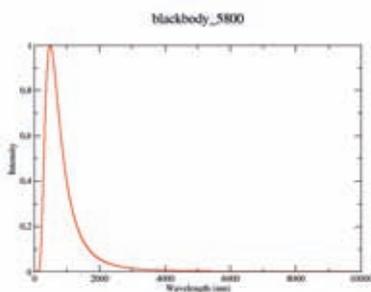
7



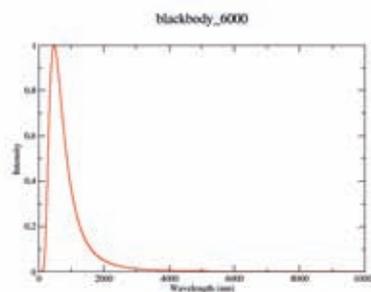
8



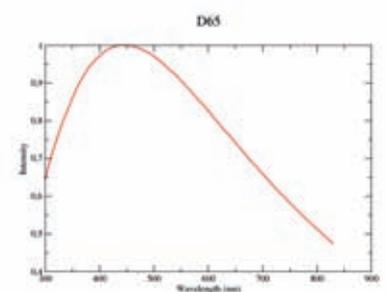
9



10



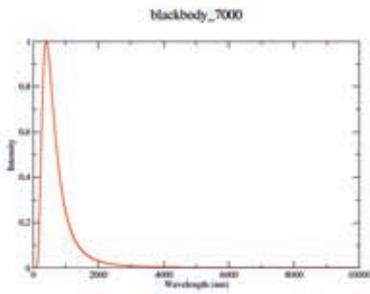
11



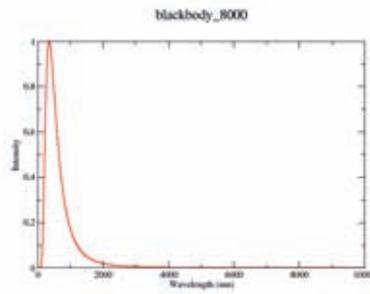
12



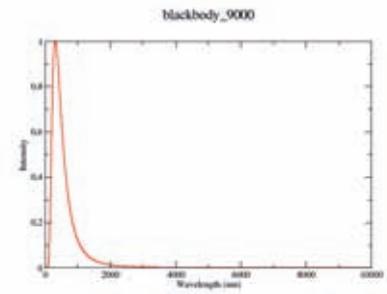
Black bodies and related spectra (and 2)



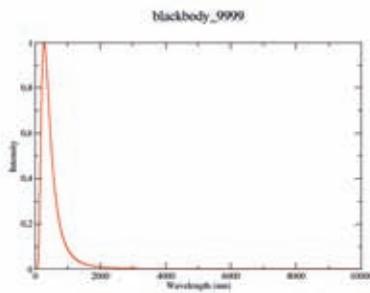
13



14

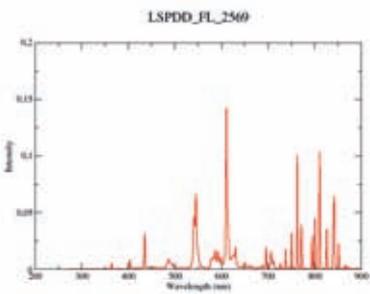


15

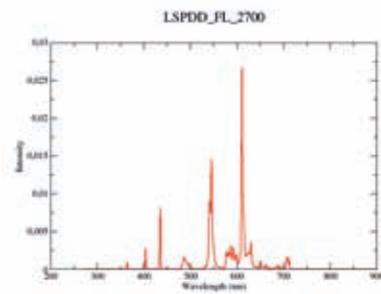


16

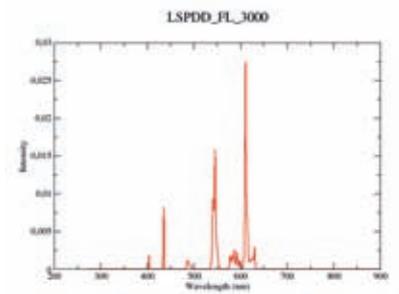
Fluorescent (low-pressure mercury)



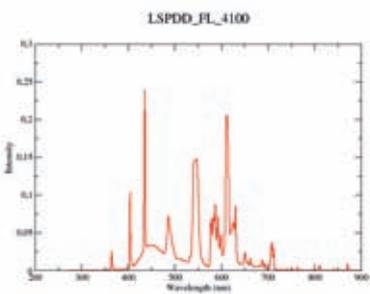
17



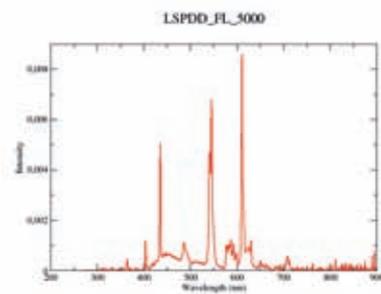
18



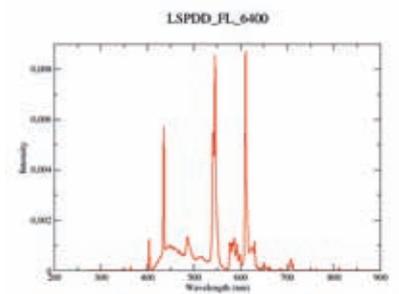
19



20

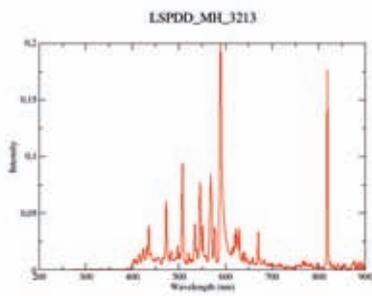


21

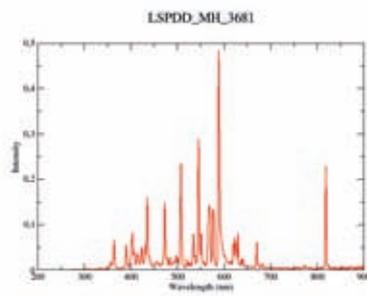


22

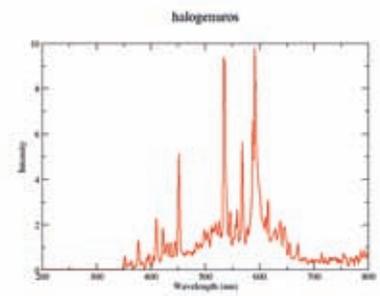
Metal halide



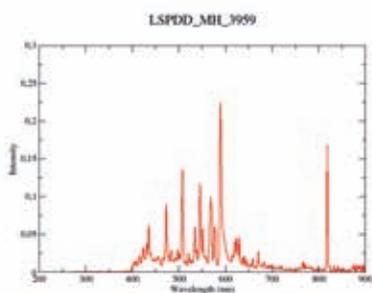
23



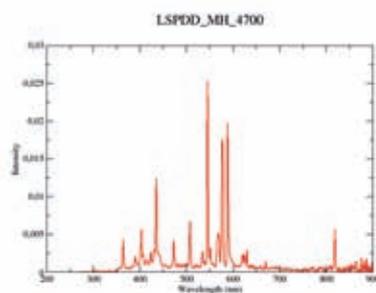
24



25



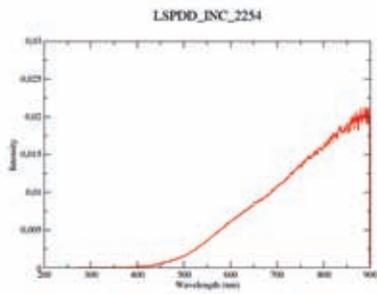
26



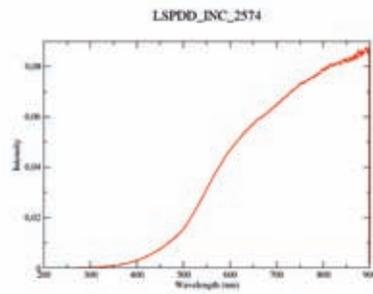
27



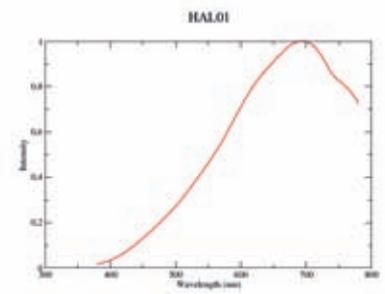
Complete sample



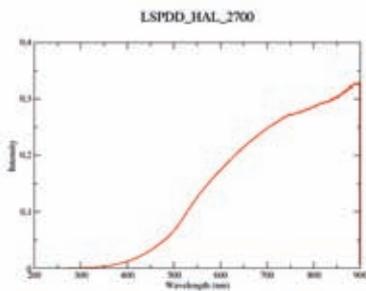
28



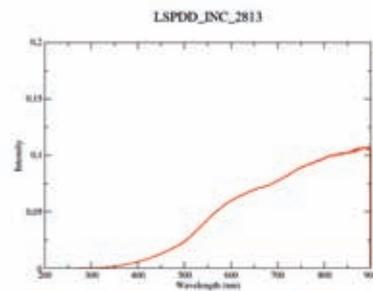
29



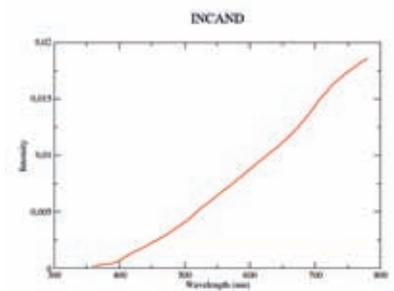
30



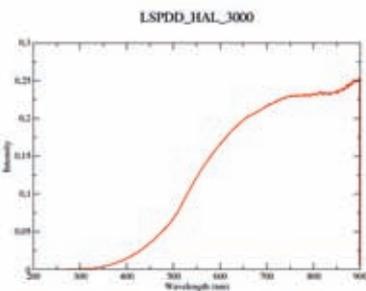
31



32

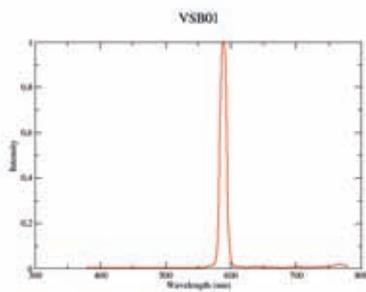


33

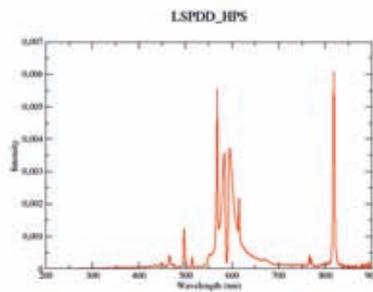


34

Sodium

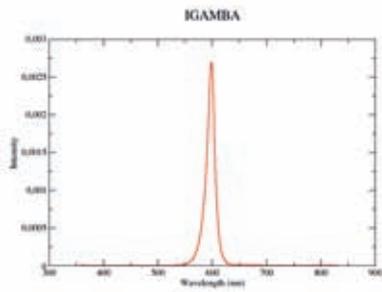


35

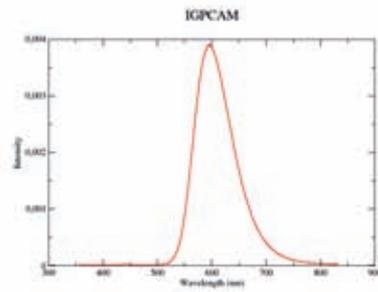


36

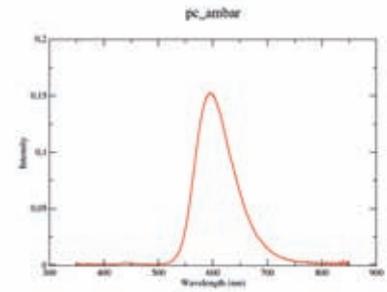
Light-emitting diodes (LED) (1)



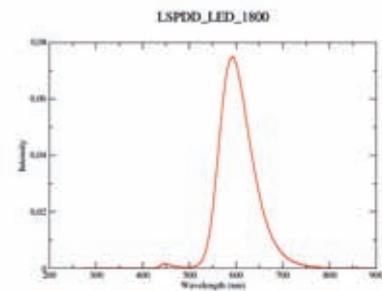
37



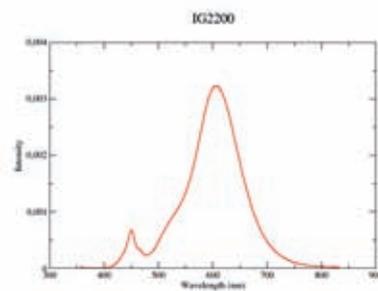
38



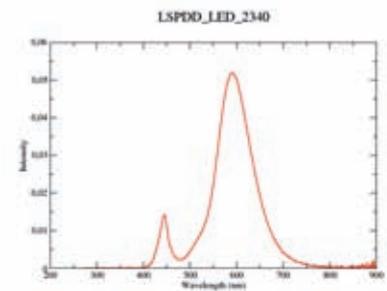
39



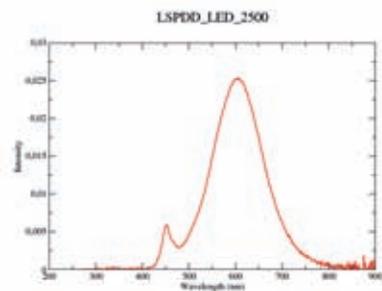
40



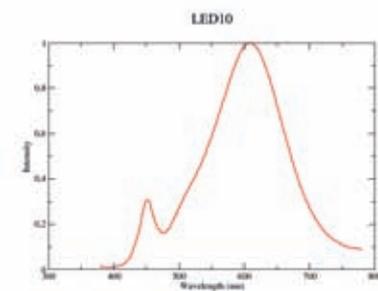
41



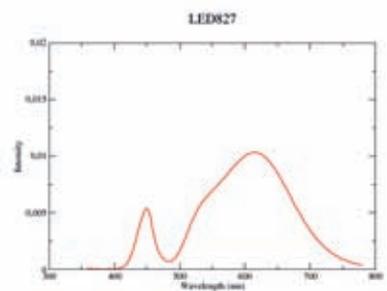
42



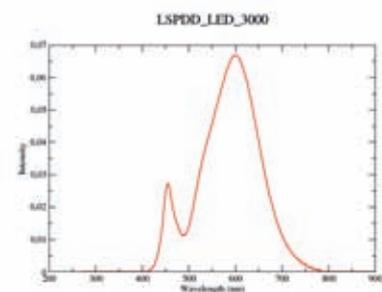
43



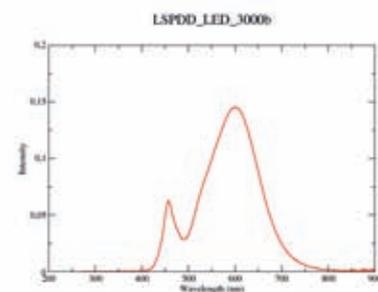
44



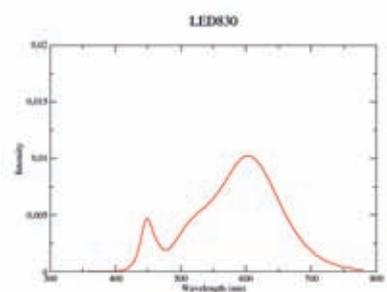
45



46



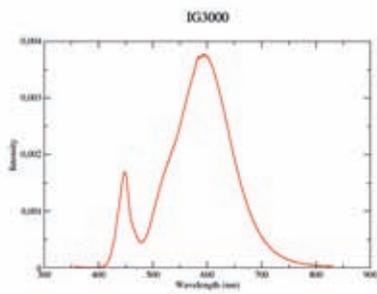
47



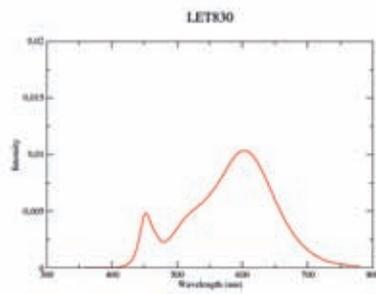
48



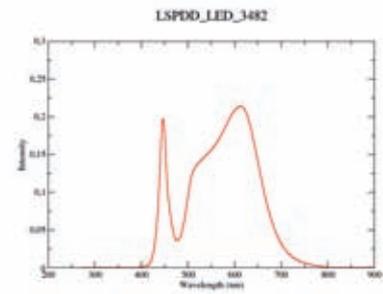
Light-emitting diodes (LED) (2)



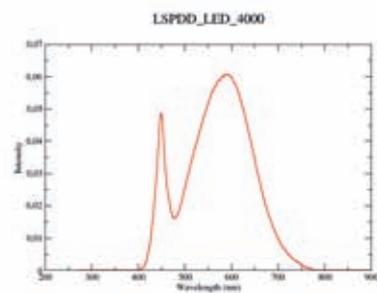
49



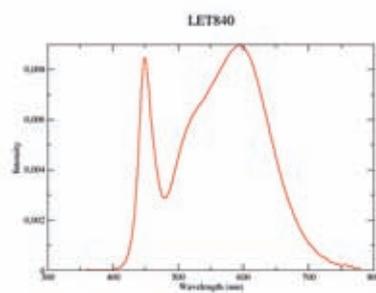
50



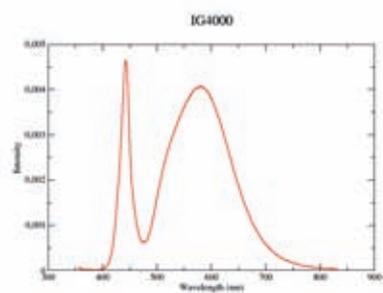
51



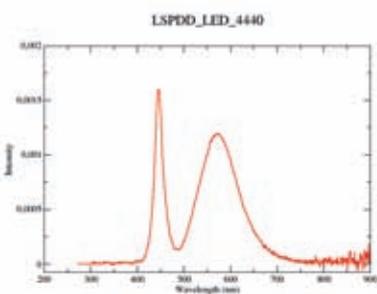
52



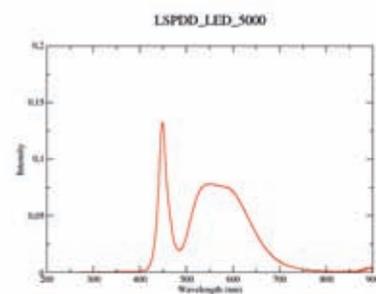
53



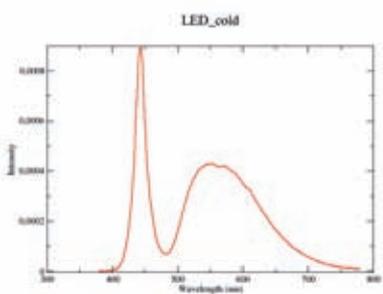
54



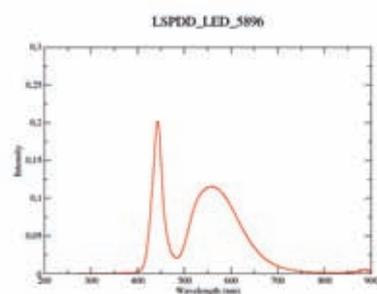
55



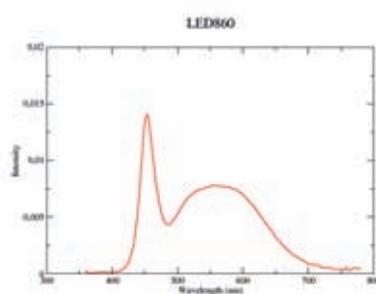
56



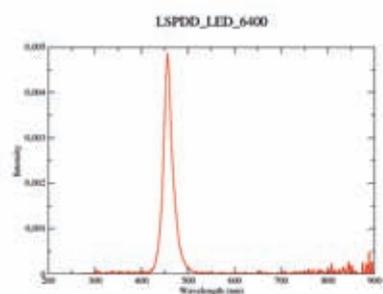
57



58

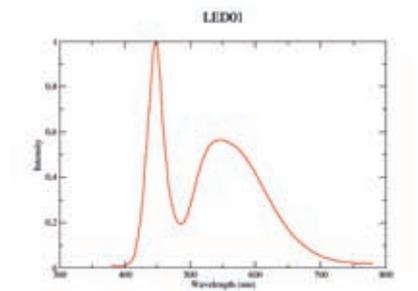


59



60

Light-emitting diodes (LED) (3)



61

2

DOCUMENTO

**Grupo de trabajo Comité Español de Iluminación sobre los
posibles riesgos de la iluminación LED**

Posible Riesgos de la iluminación LED para la Salud

Redactores:

María Ángeles Rol de Lama

Salvador Bará Viñas



Contenido

A. Efectos biológicos de la luz artificial	55
B. Características específicas de la iluminación LED	56
C. Iluminación LED y salud	57
1. Luz, cronodisrupción y salud	57
1.1. Organización del sistema circadiano	57
1.2. Disrupción Circadiana o Cronodisrupción	58
1.3. Efectos no visuales de la luz	59
1.4. Intensidad, espectro y momento	60
2. Riesgos oculares derivados de la exposición a la luz	64
3. Otros aspectos de la relación entre luz y salud	68
3.1. El papel de la luz en la generación o agravamiento de otras patologías	68
3.2. Situaciones que disminuyen el rendimiento visual y representan un riesgo para la salud	68
3.3. Otros aspectos relevantes vinculados a la percepción visual y el bienestar	69
D. Conclusiones y recomendaciones	70

“Salud es un estado de completo bienestar físico, mental y social, y no solamente la ausencia de afecciones o enfermedades.”

World Health Organization. (2006). Constitution of the World Health Organization – Basic Documents, Forty-fifth edition, Supplement, October 2006.

A. Efectos biológicos de la luz artificial

La especie humana progresó a lo largo de toda su historia evolutiva bajo ciclos periódicos y relativamente estables de luz y oscuridad. Al ciclo principal, asociado al día y a la noche, se añaden el ciclo lunar mensual y el ciclo anual de la diferente duración de los días y las noches asociado al transcurso de las estaciones. Nuestra especie, como la mayoría de las formas de vida que alberga nuestro planeta, desarrolló eficaces adaptaciones evolutivas que permiten obtener el máximo partido de estos ciclos. Este patrón periódico y previsible de iluminación, mantenido esencialmente sin cambios durante millones de años, se ha visto trastocado en los últimos siglos, y muy particularmente desde comienzos del s. XX, debido a la extensión de los sistemas de alumbrado artificial y a la generalización de su uso en los ámbitos público y privado.

La luz artificial es un innegable factor de progreso y ha permitido a la humanidad liberarse de las ataduras impuestas por los ciclos de luz natural. Ha hecho posible extender el período de actividad a las horas nocturnas y el aprovechamiento de espacios interiores que durante el día carecen de luz exterior suficiente. Ha sido, y continuará siendo, un signo de bienestar y un elemento imprescindible para nuestras sociedades. Su uso indiscriminado, sin embargo, tiene asociados importantes costes medioambientales, económicos, paisajísticos, culturales y para la salud humana, que deben ser tenidos en cuenta a la hora de diseñar e instalar sistemas de iluminación que permitan hacer un uso inteligente de la luz.

A nivel atómico y molecular la luz interactúa con nuestros cuerpos de formas muy diversas, provocando un amplio abanico de fenómenos que dependen de los procesos a través de los cuales la energía de los fotones es absorbida y posteriormente devuelta al medio. En términos ge-

nerales, la exposición a luz de irradiancias próximas a las encontradas en nuestro entorno natural, durante periodos de tiempo del orden de segundos y superiores, se traduce habitualmente en **efectos fotoquímicos**, entre los que se encuentran los que dan lugar a la visión, la fototransducción que sincroniza la regulación circadiana, la síntesis de vitamina D, y también los procesos fototóxicos asociados a la generación de radicales libres y especies reactivas de oxígeno que juegan un papel relevante en la aparición y desarrollo de diversas patologías retinianas y dermatológicas. Exposiciones intensas a pulsos de luz más cortos pueden dar lugar a **efectos fototérmicos**, provocando elevaciones locales de la temperatura de los tejidos que pueden derivar en hipertermia, coagulación y, en casos extremos, producir la ablación térmica de los mismos. Pulsos de radiación óptica aún más intensos y más breves, solamente obtenibles mediante láseres, pueden dar lugar a **efectos fotodisruptivos** en los que la generación de ondas de choque y fenómenos de cavitación, derivados de la formación local de plasmas, provocan la ruptura de tejidos. Todas esas formas de interacción, convenientemente controladas, son el fundamento de múltiples técnicas terapéuticas en las que la luz se utiliza eficazmente en beneficio de la salud de las personas. Estos mismos mecanismos de interacción, sin embargo, pueden ser la causa de daños diversos para nuestro organismo, si las dosis, los espectros o los momentos de exposición a la luz son inadecuados.

Los efectos fotodisruptivos se producen a potencias y duraciones de pulso que no están presentes en las fuentes de luz LED actualmente utilizadas para iluminación interior y exterior. Algo semejante ocurre con la mayoría de efectos fototérmicos. Son, pues, los efectos derivados de procesos fotoquímicos los que requieren una atención especial.

B. Características específicas de la iluminación LED

Los fotones emitidos por una fuente LED son idénticos a los fotones de las mismas características emitidos por cualquier otro tipo de fuente. Las fuentes LED, sin embargo, presentan diferencias relevantes con respecto a las fuentes tradicionalmente utilizadas en iluminación de interiores y exteriores, por lo que se hace necesario un análisis de sus beneficios y riesgos específicos para la salud humana. En lo que sigue, al hablar de fuentes LED nos referiremos a las más comúnmente utilizadas, las basadas en LED monocromático azul con reemisión fluorescente (Phosphor-Converted LED o pc-LED) en la banda visible, sin componentes apreciables de IR ni UV.

En comparación con otras fuentes de luz, los LED comúnmente utilizados para iluminación presentan importantes beneficios desde el punto de vista de la sostenibilidad y la salud humana. Entre ellas:

- **Carecen prácticamente de emisión en las bandas UV e IR** del espectro óptico.
- Son fuentes de estado sólido **poco susceptibles de ruptura y no contienen mercurio**.
- Si están bien diseñados e instalados permiten dirigir eficazmente la luz allí donde se necesita, **evitando la intrusión lumínica**.
- Pueden controlarse con facilidad, permitiendo programar su flujo luminoso y **reducirlo cuando no se necesita**, mediante sistemas de regulación y control inteligente.

Sin embargo, y al mismo tiempo, poseen características diferenciales que pueden causar problemas de salud o agravar los previamente existentes. Entre ellas, destacamos las siguientes (ANSES, 2010):

- **Generan luz blanca a partir de luz azul:** Los LED blancos basados en la tecnología de PC-LED (conversión por fósforos desde el azul) generan luz blanca partiendo de un chip LED que emite luz azul con un máximo de emisión en los 445-465 nm. Sobre este chip se incorpora una capa de fósforos que convierte parte de la luz azul en otros colores (de modo parecido a como se hace en las lámparas fluorescentes (en este caso partiendo del ultravioleta). En función del tipo de fósforo y su cantidad se obtienen LED

blancos muy diversos, tanto en su capacidad de reproducir los colores como en su apariencia de color o temperatura de color correlacionada, y con una proporción muy variable de luz azul respecto al total de luz emitida. Aunque el espectro es continuo, tiene dos picos principales de emisión, uno estrecho en la zona azul y otro más ancho en la amarilla o roja. El pico del espectro en la zona azules el que podría producir mayores efectos negativos en la salud humana, puesto que ese pico coincide -como veremos más adelante- con la región espectral que produce mayores efectos sobre la regulación circadiana y podría causar también mayores daños directos a las células de la retina.

- **Tienen luminancias muy elevadas:** Los chips LED tienen en general una alta luminancia, debido al pequeño tamaño de su región emisora y al gran flujo luminoso que proporcionan. La luminancia de un LED sin difusor puede llegar a ser 1000 veces mayor que la de una fuente convencional, alcanzando valores del orden de 10^7 cd/m², una fracción no despreciable de la luminancia solar. Por este motivo, desde el punto de vista de la función visual, es especialmente importante que los productos para alumbrado estén diseñados con ópticas adecuadas para cada uso, asegurando el cumplimiento de las recomendaciones contenidas en las normas EN 12464 y EN 13201 sobre el control del deslumbramiento. Es importante no perder de vista que el cumplimiento de las normas citadas, destinadas a regular el deslumbramiento, no garantiza por sí mismo la ausencia de efectos negativos sobre la salud humana, aspecto no contemplado en ellas.
- **Pueden presentar parpadeo y dar lugar a efectos estroboscópicos:** Los sistemas de alimentación de las fuentes LED pueden producir fluctuaciones temporales en la intensidad eléctrica que se traducen en fluctuaciones del flujo luminoso emitido (*flicker*). Dependiendo de su frecuencia, amplitud y forma detallada del ciclo de oscilación, estas fluctuaciones pueden ser susceptibles de provocar síntomas clínicos, tanto aquellas que son perceptibles para el ojo (3-60 Hz) como las que no llegan a serlo (120-150 Hz).

C. Iluminación LED y salud

A la hora de valorar los efectos de la exposición a la luz artificial, y en particular a la producida por fuentes LED, sobre la salud humana es conveniente analizar, entre otros aspectos:

- La incidencia de la luz procedente de LED sobre los procesos de **regulación circadiana** y las enfermedades sistémicas asociadas.
- Los posibles **daños oculares** derivados de la exposición a este tipo de iluminación.
- El papel de los LED en la generación o agravamiento de **otras patologías**.
- La existencia de situaciones asociadas al uso de LED que dificultan la **función visual** y pueden representar un riesgo para la salud.
- Otros aspectos relacionados con la **percepción visual y el bienestar**.

1. Luz, cronodisrupción y salud

La cronodisrupción constituye un riesgo identificado de diversas patologías. La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (*IARC*) de la Organización Mundial de la Salud (*WHO*) ha clasificado “el trabajo a turnos que implica **disrupción circadiana**” como probablemente carcinogénico en humanos (*Grupo 2A*) (*IARC*, 2010). Prestigiosas revistas científicas como *Nature*, *Science* y *Current Biology*, alertan de los riesgos para la salud producidos por una inadecuada exposición a la luz (Mehta & Zhu, 2009; Garaulet & Madrid, 2009; Czeisler, 2013; Kantermann, 2013; ver también Cho et al. 2015 y Hatori et al. 2017), a lo que hay que sumar que 2/3 de la población europea están expuestos regularmente a noches en las que el brillo del cielo es sensiblemente superior al natural (Cinzano et al. 2001; Falchi et al. 2016).

En otras situaciones, los efectos de una iluminación inadecuada, tanto en horas diurnas como nocturnas, no son tan llamativos, pero no por ello dejan de ser perjudiciales. Así la luz continua en las unidades de cuidado neonatal dificulta la maduración del sistema circadiano (Rivkees 2004; Zornosa-Moreno et al. 2011), afectando por tanto a la consolidación del patrón sueño-vigilia de 24 horas, en contraposición a los efectos positivos que se obtienen mediante la administración de ciclos adecuados de luz (Miller et al., 1995). La luz continua contribuye asimismo al denominado síndrome confusional agudo de las unidades de cuidados intensivos de adultos, donde la constancia ambiental es la norma (Madrid-Navarro et al. 2015).

El mantenimiento de ciclos adecuados de iluminación, con niveles apropiados de luz durante el día y de oscuridad por la noche, es beneficioso para la sincronización del sistema circadiano. Lo importante no es sólo la cantidad o el tipo de luz al que estamos expuestos, también lo es la hora del día en la que se recibe la luz.

No obstante, para entender los efectos de la luz sobre el sistema circadiano primero es necesario conocer su estructura.

1.1. Organización del sistema circadiano

El sistema principal para mantener el orden temporal en mamíferos es el sistema circadiano (SC) compuesto por: un reloj principal en los núcleos supraquiasmáticos (NSQ) del hipotálamo (figura 1) y osciladores periféricos en la mayoría de las células y los tejidos; vías de entrada, que conducen la información relativa al ciclo luz-oscuridad hasta el marcapasos; y vías de salida responsables de la coordinación de los ritmos circadianos, como la **melatonina**, cuya síntesis está controlada por el NSQ pero que también se inhibe directamente por la luz, especialmente por aquellas de longitudes de onda de entre 460 y 480nm. Esta hormona también se conoce como “la oscuridad química” ya que su secreción se mantiene elevada durante la noche, siempre que se esté en oscuridad, y actúa tanto de reloj como de calendario endocrino. Además de su acción cronobiótica (reajustando la hora del reloj por *feedback* y entrenando o modulando a los relojes periféricos), presenta propiedades antitumorales (de hecho su inhibición se postula como uno de los mecanismos que vincula la luz nocturna con algunos tipos de cáncer (Touitou et al. 2017)), neuroprotectoras, inmunomoduladoras, antiinflamatorias y antioxidantes, y resulta fundamental en los animales con reproducción estacional, activando o inhibiendo el eje gonadal en reproductores de días cortos y de días largos, respectivamente.

Además, cada neurona del NSQ es, en sí misma, un oscilador debido a un reloj, cuyo ritmo está generado por un bucle de retroalimentación transcripcional–translacional entre un grupo de elementos positivos (los genes *Clock* y *Bmal1*) y negativos tales como los genes *Period* (*Per1*, *2*, *3*), los criptocromos (*Cry1* y *Cry2*) y los genes nucleares Rev-Erba, que oscilan en antifase con un periodo de aproximadamente 24 h (ver Bozek et al. 2009; Schulz P & Steimer, 2009; Hardeland et al. 2012; Bonmati-Carrion et al. 2014).

1. 2. Disrupción Circadiana o Cronodisrupción.

En la actualidad estamos adoptando estilos de vida cada vez más nocturnos, ya sea debido al trabajo o al ocio, haciendo que la noche esté excesivamente iluminada, mientras que pasamos la mayor parte del día en interiores deficientemente iluminados (Smolensky et al. 2015; Stevens and Zhu, 2015), aumentando de este modo la brecha entre nuestros hábitos y los sincronizadores naturales del sistema circadiano. A pesar del impacto positivo que supuso la irrupción de la luz eléctrica en nuestras vidas también pagamos un precio fisiológico por la exposición a luz durante la noche: la cronodisrupción o disrupción circadiana (CD).

La CD se ha definido como una alteración importante del orden temporal interno de los ritmos fisiológicos, bioquímicos y/o comportamentales o de la relación de fase normal entre los distintos ritmos y la exposición a los sincronizadores ambientales, de los que el ciclo luz-oscuridad es el más importante.

La exposición a luz durante la noche (*Light at night, LAN*), una intensidad luminosa reducida o de espectro inadecuado durante el día, o una disminución del contraste en el ciclo luz-oscuridad contribuyen a generar CD. En la CD se produce una disminución de la amplitud de los ritmos, llegando

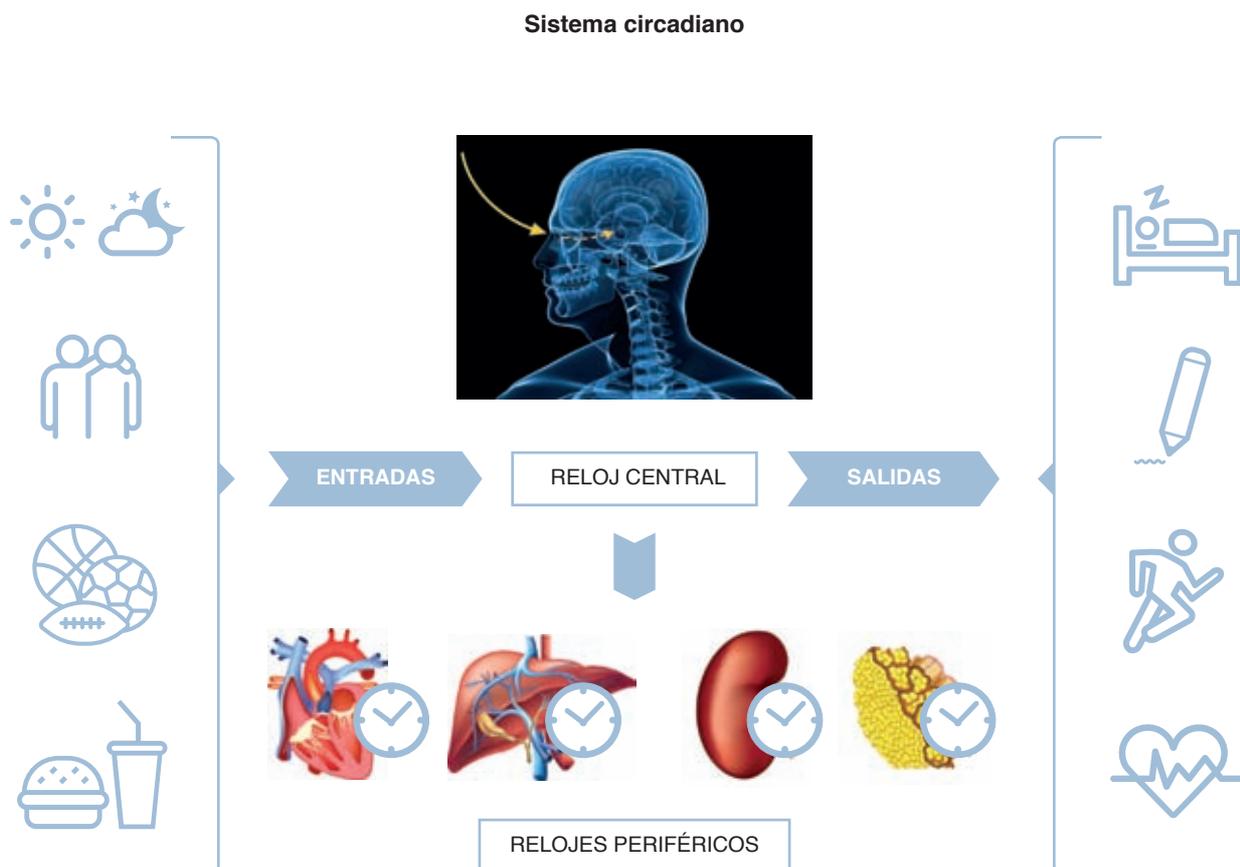


Figura 1. Estructura general del sistema circadiano en humanos. A) *Inputs* del ciclo luz-oscuridad y de otros *zeitgebers* no fóticos, tales como el ejercicio o los horarios alimentación. B) Maquinaria del reloj formada por un marcapasos central localizado en el núcleo supraquiasmático (NSQ), otros osciladores cerebrales y osciladores periféricos en múltiples órganos y tejidos. C) *Outputs*, ritmos manifiestos que pueden medirse en variables fisiológicas, bioquímicas o comportamentales. Modificado de Ortiz-Tudela 2014, Tesis Doctoral Internacional.

en algunos casos a una asincronía total, y avances o retrasos de fase entre los relojes periféricos y el marcapasos que puede llegar incluso a una inversión de los ritmos. Hoy sabemos, por los numerosos estudios epidemiológicos, clínicos y de experimentación con modelos animales, que la CD, en particular la producida por la luz artificial en horas nocturnas, en las que nuestro cuerpo espera estar en condiciones de oscuridad natural (Pauley, 2004; Zubidat & Haim, 2017; Tuitou, 2017; Lunn et al. 2017), está relacionada con un gran número de patologías (Smolensky et al. 2016), entre otras el aumento de la incidencia de síndrome metabólico (Garaulet & Madrid, 2009), enfermedades cardiovasculares (Garaulet & Madrid, 2010), alteraciones cognitivas (Cho et al. 2000), afectivas (Pandi-Perumal et al. 2009), algunos tipos de cáncer (mama, próstata y colorrectal) (Davis et al. 2001; Stevens and Rea, 2001; Stevens et al. 2007; Stevens, 2009; Stevens et al. 2013, 2014; Schernhammer et al. 2003; Kubo et al. 2006; Reiter et al. 2007, 2009; IARC, 2010) y envejecimiento prematuro (Kondratov, 2007). La iluminación artificial ha sido vinculada al aumento de obesidad en modelos

animales (Fonken et al. 2010, 2013, 2014). Existen asimismo indicios de que la exposición a la luz en horas nocturnas puede dificultar la acción terapéutica de algunos fármacos (Dauchy et al. 2014).

1.3. Efectos no visuales de la luz.

La entrada de luz es detectada por conos, bastones y también por células ganglionares de la retina intrínsecamente fotosensibles (ipRGC) que contienen melanopsina (Berson et al. 2002). Las proyecciones neuronales dependientes de melanopsina conectan la retina con otras áreas más profundas del cerebro tales como el NSQ y la glándula pineal (figura 2) (Gooley et al. 2001; Schmidt et al. 2011). La respuesta de las ipRGC muestra un pico de sensibilidad hacia los 480 nm, mientras que la máxima sensibilidad fotópica visual se desplaza a la parte verde de la luz visible (a 555 nm). Así los efectos no visuales de la luz sobre el sistema circadiano (Dacey et al. 2005), incluyendo la inhibición de melatonina, son más marcados cuando la luz contiene mayor proporción de azul (Erren & Reiter, 2009a, 2009b). Además, la exposi-

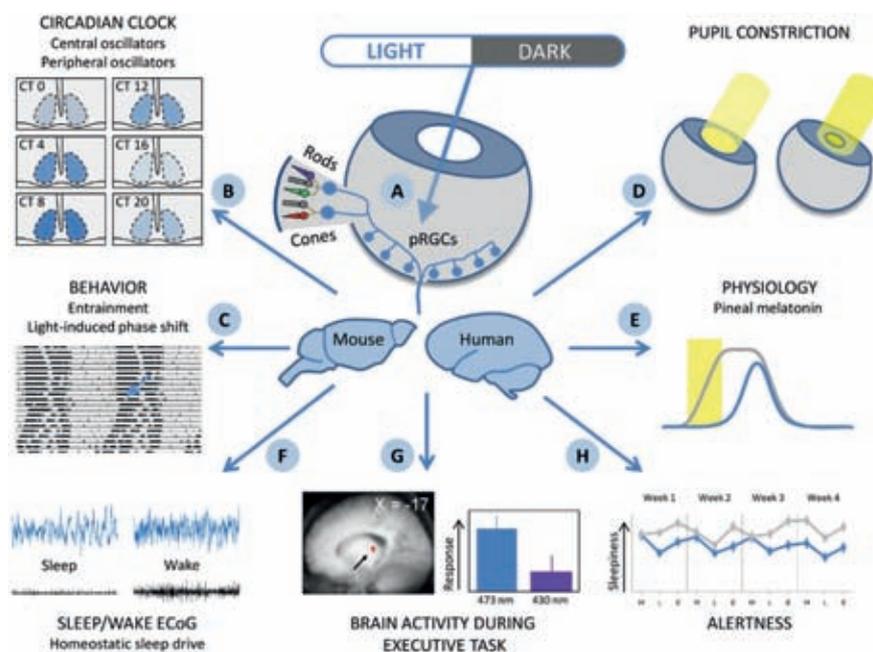


Figura 2. Diagrama de los efectos no visuales de la luz. La luz mediante células ganglionares intrínsecamente fotosensibles (A) induce múltiples efectos en funciones no visuales, tales como: reajuste del marcapasos circadiano (B), encarrilamiento de los ritmos comportamentales (C), contracción pupilar (D), inhibición de la secreción de melatonina (E), alteración en el EEG (F), activación selectiva de centros en el cerebro (G) y generación de alerta (H). Reproducido de Dijk et al. 2009.

ción a luz azul también genera mayor alerta (Vandewalle et al. 2009), aumenta el reflejo de constricción pupilar y la actividad de áreas cerebrales superiores más que la luz verde (para una revisión ver Cajochen, 2007). Incluso una pantalla de ordenador de LED de baja luminancia que contiene luz azul tiene mayores efectos sobre la alerta subjetiva que una pantalla convencional. De hecho, los efectos producidos por pantallas luminiscentes, y la forma de controlarlos, están siendo objeto de intenso estudio (Cajochen et al. 2011; Chang et al. 2014; Figueiro et al. 2011; Wood et al. 2012; Gringras, 2015; Figueiro & Overington, 2016; Oh et al. 2015; Escofet & Bará, 2015; Green et al. 2017).

Por el potencial ahorro económico que supone, se está llevando a cabo una gran sustitución de instalaciones de alumbrado público cambiando fuentes tradicionales -en muchos casos de vapor de sodio a alta presión- por LED. Se debe prestar especial atención a elegir LED que no contengan una gran cantidad de azul en su espectro, para minimizar el efecto de la luz sobre el sistema circadiano en la noche.

1.4. Intensidad, espectro y momento.

Una inadecuada exposición a la luz afecta a la salud general del sistema circadiano y al sueño en particular (Münch et al. 2006; Dijk & Archer, 2009; Czeisler, 2013; Potter, 2016; cfr. Sack et al. 2007). Dormir con las luces encendidas (40 lx en córnea, fluorescente, CCT no reportada) provoca efectos negativos agudos en la estructura y la calidad del sueño (Cho et al. 2013), incidiendo también, a niveles de menos de 10 lx en córnea (procedente de una fuente LED de 5779K con difusor), en aspectos relacionados con la memoria (Kang, 2016).

Las consecuencias de la exposición a la luz a deshora dependen, entre otros factores, del espectro (figura 3), de la duración de la exposición, de la intensidad de la misma, del momento en el que ocurre, de la historia previa de exposición y de la edad (ver, p.ej. Duffy, 1996; Hébert 2002; Lockley, 2003; Gronfier, 2004; Smith, 2004; Figueiro, 2005; Duffy, 2009; Gooley et al. 2010; Dewan 2011; Falchi et al. 2011; Najjar et al.2014;Crowley et al.2015; Higuchi, 2016; Rahman, 2017).

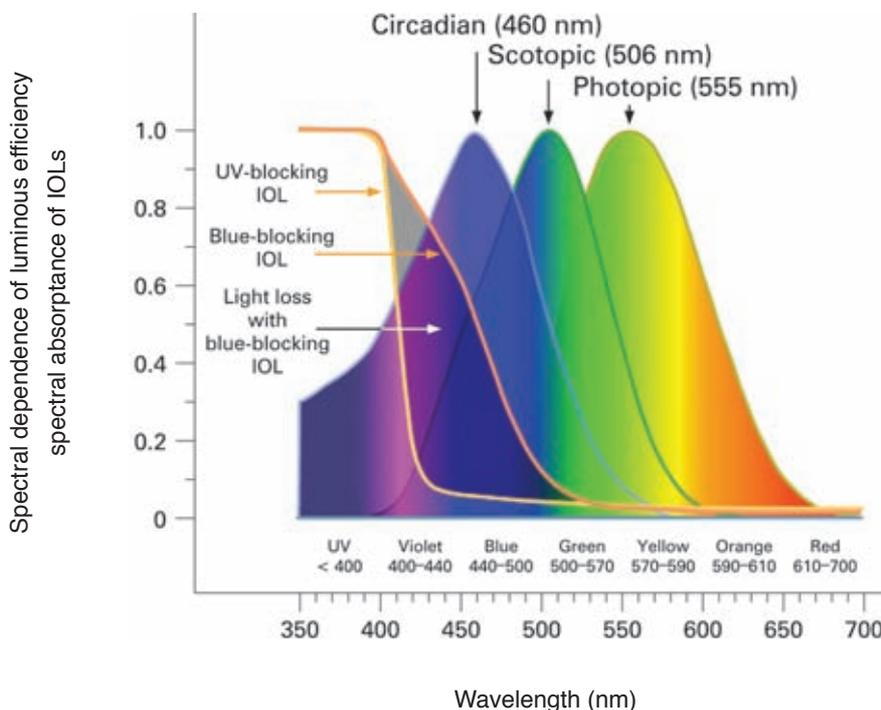


Figura 3. Sensibilidad espectral donde pueden observarse los máximos correspondientes a la visión fotópica (de día), escotópica (de noche) y el máximo de excitación para las células ganglionares de la retina, que envía la información al sistema circadiano. Reproducido de Turner & Mainster, 2008.

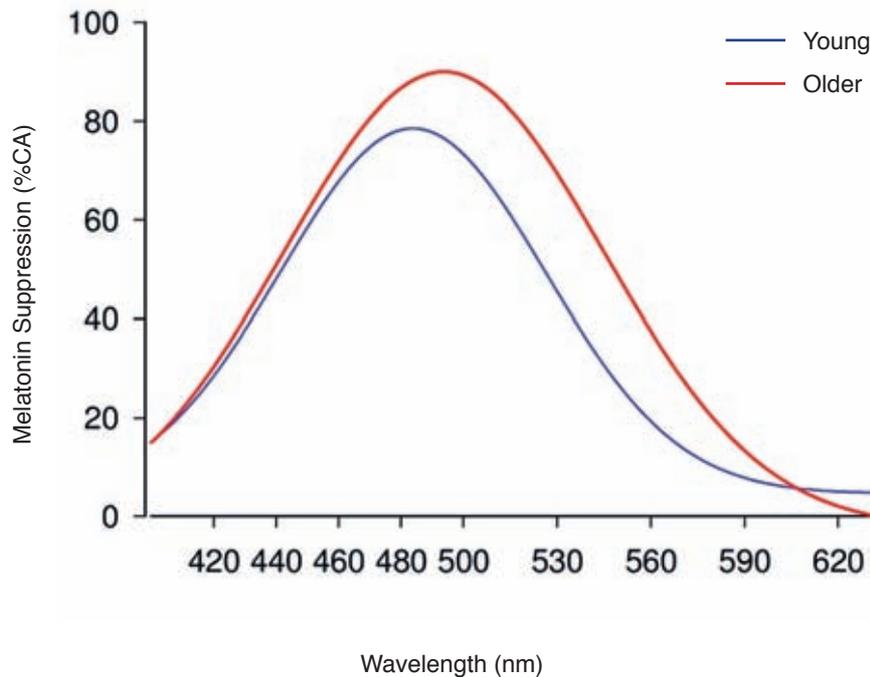


Figura 4. Sensibilidad espectral de la supresión de melatonina en sujetos jóvenes (línea azul) y mayores (línea roja) como porcentaje ajustado al control (%CA). Reproducido de Najjar et al. 2014.

En un amplio número de trabajos se analizan los efectos de la iluminación en horas nocturnas sobre la secreción de melatonina, tanto en humanos como en modelos animales. La eficacia de la luz para promover este efecto depende de los factores antes citados. En términos generales, la supresión aguda de la secreción de melatonina en humanos requiere niveles de iluminación superiores a los niveles umbrales necesarios para la visión. Sin embargo, estos niveles no son particularmente altos: la iluminación típica de interiores en horario nocturno es suficiente para producir una reducción apreciable de la melatonina circulante en sangre.

La mayor parte de los datos publicados corresponde a mediciones efectuadas en laboratorio, en las que se somete a las personas participantes a una exposición a la luz durante períodos de tiempo bien definidos, previo control de variables internas y externas adicionales, y se determina en diferentes momentos de la noche la concentración de melatonina circulante. La exposición a la luz se especifica generalmente por medio de la iluminancia (lx), o, en los casos mejor documentados, de la irradiancia espectral ($Wm^{-2}nm^{-1}$) en el plano tangente al vértice corneal de la persona, como indicador

proporcional de la irradiancia recibida en la retina. Esta es una simplificación aceptable para campos visuales extensos y uniformemente iluminados, pero es necesario advertir que la irradiancia (o iluminancia) a la entrada del ojo no es la magnitud más adecuada para estudiar la distribución de luz en la retina. La concentración potencialmente dañina de luz en la retina, es decir, la irradiancia (o iluminancia) sobre las células retinianas no depende en general de la irradiancia (o iluminancia) a la entrada del ojo, sino de la radiancia (o luminancia) de los diferentes puntos de la escena que está en frente del observador. En otras palabras, el ojo humano forma una imagen de su entorno sobre la retina, y la irradiancia (iluminancia) sobre cada célula de la retina es proporcional (con las correcciones oportunas derivadas de la transmitancia espectral de los medios oculares) a la radiancia (luminancia) del punto correspondiente de la escena, incluidas las fuentes de luz. Parte de la preocupación generada por el uso de LED en aplicaciones de iluminación general deriva precisamente de que, en ausencia de elementos difusores o protectores adecuados, la elevada luminancia de los LED puede dar lugar a intensas concentraciones de energía en la zona de la retina en la que se forma su imagen.

Los resultados muestran una gran variabilidad, en función de los detalles experimentales particulares de cada observación. Así, las medidas efectuadas por Zeitzer et al. (2000), utilizando iluminación fluorescente de espectro no especificado y personas voluntarias jóvenes expuestas a la luz durante 6.5h al comienzo de la noche biológica, indican efectos de supresión significativa de melatonina (~5-10%) y de retraso de fase del ciclo circadiano (superior a 0.5 h) a partir de niveles de iluminación del orden de unas decenas de lx. Experimentos semejantes efectuados en las últimas horas de la noche, con 5h de exposición durante tres noches consecutivas, mostraron que la mitad del máximo de respuesta de adelanto de fase se alcanzaba con iluminancias de 50-160 lx, saturando a ~1400 lx, y que la mitad del máximo de respuesta de la supresión aguda de melatonina se producía con iluminancias de 10-200 lx, saturando a ~1100 lx (Zeitzer et al. 2005). Medidas anteriores de Brainard et al. (1988), para exposición de una hora a luz monocromática de 509 nm, informaban de supresiones de un 37% para iluminancias de 5.5 lx y del 52% para 17 lx, llegando a un 61% para iluminancias de 45 lx. En 2001 Brainard detectó reducciones de melatonina en voluntarios con pupilas dilatadas, expuestos durante 90 minutos (entre las 02:00 y 03:30 AM) a luz monocromática de 464 nm de iluminancia 0.1 lx, equivalente a la producida por la luna llena (Pauley, 2004). A la hora de valorar este último dato es necesario tener en cuenta que la luz procedente de la luna es policromática, no monocromática, y que los efectos producidos por una y otra no son directamente comparables. Gooley et al. (2010) encontraron efectos significativos tanto sobre la hora de inicio de la secreción de melatonina como sobre la duración del período de secreción total tras la exposición a luz procedente de lámparas fluorescentes de 4100 K a niveles de iluminación no superiores a 200 lx. Figueiro et al. (2006), con iluminación fluorescente de CCT nominal 4100 K (3572 K en las condiciones experimentales usadas), obtuvieron porcentajes de supresión de melatonina del 10% para 100 lx, y del 38% para 300 lx, medidos en córnea. Estimaciones recientes de Bellia et al. (2013) para exposiciones de una hora en espacios interiores, en las horas centrales de la noche, predicen porcentajes de supresión aguda del 10%-20% para niveles de iluminación del orden de 50 lx o menores, llegando al 25%-40% para niveles de iluminación de 150 lx, dependiendo del tipo de fuente. Otros datos pueden encontrarse en West et al. (1985) y Najjar et al. (2014).

Análogos resultados son esperables en el caso de iluminación exterior, teniendo en cuenta los diferentes espectros de las fuentes y niveles de iluminación a la entrada del ojo en función de la emisión de las lámparas y de la distancia y orientación relativa entre éstas y la línea de mirada. Así, una estimación efectuada por Rea et al. (2010) para personas jóvenes, con una hora de exposición a diferentes niveles de iluminancia y distintas fuentes de iluminación (entonces) habituales en alumbrado público, utilizando modelos teóricos desarrollados por ese grupo de investigación, indicaba que, para una observación directa de las fuentes a muy corta distancia (la llamada "condición de referencia", típica de experimentos de laboratorio) en la que la iluminación corneal alcanzase los 95 lx, los niveles de supresión de melatonina serían del 15% para lámparas de vapor de sodio de alta presión, 14% para lámparas de halogenuros metálicos, 21% para LED blancos de CCT 5200 K y 30% para LED blancos de 6900 K. Otras situaciones más realistas fueron también analizadas: un escenario con 27 lx en córnea (línea de mirada horizontal, para una persona situada a unos 3 m de la base de las luminarias), y otro con 18 lx en córnea (persona a 10 m de la base de la luminaria, mirando directamente a la fuente de luz). En ambos escenarios la supresión de melatonina tras una hora de exposición se estimó inferior al 10% para todas las fuentes excepto para el LED de 6900K, que produciría un 12% y un 15% de reducción, respectivamente. A la hora de valorar estos resultados es conveniente no perder de vista que son predicciones, no resultados experimentales, y que la incertidumbre en la medida de la reducción de la concentración de melatonina en saliva o sangre es, en términos absolutos y con las técnicas actuales, de un 10%.

Aunque luz de cualquier longitud de onda, con intensidad suficiente, es capaz de producir efectos relevantes, la práctica totalidad de los estudios publicados coinciden en la mayor eficacia de las componentes de longitudes de onda cortas del espectro visible (en particular, las azules), frente a las longitudes de onda largas (rojas) a la hora de provocar efectos sobre el sistema circadiano y otros aspectos fisiológicos y comportamentales (ver, entre otros, Lockley 2003; Cajochen et al., 2005; Revell et al., 2005; Brainard et al., 2008; Chellapa et al., 2011; West et al., 2011; Aubé et al. 2013; Cheung et al., 2016; Revell and Skene 2007; Smith et al., 2009; Bonmati-Carrion et al., 2017).

Respecto al momento del día, la exposición a la luz puede generar avances o retrasos del reloj según se define en la *curva de respuesta de fase a la luz (phase response curve o PRC)*, de tal modo que la luz brillante al principio de la noche biológica (desde que comienza a elevarse la melatonina hasta el momento en el que se produce el mínimo de temperatura corporal) genera retraso de fase, mientras que en la mañana (desde el mínimo de temperatura corporal hasta 8 h después) produce un adelanto.

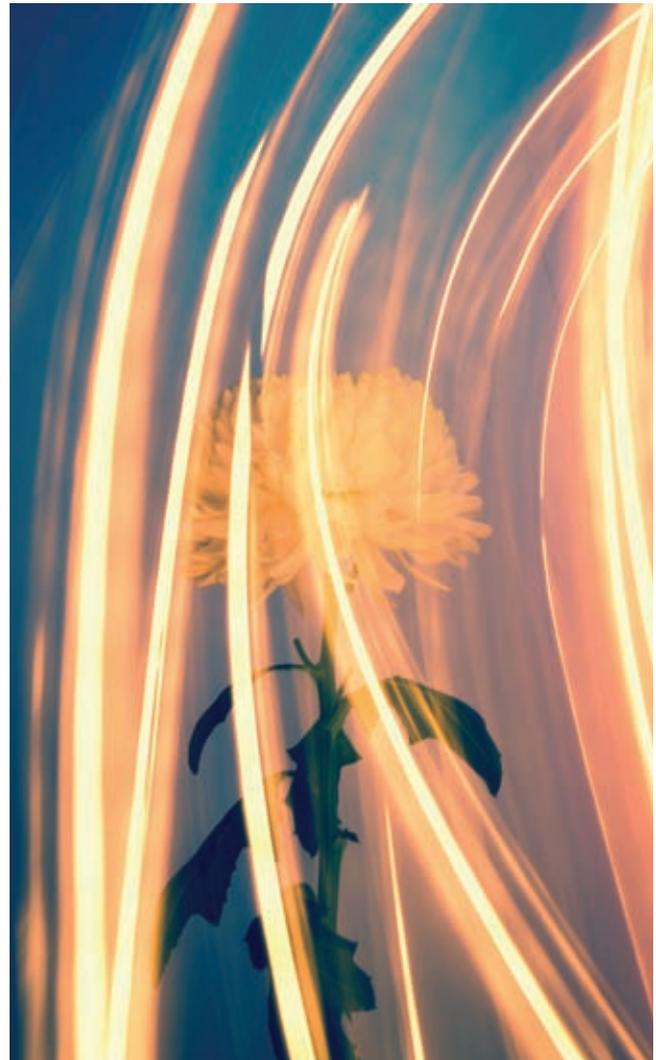
Respecto al avance de la edad, los cambios en transmitancia de los medios oculares también afectan a la capacidad de fotorrecepción circadiana, aunque no se descartan mecanismos compensatorios (Najjar et al. 2014).

El intenso trabajo de investigación llevado a cabo en los últimos años ha permitido avanzar en la formulación de modelos matemáticos para la estimación de los *inputs* del sistema de fototransducción circadiano y, con ciertas limitaciones, para la predicción cuantitativa de los *outputs* en términos de porcentaje de supresión aguda de la producción de melatonina bajo determinadas condiciones experimentales. Entre los primeros cabe destacar la propuesta de filtros básicos para describir la ponderación espectral de la señal recibida por los cinco fotorreceptores retinianos (conos S, L y M, bastones y células ganglionares intrínsecamente fotosensibles) desarrollada en el *First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry*, celebrado en Manchester en enero de 2013 (Lucas et al. 2014), objeto de una posterior propuesta de modificación por la CIE (CIE, 2015) a efectos de acomodar la formulación a las convenciones del Sistema Internacional de medidas. Entre los segundos, se han publicado diversos modelos lineales y no lineales (Meng et al. 2001; Gall, 2004, 2004b, Rea et al. 2005, 2012, 2016; Kozakov and Schoepp, 2011; Aubé et al. 2013; Bellia & Seraceni, 2014), pero estos modelos, si bien proporcionan previsiones útiles e indicativas, presentan limitaciones significativas que sólo un esfuerzo adicional de investigación coordinado a nivel internacional puede solventar.

Aún no está claro el nivel de “seguridad” o nivel de exposición permisible para mantener la secreción de melatonina y los datos apuntan a que además cambiaría con la edad de los sujetos. Hay que tener en cuenta que la mayor parte de los estudios realizados hasta el momento se centran en

los efectos agudos de la exposición a la luz artificial y no contemplan exposiciones crónicas, por lo que desconocemos los efectos a largo plazo. A día de hoy no se está en condiciones de establecer un umbral fiable de exposición por debajo del cual la exposición crónica a la luz en horario nocturno pueda considerarse carente de efectos sobre el sistema de regulación circadiana. Lo que sí podemos afirmar es que la inhibición de melatonina es mayor a mayor intensidad, espectro más azulado y/o mayor tiempo de exposición.

Una relación del estado actual del conocimiento y de los importantes retos de investigación que la comunidad relacionada con la iluminación tiene por delante puede consultarse en el Informe Técnico CIE 218:2016 *Plan de acción para la investigación de aplicaciones de iluminación saludable en interiores* (CIE, 2016).



2. Riesgos oculares derivados de la exposición a la luz.

La radiación óptica interactúa con los tejidos oculares de forma diferente según la región del espectro considerada. Así, mientras que la córnea del ojo absorbe preferentemente radiación en las bandas UV-C (100-280 nm) y UV-B (280-315nm), pudiendo dar lugar a fotoqueratitis, y en las IR-C (3000-10⁶ nm) e IR-B (1400-3000 nm), pudiendo producir quemaduras corneales, el cristalino absorbe sobre todo UV-A (315-400 nm), principal causa de las cataratas fotoquímicas, e IR-A (780-1400 nm), principal causa de las cataratas térmicas. A la retina llega una elevada proporción de radiación en la banda visible (400-780 nm) y también en el IR-A, lo que puede dar lugar a importantes daños fotoquímicos y/o térmicos, si la intensidad y duración de la exposición son suficientemente elevadas. Una descripción básica de la anatomía ocular y de los riesgos de las diferentes bandas de radiación óptica para los medios oculares puede encontrarse en el capítulo 3 del informe de la ANSES(2010), en el documento de opinión del SCENIHR (2012), en las recomendaciones del ICNIRP (2013), así como en el Anexo informativo A (*Resumen de efectos biológicos*) de la norma EN 62471:2008 (UNE-EN 62471:2009) y en la sección 6 del documento de opinión provisional del SCHEER sobre riesgos potenciales de los LED para la salud humana (SCHEER, 2017).

Restringiéndonos aquí exclusivamente a los daños fotoquímicos que puede provocar la luz en la retina, dos son los tipos principales descritos en la literatura científica: los derivados de la interacción de la luz con los pigmentos visuales (opsinas de conos y rodopsina), que afectan fundamentalmente a los fotorreceptores, y los vinculados a la interacción de la luz con agentes fotosensibilizadores presentes de forma natural en el ojo, que afectan en primer lugar al epitelio pigmentario de la retina, provocando daños posteriores en los fotorreceptores.

La **retinopatía fotoquímica por exposición a luz intensa**, también conocida como daño fotoquímico Tipo I o de Noell, está asociada a un blanqueo prolongado de los fotopigmentos debido a la exposición a luz intensa durante periodos típicos que van de horas a semanas, presentando un espectro de acción idéntico al espectro de absorción de los pigmentos visuales, con un pico de sensibilidad en torno a los 500 nm. Aunque el daño se localiza fundamentalmente en los fotorreceptores, no se descarta que pueda afectar también al epitelio pigmentario de la retina desde los momentos iniciales de su producción. Los niveles de iluminación

requeridos para producir daños significativos en retinas de modelos animales son, en opinión del ICNIRP (2013), muy superiores a los que pueden experimentar los humanos al usar fuentes de iluminación incoherentes de banda ancha en condiciones usuales, por lo que las recomendaciones de esa Comisión Internacional no incluyen límites de exposición específicos para evitar este tipo de riesgo. El informe del SCENIHR (2012), por su parte (p .35), estima que las irradiancias de luz blanca suficientes para provocar este tipo de daños son inferiores a la irradiancia producida por el sol brillando sobre nieve o arena blanca en un día despejado.

La **retinopatía fotoquímica asociada con la luz azul** (*Blue-light hazard*), o daño fotoquímico tipo II o de Ham, está provocada por exposición a luz intensa en la región de longitudes de onda cortas del espectro visible, sobre todo en torno a los 300-550 nm, con un pico en 440 nm para adultos sin patologías oculares. Este tipo de interacción afecta inicialmente al epitelio pigmentario retiniano, provocando daños celulares por efectos oxidativos derivados de la producción de radicales libres y especies de oxígeno altamente reactivas al ser absorbida la luz por fotosensibilizadores presentes de forma natural en el ojo (p.ej. lipofuscina). Los daños en el epitelio se extienden posteriormente a los fotorreceptores. Este tipo de riesgo aumenta para determinados grupos de población, como son las personas afáquicas o pseudofáquicas sin filtro espectral o los menores de muy corta edad, debido a que no cuentan con la función protectora del cristalino, por su ausencia en el primer caso y por su elevada transparencia en los dos últimos. En estos grupos la banda de sensibilidad se extiende, con riesgo aumentado, hasta los 300 nm (ver figura 5). También constituyen grupos de riesgo elevado las personas con deficiencia de pigmento macular y aquellas a quienes se han suministrado fármacos con propiedades fotosensibilizadoras. La fototoxicidad de los derivados de la lipofuscina aumenta con la edad, efecto que se opone al mayor grado de atenuación de la luz azul por el cristalino en personas de edad avanzada. Este tipo de efecto fotooxidativo es acumulativo y, en caso de producirse daño en los fotorreceptores, éste es irreversible.

Los límites de exposición a la luz azul considerados seguros por la Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No-Ionizantes pueden consultarse en ICNIRP, 2013. Estos límites se expresan en función de valores integrados de la radiancia o irradiancia espectral ponderadas

por funciones de peso que dan cuenta de la eficacia relativa de cada longitud de onda para provocar esos daños. Las funciones de peso $A(\lambda)$ y $B(\lambda)$, correspondientes a población afásica o infantil y a la población adulta general, respectivamente, están recogidas en ICNIRP, 2013 (Tabla 2, p. 84) y se muestran en la figura 5. Los límites de exposición propuestos por la ICNIRP están basados en la determinación de la ED50 sobre escalas binarias lesión/no lesión observables con los procedimientos de imagen de fondo de ojo habituales en oftalmoscopia. Los riesgos se evalúan para personas con los mecanismos de aversión funcionales e intactos (incluyendo la desviación de mirada, entorpeo o cierre de párpados, y reflejo pupilar).

Los sistemas de iluminación basados en pc-LED se caracterizan por poseer un pico de emisión coincidente con la región de mayor sensibilidad a este tipo de daños retinianos (ver figura 6). Usando los índices espectrales propuestos por David Galadí para este grupo de trabajo se puede comprobar que existe una importante correlación entre la temperatura de color del LED y la cantidad de potencia emitida en las bandas de riesgo retiniano asociado a la luz azul. Sin embargo también puede observarse que, a igualdad de temperatura de color y de lúmenes emitidos, las fuentes LED emiten menos potencia radiante ponderada en la banda $B(\lambda)$ que la que emiten muchas fuentes tradicionales, y menos que la inmensa mayoría de estas en el caso de la banda $A(\lambda)$.

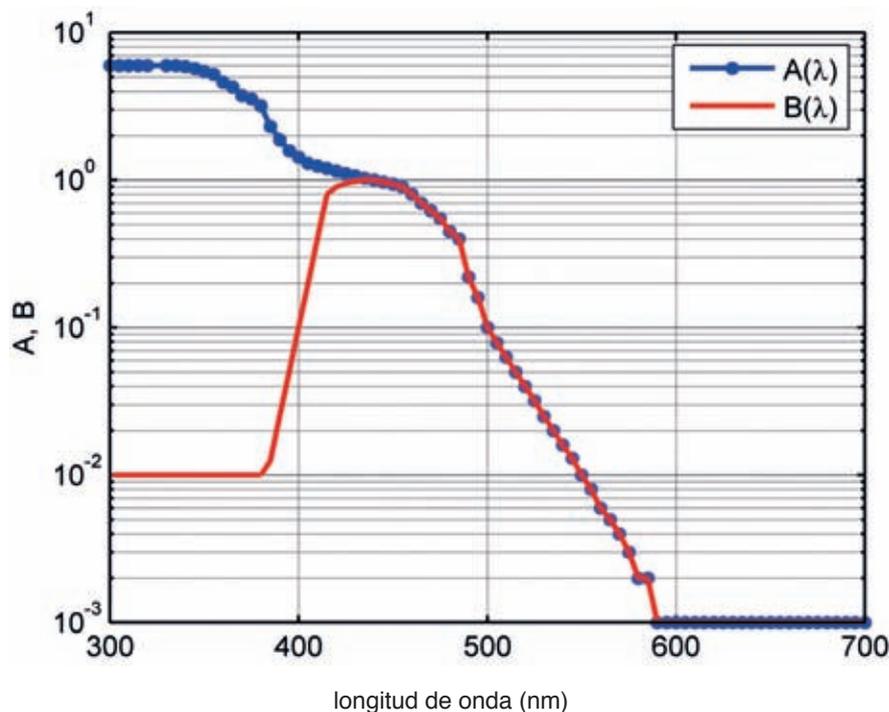


Figura 5. Funciones de ponderación espectral para el riesgo retiniano asociado a la exposición a luz azul. $A(\lambda)$: población afásica o infantil, sin protección de filtrado del cristalino; $B(\lambda)$: población adulta general. Elaboración propia en base a datos de ICNIRP Health Phys. 105(1):74Y96; 2013, Tabla 2.

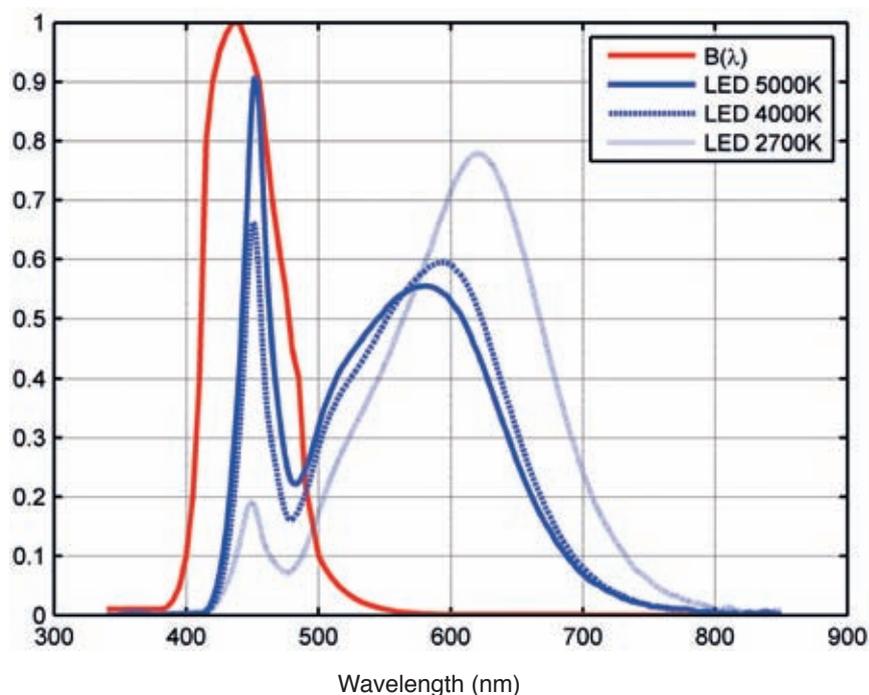


Figura 6. Espectros de emisión de fuentes pc-LED de CCT 5000K, 4000K y 2700K, normalizados a flujo luminoso constante, superpuestos a la función de ponderación espectral para el riesgo retiniano asociado a la exposición a luz azul de la población adulta general. Elaboración propia en base a datos de ICNIRP Health Phys. 105(1):74Y96; 2013, Tabla 2, y medidas efectuadas en laboratorio.

Las recomendaciones generales del ICNIRP son la base de la norma EN 62471:2008, *de seguridad fotobiológica de lámparas y de los aparatos que utilizan lámparas*, actualmente en vigor. Esta norma proporciona un conjunto de indicaciones básicas para evaluar los peligros potenciales de la radiación óptica emitida por las lámparas, incluyendo un esquema de clasificación de las mismas en grupos de riesgo en función del tiempo máximo de observación segura. La norma establece los límites de exposición, en términos de radiancias o irradiancias integradas con ponderación espectral, por debajo de los cuales la exposición a las lámparas durante un tiempo dado es generalmente considerada segura.

El informe (ANSES, 2013) antes citado indica una serie de limitaciones que hacen que la norma EN 62471 esté, a su juicio, insuficientemente adaptada a los sistemas de iluminación con LED. Entre ellas se encuentran las siguientes:

- Los límites de exposición contemplados en la norma están basados en el uso exclusivo de la curva de ponderación es-

pectral $B(\lambda)$ para la evaluación de la fototoxicidad asociada a la luz azul, curva que solamente es aplicable a adultos con transmitancia normal de los medios oculares.

- Los límites de exposición definidos por el ICNIRP y utilizados en la norma para definir los grupos de riesgo están calculados para exposiciones en una jornada de 8 horas, y no tienen en cuenta la posibilidad de exposición continuada a lo largo de la vida. Eso significa que exposiciones repetidas y prolongadas a niveles de luz inferiores a los umbrales límite podrían dar lugar a un riesgo potencialmente superior al contemplado en los límites de exposición.
- La clasificación de riesgo de algunos tipos de LED puede variar, además, en función del criterio seguido para calcularla (distancia a la que producen una iluminancia de 500 lx o 200 mm desde la fuente).

En relación con los límites de exposición, la propia norma indica en el apartado A.3.8. que no se cuenta con información suficiente, y que se necesita "(...) *más conocimiento del mecanismo de daño; datos entre 400 nm y 450 nm para du-*

raciones de exposición menores que 10 s; datos sobre actividad de exposiciones múltiples y la posibilidad de efectos retardados de exposiciones recurrentes a niveles por debajo del umbral agudo.” (p.28, UNE-EN_62471:2009)

En lo que se refiere a los efectos fotoquímicos sobre retinas de personas en edad infantil o afáquicas, descritos mediante la función de ponderación espectral $A(\lambda)$, los índices espectrales propuestos por David Galadí que se encuentran en el Anexo de este documento permiten afirmar que el contenido en azul de las fuentes pc-LED, a igualdad de luminancia y de temperatura de color, es inferior al de la inmensa mayoría de fuentes tradicionales. Uno de los motivos es que la luz emitida por los pc-LED no contiene cantidades significativas de radiación en longitudes de onda por debajo de los 410 nm.

El efecto causal de la exposición prolongada a la luz en otras enfermedades retinianas que pueden conducir a la ceguera, como la **degeneración macular asociada a la edad (DMAE)**, es actualmente objeto de viva discusión. El informe de la ANSES recoge esta preocupación, recordando que, con la edad, materiales fotorreactivos como la lipofuscina se van acumulando en el epitelio pigmentario de la retina aumentando de esa forma el riesgo de estrés oxidativo. Esto plantea de nuevo la pregunta de si las lesiones acumuladas debidas a un estrés oxidativo continuado a dosis bajas podrían, con el paso del tiempo, provocar un envejecimiento prematuro de la retina favoreciendo la degeneración macular. De acuerdo con el citado informe, la observación directa y repetida del sol puede inducir lesiones maculares irreversibles semejantes a las observadas en las maculopatías ligadas a la edad. Diversos estudios epidemiológicos han proporcionado resultados no coincidentes sobre el papel de la exposición solar como factor de riesgo de DMAE. Dada la dificultad que presenta la determinación de la exposición real al sol a lo largo de periodos prolongados de tiempo, y la existencia de múltiples factores de variabilidad entre personas, no se puede descartar que una parte importante de las correlaciones observadas no correspondan a relaciones causales. Sin embargo, el reciente estudio de revisión de Sui et al.(2013), que analiza los resultados de las catorce principales investigaciones sobre este tema realizadas hasta ese momento (doce de las cuales identificaron la exposición a la luz solar como un factor de riesgo de esta patología), indica en sus conclusio-

nes que las personas con mayores niveles de exposición al sol tienen un riesgo significativamente superior de padecer DMAE.

La luz artificial puede generar o agravar la DMAE a través de la alteración del epitelio pigmentario de la retina (RPE), tal como se puede comprobar en observaciones en modelos animales sometidos a iluminación difusa de alta luminancia (2680 cd/m²) procedente de LEDs blancos, durante periodos inferiores a 24h (cfr. Jaadane et al. 2017) e incluso en exposiciones prolongadas a iluminancias típicas de interior (200-500 lx) con LED de elevada componente azul (Ortin-Martinez, 2014). De acuerdo con Krigel et al.(2016), *“el conjunto de datos disponibles sugiere que la componente azul de los LED blancos puede causar toxicidad en la retina a iluminancias ocupacionales típicas de interiores, y no solo en condiciones experimentales extremas, como previamente se sospechaba. Es importante notar que las normas y estándares actuales se establecieron en base a exposiciones agudas y no tienen en cuenta los efectos de exposiciones reiteradas”*. Por otra parte, es importante no perder de vista que estos resultados han sido obtenidos experimentando con modelos animales, muchos de ellos nocturnos, y que la extrapolación a humanos no es directa ni inmediata. Este tipo de riesgos no está contemplado en la norma EN 67241.

De acuerdo con los índices espectrales que figuran en el Anexo, para un mismo número de lúmenes emitidos y a igual temperatura de color las fuentes pc-LED emiten una menor cantidad de luz azul ponderada por la curva de sensibilidad espectral $A(\lambda)$ que la inmensa mayoría de fuentes tradicionales, y menos cantidad de luz azul ponderada por la curva $B(\lambda)$ que muchas de ellas. El daño fotoquímico retiniano, no obstante, no depende solo de la composición espectral de la luz, sino también, y de forma muy determinante, de la distribución espacial de la irradiancia ponderada incidente sobre las capas de células de la retina, que a su vez depende de la distribución de luminancias en el campo visual. La elevada luminancia de las fuentes LED puede contrarrestar el efecto positivo de su menor contenido en azul, incrementando de esta forma su peligrosidad potencial. Solamente a igualdad de luminancias y de temperaturas de color se puede anticipar que las fuentes LED presentan un menor riesgo que la mayoría de las convencionales.

3. Otros aspectos de la relación entre luz y salud

La relación entre luz y salud, desde una perspectiva global, abarca aspectos que van mucho más allá de la regulación circadiana o la fototoxicidad retiniana, y que no son tratados con detalle en este documento. Entre ellos cabe citar:

3.1. El papel de la luz en la generación o agravamiento de otras patologías.

La radiación en bandas del espectro óptico puede afectar de forma directa también a la piel. En función de la longitud de onda y los parámetros radiométricos de la exposición esta afectación puede traducirse en efectos como las quemaduras solares (eritemas), procesos tumorales, incremento de la pigmentación o envejecimiento acelerado de los tejidos (fenómenos asociados sobre todo a exposición a las distintas subbandas del UV) o en quemaduras provocadas por radiación IR. Los límites de exposición para evitar daños actínicos o térmicos en la piel están especificados en la norma EN 62471 y su cumplimiento forma parte del conjunto de condiciones relevantes a la hora de asignar un grupo de riesgo fotobiológico a una determinada lámpara. Cabe decir que estos criterios de exposición máxima están afectados de limitaciones semejantes a las ya comentadas en el caso de daños directos en la retina, es decir, se aplican a exposiciones dentro de la jornada laboral de 8 horas.

La exposición en la banda visible, característica de la emisión de los LED, no parece presentar riesgos particulares para la piel a las radiancias e irradiancias comunes de las lámparas de uso general para alumbrado público o iluminación de interiores. Mención aparte merece el caso de las personas con sensibilidad cutánea específica, derivada por ejemplo de la administración de fármacos con propiedades fotosensibilizadoras, para quienes la exposición a luz azul puede provocar reacciones fotosensibles que den lugar a un agravamiento de síntomas en la piel.

El parpadeo o *flicker* ha sido asociado con el agravamiento de condiciones específicas preexistentes (p. ej. con la provocación de episodios epilépticos fotosensibles y migrañas). No conocemos estudios detallados sobre la relevancia clínica real que puede presentar el parpadeo residual de las actuales fuentes de iluminación LED.

Según el informe del SCENIHR (2012), no existe evidencia científica de que diversas patologías que en algún momento se han relacionado con la luz (cita como ejemplos el síndrome

de Meares-Irlen, la encefalomielitis miálgica, la fibromialgia, la dispraxia, el autismo y HIV) sean afectadas por las tecnologías de iluminación contempladas en ese documento de opinión, entre las que se encuentran los LED.

La iluminación artificial en horario nocturno, especialmente el alumbrado público exterior, puede desempeñar un papel relevante en la propagación de ciertas enfermedades a través de las especies animales que actúan como sus vectores, fenómeno especialmente estudiado en latitudes próximas al ecuador (Barghini & Medeiros, 2010; Castro et al. 2010; Pacheco et al. 2012; Erazo & Cordovez, 2016). La eficacia atractora de los LED frente a otro tipo de fuentes está todavía en discusión. Cabe mencionar que la ausencia de emisión UV es una característica muy positiva de las fuentes LED.

Dentro de este apartado, cabe destacar asimismo la posible existencia de correlación entre los niveles de emisión del alumbrado público exterior y la incidencia de determinados tipos de tumores (Kloog et al. 2008, 2009, 2011; Bauer et al. 2013; Haim and Portnov, 2013; Hurley et al. 2014; Rybnikova et al. 2016; Rybnikova & Portnov, 2016; Portnov et al. 2016; James et al. 2017). No existe certeza de que esta correlación sea consecuencia de una relación causal.

3.2. Situaciones que disminuyen el rendimiento visual y representan un riesgo para la salud.

Cualquier situación en la que una iluminación incorrectamente diseñada o instalada disminuya el rendimiento visual es susceptible de provocar daños a las personas. Ejemplos típicos son los efectos de deslumbramiento sobre peatones y conductores o la inadecuada iluminación de algunos tramos viarios. La instalación de fuentes LED debe hacerse siempre asegurando que los niveles de deslumbramiento se encuentran dentro de los límites aceptables, y teniendo en cuenta que estos efectos se agravan significativamente en personas de mayor edad. Son sin embargo muchos los factores que influyen en la conducción, además de la iluminación: el estado visual de la persona que conduce, su edad, experiencia previa y estado psicofísico, la velocidad, trazado de la vía, estado del pavimento y del vehículo, etc.

Los niveles aconsejados de iluminación viaria están recogidos en un amplio número de normativas, estándares y recomendaciones profesionales (CIE, 2000, 2010; CEN, 2004;

BSI, 2013; ILP, 2013) fruto de la investigación básica y de la experiencia acumulada en un siglo de iluminación eléctrica para el tráfico rodado. Sin embargo, los criterios tradicionales de iluminación están siendo hoy sometidos a una revisión profunda debida a los cambios derivados de la introducción de las nuevas tecnologías de iluminación de estado sólido (principalmente de tecnología LED). Los resultados sobre el papel de los niveles de iluminación en la seguridad vial son contradictorios. Estudios que muestran que un mayor nivel de iluminación está significativamente asociado a una mayor seguridad vial (CIE, 1992; Elvik, 1995; Beyer & Ker, 2009; Wanvik, 2009) contrastan con los resultados de estudios más recientes (Perkins et al. 2015; Steinbach et al. 2015). El macroestudio de Steinbach et al. (2015), en particular, ha encontrado que medidas de ahorro como el apagado del alumbrado público de forma permanente o a partir de ciertas horas, la regulación horaria de flujo, o el cambio de lámparas tradicionales de descarga a LED blancos, no tienen efectos significativos positivos ni negativos sobre la siniestralidad vial.

Como ejemplo en el ámbito laboral, se ha citado el parpadeo como factor que puede dar lugar a una percepción errónea del movimiento de un objeto o a distracción del observador

factores ambos que pueden ser inaceptables en determinados entornos de trabajo, especialmente si se usa maquinaria.

Este tipo de situaciones se analiza y regula en normas específicas de los ámbitos correspondientes y no es objeto de estudio detallado en este documento.

3.3. Otros aspectos relevantes vinculados a la percepción visual y el bienestar.

Desde el punto de vista de la ergonomía visual, los requisitos básicos para asegurar un adecuado rendimiento visual son relativamente bien conocidos y están recogidos en un amplio cuerpo de normas y recomendaciones, por lo que no son objeto de análisis en este documento.

Sí cabe mencionar, por su relevancia en la consecución de una atmósfera agradable y la consiguiente aceptabilidad social de las nuevas fuentes de luz de estado sólido, la conveniencia de que **relación entre la iluminancia y la temperatura de color** de las fuentes en las instalaciones de alumbrado exterior se mantenga **dentro de parámetros compatibles con las curvas de Kruithof** (Figura 7).

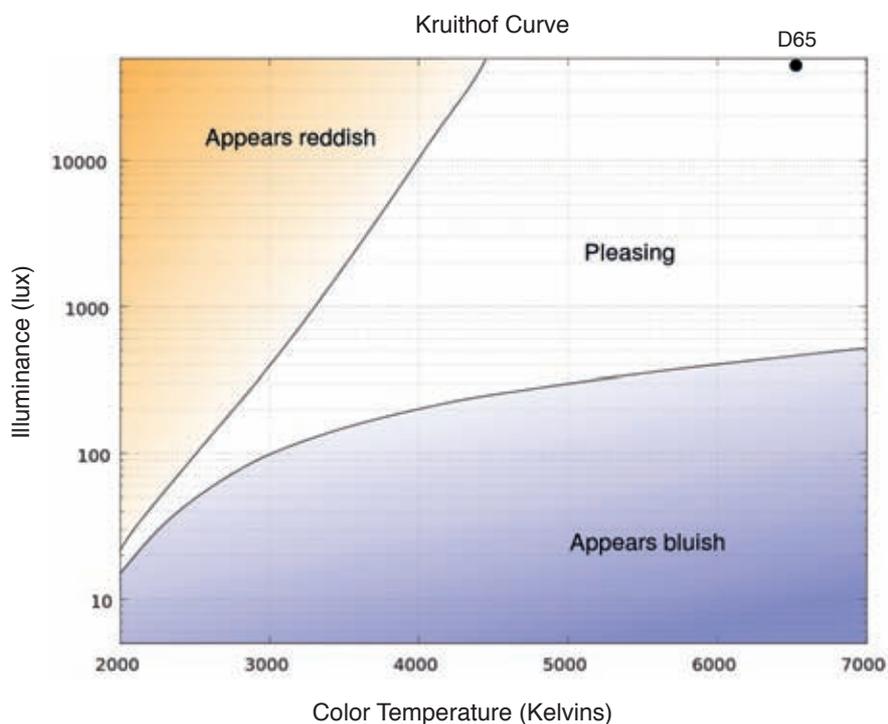


Figura 7: Regiones de aceptabilidad de Kruithof. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kruithof_curve_2.svg (Public domain)

D. Conclusiones y recomendaciones

1. Para mantener una buena salud es necesario que el sistema circadiano funcione correctamente. La luz es el principal sincronizador del sistema circadiano y por tanto, **es importante que el día sea día y la noche sea noche**, lo que implica hacer un uso adecuado de la iluminación tanto en el interior de edificios como en el exterior, y respetar un mínimo de horas de oscuridad.
2. Con carácter general, los niveles de iluminación habituales en interiores en horario diurno, si bien suficientes para asegurar el rendimiento visual, son notablemente inferiores a los encontrados en el medio natural. Por el contrario, en horas nocturnas y tanto en interiores como en el exterior, los niveles de iluminación artificial son sensiblemente superiores a los niveles naturales a los que nuestra biología está evolutivamente adaptada. Una iluminación saludable debe procurar **recuperar el contraste día-noche**, aumentando los primeros y disminuyendo los segundos.
3. La luz recibida a deshoras en cantidades o con composición espectral inadecuada es un elemento **disruptor del sistema de regulación circadiana**, con potenciales efectos negativos para la salud humana.
4. Los efectos de la luz sobre la fisiología humana dependen de **un gran número de factores**, entre ellos de la intensidad, el espectro, la duración de la exposición, el momento en el que ocurre, la forma de administrar la luz, la historia de exposiciones previas y la edad de la persona. A igualdad de otros factores, **la luz azul es mucho más eficaz que la de otras longitudes de onda para provocar efectos de importancia** sobre el sistema circadiano. Pero **estos efectos pueden ser provocados por luz de cualquier composición espectral, si su intensidad es suficiente**.
5. En cuanto a la iluminación nocturna en exteriores, **no debe primar sólo el criterio de la eficiencia energética**, por lo que se deben recomendar aquellas lámparas en cuyo espectro se encuentre **reducida la banda del azul, reduciendo la temperatura de color (CCT) del alumbrado público**. Además, se deben **disminuir los niveles de iluminación innecesariamente altos**.
6. A la hora de remodelar instalaciones de alumbrado exterior antiguas o proceder a nuevas instalaciones, teniendo en cuenta que a iguales niveles de luminancia la intensidad de los efectos negativos sobre las personas y el medio ambiente muestra un apreciable grado de correlación con la temperatura de color, tendiendo a aumentar significativamente al aumentar ésta (aunque con variaciones significativas, dependiendo de la tecnología), se debe prestar atención a que la nueva iluminación no cree efectos negativos sobre el sistema circadiano, usando **fuentes de luz con bajo contenido de luz azul** o sistemas variables que permitan disminuir tanto la temperatura de color como el nivel de iluminación a lo largo de la tarde noche **alcanzando los niveles más bajos posibles en las horas nocturnas**.
7. Los fabricantes deben **proporcionar el espectro de emisión** de sus lámparas y luminarias de igual modo que se informa de su eficacia luminosa o su eficiencia energética. De acuerdo con la opinión del SCENIHR (2012, p.11), a partir del dato de que aproximadamente 250000 ciudadanos de la UE presentan una elevada sensibilidad a la exposición a la luz UV/azul (SCENIHR, 2008), **dar información suficiente sobre el espectro de las lámparas** de uso general presentes en el mercado facilitará que tanto los profesionales de la salud como los pacientes puedan **elegir la solución óptima** de iluminación para cada caso.
8. Se recomienda mantener la **relación entre la iluminancia y la temperatura de color** de las fuentes en las instalaciones de alumbrado exterior **dentro de niveles compatibles con las curvas de Kruithof**.
9. Por otro lado, se hace imprescindible desarrollar una normativa para **evitar la intrusión del alumbrado público en el ámbito privado** que tenga en cuenta los **efectos sobre la salud humana** descritos en este documento. Los niveles máximos de luz intrusa establecidos en la ITC-EA-03 del R.D. 1890/2008, de 14 de noviembre, *por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07*, están expresados

- en magnitudes fotométricas, útiles para la caracterización de los efectos visuales de la luz, y deben ser escrupulosamente respetados, pero no son aplicables directamente a la prevención de efectos no deseados sobre la salud humana, que dependen de funciones de sensibilidad espectral diferentes de las $V(\lambda)$ fotópica o escotópica.
10. Las recomendaciones para alumbrado público son también de aplicación para iluminación en interiores. Es necesario desarrollar **tecnologías que minimicen la disrupción circadiana** en el hogar y en el trabajo, manteniendo el rendimiento visual requerido. En particular, a la vista de que la exposición a luz excesiva por la noche, incluyendo la debida al uso de pantallas luminiscentes, puede causar disrupción del sueño y agravar los desórdenes del mismo, especialmente en menores de edad, se recomienda **utilizar fuentes de luz con el mínimo contenido posible en la banda azul en horas nocturnas** (AMA, 2012).
 11. **Durante las horas diurnas**, en aquellos casos en los que no se pueda recurrir al uso de luz natural, se recomienda **eleva los niveles de iluminación** (iluminancias) **y la temperatura de color de las lámparas**, especialmente por la mañana, manteniendo la luminancia de las mismas dentro de límites seguros.
 12. Para la protección del sistema visual ante riesgos específicamente contemplados en la norma EN 62471, se deben establecer **límites legales al grupo de riesgo** de las lámparas que se pueden instalar en espacios interiores y exteriores para iluminación de propósito general. El grupo de riesgo debería ser evaluado utilizando la **función de peso espectral $A(\lambda)$** , y no la $B(\lambda)$ actualmente contemplada en la norma.
 13. Para protección frente a los riesgos fotooxidativos no contemplados en la norma EN 62471 (entre otros, la exposición aguda en períodos de tiempo superiores a 10000 s y la exposición crónica a niveles inferiores a los niveles máximos fijados en la norma), utilizar fuentes de luz con la **menor radiancia posible dentro de la banda de sensibilidad al daño por luz azul**.
 14. De acuerdo con las recomendaciones de la ANSES (2010, p.9), tanto los fabricantes, como la administración y laboratorios independientes deben evaluar cuantitativamente e informar del **desgaste de las capas de fósforos** de las fuentes pc-LED, que podría conducir, con el tiempo, a un nivel más elevado del grupo de riesgo fotobiológico.
 15. Los investigadores **deben unificar la forma en la que se cuantifica la luz** para facilitar comparaciones entre estudios o, alternativamente, incluir tanto medidas radiométricas como fotométricas.
 16. Muchos artículos publicados identifican la exposición a luz nocturna en humanos mediante imágenes por satélite del brillo reflejado, y apenas existen datos sobre la luz que reciben los sujetos a nivel individual, por lo que sería recomendable **avanzar en el estudio de la exposición a nivel individual** para establecer referencias.
 17. Muchos estudios experimentales sobre los efectos de la luz se llevan a cabo en animales nocturnos con una extrema sensibilidad a la luz y cuya secreción de melatonina está en fase con su periodo de actividad y no en antifase como en el caso de humanos por lo que **es posible que desconozcamos muchos de los efectos de la exposición a luz nocturna en especies diurnas**.
 18. Se deben dedicar **recursos suficientes y un esfuerzo especial de investigación** para dar respuesta a la falta de conocimiento sobre algunos aspectos relevantes de esta problemática, en particular los indicados en el apartado D de la opinión del SCENIHR (2012, p.12) y los descritos en el Plan de acción para la investigación de aplicaciones de iluminación saludable en interiores (CIE 218:2016).
 19. En tanto estos estudios no estén disponibles, **debe aplicarse el principio de precaución**, y tenemos la obligación de trabajar en el desarrollo de nuevas tecnologías de iluminación cronosaludables que salvaguarden nuestro reloj y no interfieran con los ritmos circadianos normales de los animales y plantas.

Referencias

- AMA, 2012. *Light Pollution: Adverse health effects of nighttime lighting*, en Proceedings of the American Medical Association House of Delegates, 161st Annual Meeting, Chicago, Illinois (USA) pp 265-279 (2012). Online: <http://www.ama-assn.org/ama/pub/about-ama/our-people/house-delegates/meeting-archives/2012-annual-meeting.page>.
- AMA, 2016. *Human and Environmental Effects of Light Emitting Diode (LED) Community Lighting*, en Proceedings of the American Medical Association House of Delegates meeting 2016, Council on Science and Public Health, CSA-PH Report 2-A-16.
- ANSES, 2010. *Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED)*. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES). Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective «Comité d'Experts Spécialisés (CES): Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements» Édition scientifique. Octobre 2010. <http://www.anses.fr/sites/default/files/documents/AP-2008sa0408.pdf>
- Aubé M, Roby J, Kocifaj M. Evaluating Potential Spectral Impacts of Various Artificial Lights on Melatonin Suppression, Photosynthesis, and Star Visibility. *PLoS ONE* 2013; 8:e67798.
- Barghini A. and Medeiros B.A.S. Artificial Lighting as a Vector Attractant and Cause of Disease Diffusion. *Environmental Health Perspectives* 118 (11) 2010: 1503-1506.
- Bauer SE, Wagner SE, Burch J, Bayakly R, Vena JE. A case-referent study: light at night and breast cancer risk in Georgia. *International Journal of Health Geographics* 2013;12:23. doi:10.1186/1476-072X-12-23
- Bellia L, Pedace A, and Barbato G. Indoor artificial lighting: Prediction of the circadian impact of different spectral power distributions. *Lighting Research and Technology* published online 1 August 2013. doi: 10.1177/1477153513495867
- Bellia L & Seraceni M. A proposal for a simplified model to evaluate the circadian effects of light sources. *Lighting Res. Technol.* 2014; Vol. 46: 493–505.
- Berson DM, Dunn FA, Takao M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. 2002. *Science*, 295:1070-1073.
- Beyer F, Ker K. 2009. Street lighting for preventing road traffic injuries. *Cochrane Database Syst Rev* 1:CD004728.
- Bonmati-Carrion MA, Arguelles-Prieto R, Martinez-Madrid MJ, Reiter R, Hardeland R, Rol MA, Madrid JA. Protecting the melatonin rhythm through circadian healthy light exposure. *International Journal of Molecular Sciences* 2014; 15: 23448-23500.
- Bonmati-Carrion MA, Baño-Otalora B, Madrid JA, Rol MA. Light color importance for circadian entrainment in a diurnal (*Octodon degus*) and a nocturnal (*Rattus norvegicus*) rodent. *Scientific Reports* 2017;7:8846. doi:10.1038/s41598-017-08691-7
- Bozek K, Relógio A, Kielbasa SM, Heine M, Dame C, Kramer A, Herzog H. Regulation of clock-controlled genes in mammals. *PLoS One*. 2009;4(3):e4882. doi: 10.1371/journal.pone.0004882.
- Brainard GC, Lewy AJ, Menaker M, Fredrickson RH, Miller LS, Weleber RG, Cassone V, and Hudson D. Dose-response relationship between light irradiance and the suppression of plasma melatonin in human volunteers. *Brain Research* 1988;454:212-218
- Brainard GC, Sliney D, Hanifin JP, Glickman G, Byrne B, Greeson JM, Jasser S, Gerner E, and Rollag MD. Sensitivity of the Human Circadian System to Short-Wavelength (420-nm) Light. *J Biol Rhythms* 2008;23:379-386. doi:10.1177/0748730408323089
- BSI, British Standards Institution. 2013. BS 5489 Code of practice for the design of road lighting. Lighting of roads and public amenity areas. London: British Standards Institution
- Cajochen C, Münch M, Kobiacka S, Kräuchi K, Steiner R, Oelhafen P, Orgül S, and Wirz-Justice A. High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength Light. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 2005; 90(3):1311–1316. doi: 10.1210/jc.2004-0957

- Cajochen C. Alerting effects of light. *Sleep Med Rev.* 2007;11:453-464.
- Cajochen C, Frey S, Anders D, Späti J, Bues M, Pross A, Mager R, Wirz-Justice A, Stefani O. Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance. *J Appl Physiol.* 2011;110:1432-1438.
- Castro MCM, Barrett TV, Santos WS, Abad-Franch F, Rafael JA. Attraction of Chagas disease vectors (Triatominae) to artificial light sources in the canopy of primary Amazon rainforest. *Mem Inst Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, Vol. 105(8): 1061-1064, December 2010.*
- CEN, European Committee for Standardization, 2004. CEN/TR 13201-1. Road Lighting – Part 1: Selection of Lighting Classes. Brussels: CEN.
- Chang A-M, Aeschbach D, Duffy JF, Czeisler CA. Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness. *Proc. of the Nat. Acad. Sci* 2015; 112(4):1232-1237. doi: 10.1073/pnas.1418490112.
- Chellappa SL, Steiner R, Blattner P, Oelhafen P, Götz T, et al. Non-Visual Effects of Light on Melatonin, Alertness and Cognitive Performance: Can Blue-Enriched Light Keep Us Alert? *PLoS ONE* 2011;6(1):e16429. doi:10.1371/journal.pone.0016429
- Cheung IN, Zee PC, Shalman D, Malkani RG, Kang J, Reid KJ. Morning and Evening Blue-Enriched Light Exposure Alters Metabolic Function in Normal Weight Adults. *PLoS ONE* 2016; 11(5):e0155601. doi:10.1371/journal.pone.0155601
- Cho K, Ennaceur A, Cole JC, Suh CK. Chronic jet lag produces cognitive deficits. 2000. *Neurosci.* 20: RC66.
- Cho JR, Joo EY, Koo DL, Hong SB. Let there be no light: the effect of bedside light on sleep quality and background electroencephalographic rhythms. *Sleep Med.* 2013 Dec;14(12):1422-5. doi: 10.1016/j.sleep.2013.09.007.
- Cho YM, Ryu SH, Lee BR, Kim KH, Lee E, Choi J. Effects of artificial light at night on human health: A literature review of observational and experimental studies applied to exposure assessment, *Chronobiology International* 2015;32(9):1294-1310. doi: 10.3109/07420528.2015.1073158
- Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D. The first world atlas of the artificial night sky brightness. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2001;328:689–707. doi: 10.1046/j.1365-8711.2001.04882.x.
- CIE, Commission Internationale de l'Éclairage, 1992. Road Lighting as an Accident Countermeasure. Publication No. CIE 93, Vienna: CIE.
- CIE, Commission Internationale de l'Éclairage. 2000. Road Lighting Calculations. CIE Publication 140–2000, Vienna: CIE.
- CIE, Commission Internationale de l'Éclairage. 2010. Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic. CIE Publication 115–2010, Vienna: CIE.
- CIE, Commission Internationale de l'Éclairage. CIE Publication TN 003:2015 Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry, 2013. Vienna : CIE, 2015.
- CIE, Commission Internationale de l'Éclairage. Publication CIE 218:2016 Research Roadmap for Healthful Interior Lighting Applications. Vienna : CIE, 2016. Versión en castellano: Informe Técnico CIE 218:2016 Plan de acción para la investigación de aplicaciones de iluminación saludable en interiores.
- Crowley SJ, Cain SW, Burns AC, Acebo C, Carskadon MA. Increased Sensitivity of the Circadian System to Light in Early/Mid-Puberty. *J Clin Endocrinol Metab.* 2015. Nov;100(11):4067-73. doi: 10.1210/jc.2015-2775.
- Czeisler CA. Perspective: casting light on sleep deficiency. *Nature.* 2013 May 23;497(7450):S13. doi: 10.1038/497S13a.
- Dacey DM, Liao HW, Peterson BB, Robinson FR, Smith VC, Pokorny J, Yau KW, Gamlin PD. Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN. *Nature.* 2005;433:749-754.
- Dauchy RT, Xiang S, Mao L, Brimer S, Wren MA, Yuan L, Anbalagan M, Hauch A, Frasch T, Rowan BG, Blask DE, Hill SM. Circadian and Melatonin Disruption by Exposure to Light at Night Drives Intrinsic Resistance to Tamoxifen Therapy in Breast Cancer. *Cancer Research* 2014; 74(15):4099-4110. doi: 10.1158/0008-5472.CAN-13-3156

- Davis S, Mirick DK, Stevens RG. 2001. Night shift work, light at night, and risk of breast cancer. *J Natl Cancer Inst.* 93: 1557-1562.
- Dewan K, Benloucif S, Reid K, Wolfe LF, Zee PC. Light-induced changes of the circadian clock of humans: increasing duration is more effective than increasing light intensity. *SLEEP* 2011;34(5):593-599.
- Dijk D-J, Archer SN (2009) Light, Sleep, and Circadian Rhythms: Together Again. *PLoS Biol* 7(6): e1000145. doi:10.1371/journal.pbio.1000145.
- Duffy JF, Kronauer RE, Czeisler CA. Phase-shifting human circadian rhythms: influence of sleep timing, social contact and light exposure. *Journal of Physiology* 1996; 495.1:289-297.
- Duffy JF, Czeisler CA. Effect of Light on Human Circadian Physiology. *Sleep Med Clin.* 2009; 4(2): 165–177. doi:10.1016/j.jsmc.2009.01.004.
- Elvik R. Meta-Analysis of Evaluations of Public Lighting as Accident Countermeasure. *Transport Research Record* 1485, 112–123.
- EN 62471:2008 *Photobiological safety of lamps and lamps systems*. Norma española: UNE-EN 62471:2009. Seguridad fotobiológica de lámparas y de los aparatos que utilizan lámparas.
- Erazo D & Cordovez J. The role of light in Chagas disease infection risk in Colombia. *Parasites & Vectors* (2016) 9:9 DOI 10.1186/s13071-015-1240-41.
- Erren TC, Reiter RJ. Preventing cancers caused by chronodisruption: blocking blue light alone is unlikely to do the trick. *Med Hypotheses.* 2009 Dec;73(6):1077-8. doi: 10.1016/j.mehy.2009.05.003.
- Erren TC, Reiter RJ. Light Hygiene: Time to make preventive use of insights--old and new--into the nexus of the drug light, melatonin, clocks, chronodisruption and public health. *Med Hypotheses.* 2009 Oct;73(4):537-41. doi: 10.1016/j.mehy.2009.06.003.
- Escofet J, Bará S. Reducing the circadian input from self-luminous devices using hardware filters and software applications. *Lighting Research and Technology*, 2015; Published online before print December 10, 2015. doi: 10.1177/1477153515621946.
- Falchi F, Cinzano P, Elvidge CD, Keith DM, Haim A. Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. *Journal of Environmental Management* 2011;92:2714e2722
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C.C.M., Elvidge, C.D., Baugh, K., Portnov, B.A., Rybnikova, N.A., Furgoni, R. 2016, The new world atlas of artificial night sky brightness. *Sci. Adv.* 2, e1600377. doi: 10.1126/sciadv.1600377.
- Figueiro MG, Bullough JD, Parsons RH, Rea MS. Preliminary evidence for a change in spectral sensitivity of the circadian system at night. *Journal of Circadian Rhythms* 2005;3:14. doi:10.1186/1740-3391-3-14
- Figueiro MG, Rea MS, Bullough JD. Circadian effectiveness of two polychromatic lights in suppressing human nocturnal melatonin. *Neuroscience Letters* 406 (2006) 293–297. doi:10.1016/j.neulet.2006.07.069
- Figueiro MG, Wood B, Plitnick B, Rea MS. The impact of light from computer monitors on melatonin levels in college students. *Neuroendocrinology Letters* 2011; 32(2): 158–163.
- Figueiro M, Overington D. Self-luminous devices and melatonin suppression in adolescents. *Lighting Res. Technol.* 2016; (48):966–975. Published online before print 6 May 2015, doi: 10.1177/1477153515584979.
- Fonken LK, Workman JL, Waltona JC, Weila ZM, Morris JS, Haim A, Nelson RJ. Light at night increases body mass by shifting the time of food intake. *Proc of the Nat Acad of Sci* 2010;107(43):18664–18669 doi:10.1073/pnas.1008734107
- Fonken LK, Aubrecht TG, Meléndez-Fernández OH, Weil ZM, Nelson RJ. Dim Light at Night Disrupts Molecular Circadian Rhythms and Increases Body Weight. *J Biol Rhythms* 2013;28: 262-271. doi: 10.1177/0748730413493862
- Fonken LK, Nelson RJ. The Effects of Light at Night on Circadian Clocks and Metabolism. *Endocrine Reviews*, 2014; 35(4):648–670. doi: 10.1210/er.2013-1051
- Gall D. Die messung circadianer strahlungsgrößen. In: *Viertes Symposium Licht und Gesundheit*, 26-27 February 2004, pp. 120-138. Berlin: Paul Kistmacher, 2004.

- Gall D, Bieske K. Definition and measurement of circadian radiometric quantities. In: Light and Health - Non-Visual Effects : Proceedings of the CIE Symposium '04 , 30 September - 2 October 2004, Vienna, Austria, pp. 129-132. Vienna : CIE, 2004.
- Garaulet, Marta; Madrid, Juan A Chronobiology, genetics and metabolic syndrome. *Curr Opin Lipidol.* 2009 Apr;20(2):127-34. doi: 10.1097/MOL.0b013e3283292399.
- Garaulet M & Madrid JA. Chronobiological aspects of nutrition, metabolic syndrome and obesity. *Adv Drug Deliv Rev.* 2010 Jul 31;62(9-10):967-78. doi: 10.1016/j.addr.2010.05.005.
- Gooley JJ, Lu J, Chou TC, Scammell TE, Saper CB. Melanopsin in cells of origin of the retinohypothalamic tract. *Nat Neurosci.* 2001;4:1165.
- Gooley JJ, Rajaratnam SMW, Brainard GC, Kronauer RE, Czeisler CA, Lockley SW. Spectral Responses of the Human Circadian System Depend on the Irradiance and Duration of Exposure to Light. *Science Translational Medicine* 2010; 2(31):31ra33. doi:10.1126/scitranslmed.3000741
- Gooley JJ, Chamberlain K, Smith KA, Khalsa SBS, Rajaratnam SMW, Van Reen E, Zeitzer JM, Czeisler CA, Lockley SW. Exposure to Room Light before Bedtime Suppresses Melatonin Onset and Shortens Melatonin Duration in Humans. *J Clin Endocrinol Metab* 2011;96(3):E463–E472. doi: 10.1210/jc.2010-2098
- Green A, Cohen-Zion M, Haim A, Dagan Y. Evening light exposure to computer screens disrupts human sleep, biological rhythms, and attention abilities. *Chronobiology International*, Published online: 26 May 2017. doi: 10.1080/07420528.2017.1324878
- Gringras P, Middleton B, Skene DJ and Revell VL. Bigger, Brighter, Bluer-Better? Current light-emitting devices – adverse sleep properties and preventative strategies. *Front. Public Health* 2015;3:233. doi: 10.3389/fpubh.2015.00233
- Gronfier C, Wright Jr. KP, Kronauer RE, Jewett ME, Czeisler CA. Efficacy of a single sequence of intermittent bright light pulses for delaying circadian phase in humans. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2004; 287: E174–E181, 2004. First published March 23, 2004; doi: 10.1152/ajpendo.00385.2003.
- Haim A, Portnov B. *Light Pollution as a New Risk Factor for Human Breast and Prostate Cancers.* 2013, Springer : Heidelberg. doi:10.1007/978-94-007-6220-6.
- Hardeland R, Madrid JA, Tan DX, Reiter RJ. Melatonin, the circadian multioscillator system and health: the need for detailed analyses of peripheral melatonin signaling. *J Pineal Res.* 2012 Mar;52(2):139-66. doi:10.1111/j.1600-079X.2011.00934.x.
- Hatori M, Gronfier C, Van Gelder RN, Bernstein PS, Carreras J, Panda S, Marks F, Sliney D, Hunt CE, Hirota T, Fukurawa T, Tsubota K. Global rise of potential health hazards caused by blue light-induced circadian disruption in modern aging societies. *npj Aging and Mechanisms of Disease* 2017; 3:9 ; doi:10.1038/s41514-017-0010-2
- Hébert H, Martin SK, Lee C, Eastman CI. The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans. *J Pineal Res.* 2002;33(4):198–203.
- Higuchi S, Lee SI, Kozaki T, Harada T, Tanaka I. Late circadian phase in adults and children is correlated with use of high color temperature light at home at night, *Chronobiology International* 2016. doi: 10.3109/07420528.2016.1152978
- Hurley S, Goldberg D, Nelson D, Hertz A, Horn-Ross PL, Bernstein L, Reynolds P. Light at night and breast cancer risk among California teachers. *Epidemiology* 2014;25:697–706.
- IARC, 2010. *Painting, firefighting, and shiftwork: IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, v. 98.* International Agency for Research on Cancer. World Health Organization (WHO) Lyon, France, (2010), p. 764. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol98/mono98.pdf>.
- IARC, 2006. *Preamble to the IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans.* International Agency for Research on Cancer, World Health Organization (WHO) Lyon, France, (2006). <http://monographs.iarc.fr/ENG/Preamble/CurrentPreamble.pdf>.
- ICNIRP, 2013. Guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, *Health Phys.* 105(1):74Y96; 2013. DOI: 10.1097/HP.0b013e318289a611.

- ILP, Institution of Lighting Professionals. 2013. PLG 08: guidance on the application of adaptive lighting within the public realm. Professional lighting guide. Rugby, Warwickshire: ILP.
- Jaadane I, Villalpando Rodriguez GE, Boulenguez P, Chahory S, Carr S, Savoldelli M, Jonet L, Behar-Cohen F, Martinsons C, Torriglia A. Effects of white light-emitting diode (LED) exposure on retinal pigment epithelium in vivo. *J. Cell. Mol. Med.* Vol XX, No X, 2017 pp. 1-14
- James P, Bertrand KA, Hart JE, Schernhammer ES, Tamimi RM, Laden F. Outdoor Light at Night and Breast Cancer Incidence in the Nurses' Health Study II. *Environmental Health Perspectives* 2017. 087010, doi: 10.1289/EHP935
- Kantermann T. Circadian biology: sleep-styles shaped by light-styles. *Curr Biol.* 2013 Aug 19;23(16):R689-90. doi: 10.1016/j.cub.2013.06.065.
- Kang SG, Yoon HK, Cho CH, Kwon S, Kang J, Park YM, Lee E, Kim L, Lee HG. Decrease in fMRI brain activation during working memory performed after sleeping under 10 lux light. *Scientific Reports* 2016;6:36731. doi: 10.1038/srep36731
- Kloog I, Haim A, Stevens RG, Barchana M, Portnov BA. Light at night co-distributes with incident breast but not lung cancer in the female population of Israel. *Chronobiol Int.* 2008 Feb; 25(1):65-81. doi: 10.1080/07420520801921572.
- Kloog I, Haim A, Stevens RG, Portnov BA. Global co-distribution of light at night (LAN) and cancers of prostate, colon, and lung in men. *Chronobiol Int.* 2009 Jan; 26(1):108-25. doi: 10.1080/07420520802694020.
- Kloog I, Portnov BA, Rennert HS, Haim A. Does the Modern Urbanized Sleeping Habitat Pose a Breast Cancer Risk?. *Chronobiology International* 2011; 28(1):76–80. doi: 10.3109/07420528.2010.531490
- Kondratov RV. A role of the circadian system and circadian proteins in aging. 2007. *Ageing Res Rev.* 6: 12-27.
- Kozakov R, Schoepp H. Proposal for the standard evaluation procedure for non-visual action of light. *J. Light & Vis. Env.* 2011; 35(3):274-277.
- Kriegel A, Berdugo M, Picard E, Levy-Boukris R, Jaadane I, Jonet L, Dernigoghossian M, Andrieu-Soler C, Torriglia A., Behar-Cohen F. Light-induced retinal damage using different light sources, protocols and rat strains reveals LED phototoxicity. *Neuroscience* 339 (2016) 296–307. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroscience.2016.10.015>
- Kubo T, Ozasa K, Mikami K, Wakai K, Fujino Y, Watanabe Y, Miki T, Nakao M, Hayashi K, Suzuki K, Mori M, Washio M, Sakauchi F, Ito Y, Yoshimura T, Tamakoshi A. Prospective cohort study of the risk of prostate cancer among rotating-shift workers: findings from the Japan collaborative cohort study. 2006. *Am J Epidemiol.* 164(6): 549-555.
- Lockley SW, Brainard GC, Czeisler CA. High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 2003; 88(9):4502–4505. doi: 10.1210/jc.2003-030570
- Lucas RJ, Peirson SN, Berson DM, Brown TM, Cooper HM, Czeisler CA, Figueiro MG, Gamlin PD, Lockley SW, O'Hagan HB, Price LLA, Provencio I, Skene DJ, Brainard GC. Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends in Neurosciences* 2014; 37: 1-9.
- Lunn RM, Blask DE, Coogan AN, Figueiro MG, et al. Health consequences of electric lighting practices in the modern world: A report on the National Toxicology Program's workshop on shift work at night, artificial light at night, and circadian disruption. *Science of the Total Environment* 607–608 (2017) 1073–1084. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.07.056
- Madrid-Navarro CJ, Sanchez-Galvez R, Martinez-Nicolas A, Marina R, Garcia JA, Madrid JA, Rol MA. Disruption of Circadian Rhythms and Delirium, Sleep Impairment and Sepsis in Critically ill Patients. Potential Therapeutic Implications for Increased Light-Dark Contrast and Melatonin Therapy in an ICU Environment. *Curr Pharm Des.* 2015;21(24):3453-68.
- Mehta R & Zhu RJ. Blue or red? Exploring the effect of color on cognitive task performances. *Science.* 2009 Feb 27;323(5918):1226-9. doi:10.1126/science.1169144.
- Meng Y, He Z, Yin J, Zhang Y, Zhang T. Quantitative calculation of human melatonin suppression induced by inappropriate light at night. *Med Biol Eng Comput* (2011) 49:1083–1088.

- Miller CL, White R, Whitman TL, O'Callaghan MF, Maxwell SE. The effects of cycled versus non-cycled lighting on growth and development in preterm infants. *Infant behavior and development* 1995; 18: 87-95.
- Münch M, Kobiacka S, Steiner R, Oelhafen P, Wirz-Justice A, Cajochen C. Wavelength-dependent effects of evening light exposure on sleep architecture and sleep EEG power density in men. *Am J Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2006;290:R1421-R1428.
- Najjar RP, Chiquet C, Teikari P, Cornut PL, Claustrat B, Denis P, Cooper HM, Gronfier C. Aging of Non-Visual Spectral Sensitivity to Light in Humans: Compensatory Mechanisms? *PLoS ONE*. 2014;9(1):e85837. doi:10.1371/journal.pone.0085837.
- Oh JH, Yoo H, Park HK, Do YR. Analysis of circadian properties and healthy levels of blue light from smartphones at night. *Scientific Reports* 2015; 11325. doi: 10.1038/srep11325.
- Ortin-Martinez A, Valiente-Soriano FJ, Garcia-Ayuso D, Alarcón-Martinez L, Jimenez-Lopez M, Bernal-Garro JM, Nieto-Lopez L, Nadal-Nicolas FM, Villegas-Perez MP, Wheeler LA, Vidal-Sanz M (2014) A novel in vivo model of focal light emitting diode-induced cone-photoreceptor phototoxicity: neuroprotection afforded by brimonidine, BDNF, PEDF or bFGF. *PLoS One* 9:e113798
- Pacheco-Tucuch FS, Ramirez-Sierra MJ, Gourbière S, Dumonteil E (2012) Public Street Lights Increase House Infestation by the Chagas Disease Vector *Triatoma dimidiata*. *PLoS ONE* 7(4): e36207. doi:10.1371/journal.pone.0036207.
- Pandi-Perumal SR, Moscovitch A, Srinivasan V, Spence DW, Cardinali DP, Brown GM. Bidirectional communication between sleep and circadian rhythms and its implications for depression: lessons from agomelatine. *Prog Neurobiol.* 2009. Aug;88(4):264-71. doi: 10.1016/j.pneurobio.2009.04.007.
- Pauley SM. Lighting for the human circadian clock: recent research indicates that lighting has become a public health issue. *Med Hypotheses*. 2004;63(4):588-96.
- Perkins C, Steinbach R, Tompson L, Green J, Johnson S, Grundy C, Wilkinson P, Edwards P. 2015. What is the effect of reduced street lighting on crime and road traffic injuries at night? A mixed-methods study. *Public Health Research* 3, 11 National Institute for Health Research.
- Portnov BA, Stevens RG, Samociuk H, Wakefield D, Gregorio DI. Light at night and breast cancer incidence in Connecticut: An ecological study of age group effects. *Science of The Total Environment*, Volume 572, 1 December 2016, Pages 1020–1024. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.006>.
- Potter GDM, Skene DJ, Arendt J, Cade JE, Grant PJ, Hardie LJ. Circadian Rhythm and Sleep Disruption: Causes, Metabolic Consequences and Countermeasures. *Endocrine Reviews* 2016; 1-27. doi: 10.1210/er.2016-1083
- R.D. 1890/2008, de 14 de noviembre, *por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07*, B.O.E. núm. 279 de 19 noviembre de 2008.
- Rahman SA, St. Hilaire MA, Chang A-M, Santhi N, Duffy JF, Kronauer RE, Czeisler CA, Lockley SW, Klerman EB. Circadian phase resetting by a single short-duration light exposure. *JCI Insight*. 2017;2(7):e89494. doi: 10.1172/jci.insight.89494.
- Rea MS, Figueiro MG, Bullough JD, Bierman A. A model of phototransduction by the human circadian system. *Brain Research Reviews* 2005; 50:213–228.
- Rea MS, Smith A, Bierman A, Figueiro MG. The potential of outdoor lighting for stimulating the human circadian system. Prepared for the Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies (ASSIST). Publish Date: Revised December 11, 2012 (original May 13, 2010)
- Rea MS, Figueiro MG, Bierman A, Hamner R. Modeling the spectral sensitivity of the human circadian system. *Lighting Research & Technology* 2012; 44:386–396. Corrigendum: *Lighting Research & Technology* 2012; 44:516.
- Rea MS, Figueiro MG. Light as a circadian stimulus for architectural lighting. *Lighting Research & Technology* 2016. First published online December 6, 2016. doi: 10.1177/1477153516682368.

- Reiter RJ, Tan DX, Korkmaz A, Erren TC, Piekarski C, Tamura H, Manchester LC. Light at night, chronodisruption, melatonin suppression, and cancer risk: a review. 2007. *Crit Rev Oncog*.13: 303-328.
- Reiter RJ, Tan DX, Erren TC, Fuentes-Broto L, Paredes SD. Light-Mediated Perturbations of Circadian Timing and Cancer Risk: A Mechanistic Analysis. *Integrative Cancer Therapies* 2009;8(4):354–360. doi: 10.1177/1534735409352026
- Revell VL, Arendt J, Terman M, Skene DJ. Short-Wavelength Sensitivity of the Human Circadian System to Phase-Advancing Light. *J Biol Rhythms* 2005;20:270-272. doi: 10.1177/0748730405275655
- Revell VL, Skene DJ. Light-induced melatonin suppression in humans with polychromatic and monochromatic light. *Chronobiology International* 2017; 24(6):1125–1137. doi: 10.1080/07420520701800652
- Rivkees SA. Emergence and influences of circadian rhythmicity in infants. *Clin Perinatol*. 2004 Jun;31(2):217-28, v-vi.
- Rybnikova NA, Haim A, and Portnov BA (2016). Is prostate cancer incidence worldwide linked to artificial light at night exposures? Review of earlier findings and analysis of current trends. *Archives of Environmental & Occupational Health*, DOI: 10.1080/19338244.2016.1169980.
- Rybnikova NA & Portnov BA (2016): Outdoor light and breast cancer incidence: a comparative analysis of DMSP and VIIRS-DNB satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, DOI: 10.1080/01431161.2016.1246778.
- Sack RL, Auckley D, Auger RR, Carskadon MA, Wright Jr KP, Vitiello MV, Zhdanova IV. Circadian Rhythm Sleep Disorders: Part II, Advanced Sleep Phase Disorder, Delayed Sleep Phase Disorder, Free-Running Disorder, and Irregular Sleep-Wake Rhythm. *SLEEP* 2007;30(11):1484-1501
- SCENIHR, 2008. (Scientific Committee on Emerging and Newly-Identified Health Risks), *Scientific opinion on light sensitivity*, 23 September 2008.
- SCENIHR, 2012. (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks). *Health effects of artificial light*, 19 March 2012.
- http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenih_r_o_035.pdf
- SCHEER (Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks), Preliminary Opinion on Potential risks to human health of Light Emitting Diodes (LEDs), 6 July 2017.
- Schernhammer ES, Laden F, Speizer FE, Willett WC, Hunter DJ, Kawachi I, Fuchs CS, Colditz GA. Night-shift work and risk of colorectal cancer in the nurses' health study. 2003. *J Natl. Cancer Inst*. 95: 825-828.
- Schulz P &Steimer T. Neurobiology of circadian systems. *CNS Drugs*. 2009;23Suppl 2:3-13. doi: 10.2165/11318620-000000000-00000.
- Schmidt TM, Chen SK, Hattar S. Intrinsicly photosensitive retinal ganglion cells: many subtypes, diverse functions. *Trends Neurosci*. 2011;34:572-580.
- Smith KA, Schoen MW, Czeisler CA. Adaptation of Human Pineal Melatonin Suppression by Recent Photic History. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 2004;89(7):3610–3614. doi: 10.1210/jc.2003-032100
- Smith MR, Revell VL, Eastman CI. Phase advancing the human circadian clock with blue-enriched polychromatic light. *Sleep Medicine* 2009;10:287–294. doi:10.1016/j.sleep.2008.05.005
- Smolensky MH, Sackett-Lundeen LL, Portaluppi F. Nocturnal light pollution and underexposure to daytime sunlight: Complementary mechanisms of circadian disruption and related diseases, *Chronobiology International* 2015;32(8):1029-1048. doi: 10.3109/07420528.2015.1072002
- Smolensky MH, Hermida RC, Reinberg A, Sackett-Lundeen L, Portaluppi F. (2016). Circadian disruption: New clinical perspective of disease pathology and basis for chronotherapeutic intervention, *Chronobiology International*, doi: 10.1080/07420528.2016.1184678
- Steinbach R, Perkins C, Tompson L, et al. The effect of reduced street lighting on road casualties and crime in England and Wales: controlled interrupted time series

- analysis. *J Epidemiol Community Health* 2015; 69:1118-1124. doi:10.1136/jech-2015-206012.
- Stevens RG, Rea MS. Light in the built environment: potential role of circadian disruption in endocrine disruption and breast cancer. *Cancer Causes and Control* 2001;12:279-287.
- Stevens RG, Blask DE, Brainard GC, Hansen J, Lockley SW, Provencio I, Rea MS, Reinlib L. Meeting Report: The Role of Environmental Lighting and Circadian Disruption in Cancer and Other Diseases. *Environmental Health Perspectives* 2007; 115(9): 1357-1362.
- Stevens RG. Light-at-night, circadian disruption and breast cancer: assessment of existing evidence. *International Journal of Epidemiology* 2009;38:963–970. doi:10.1093/ije/dyp178
- Stevens RG, Brainard GC, Blask DE, Lockley SW, Motta ME. Adverse Health Effects of Nighttime Lighting: Comments on American Medical Association Policy Statement. *Am J Prev Med* 2013;45(3):343–346. doi:10.1016/j.amepre.2013.04.011
- Stevens RG, Brainard GC, Blask DE, Lockley SW, Motta ME. Breast Cancer and Circadian Disruption From Electric Lighting in the Modern World. *CA Cancer J Clin* 2014;64:207–218. doi: 10.3322/caac.21218
- Stevens RG, Zhu Y. Electric light, particularly at night, disrupts human circadian rhythmicity: is that a problem? *Phil. Trans. R. Soc. B* 2015; 370: 20140120. doi: 10.1098/rstb.2014.0120
- Sui G, Liu G, Liu G, et al. Is sunlight exposure a risk factor for age-related macular degeneration? A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Ophthalmology* 2013;97:389-394.
- Touitou Y, Reinberg A, Touitou D. Association between light at night, melatonin secretion, sleep deprivation, and the internal clock: Health impacts and mechanisms of circadian disruption. *Life Sci.* 2017 Mar 15;173:94-106. doi: 10.1016/j.lfs.2017.02.008.
- Touitou Y. The double face of light effects: circadian adjustment or disruption. *J Basic Clin Physiol Pharmacol* 2017; 28(4): 293–294. doi:10.1515/jbcpp-2017-0093
- Turner PL, Mainster MA. Circadian photoreception: ageing and the eye's important role in systemic health. *Br J Ophthalmol.* 2008 Nov;92(11):1439-44. doi: 10.1136/bjo.2008.141747.
- Vandewalle G, Maquet P, Dijk DJ. Light as a modulator of cognitive brain function. *Trends Cogn Sci.* 2009;13:429-438.
- Wanvik PO. Effects of road lighting: An analysis based on Dutch accident statistics 1987–2006. *Accident Analysis and Prevention* 41 (2009) 123–128. doi:10.1016/j.aap.2008.10.003
- West KE, Jablonski MR, Warfield B, Cecil KS, James M, Ayers MA, Maida J, Bowen C, Sliney DH, Rollag MD, Hanifin JP, Brainard GC. Blue light from light-emitting diodes elicits a dose-dependent suppression of melatonin in humans. *J Appl Physiol* (1985). 2011 Mar;110(3):619-26. doi: 10.1152/jappphysiol.01413.2009.
- Wood B, Rea MS, Plitnick B, Figueiro MG. Light level and duration of exposure determine the impact of self-luminous tablets on melatonin suppression. *Applied Ergonomics* 2013;44:237e240. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2012.07.008>
- Zeitler JM, Dijk DJ, Kronauer R, Brown E., Czeisler C. Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression. *Journal of Physiology*, Aug 1 2000;526(3):695-702.
- Zeitler JM, Khalsa SBS, Boivin DB, Duffy JF, Shanahan TL, Kronauer RE, Czeisler CA. Temporal dynamics of late-night photic stimulation of the human circadian timing system. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 2005;289:R839–R844. First published May 12, 2005; doi:10.1152/ajpregu.00232.2005
- Zornoza-Moreno M, Fuentes-Hernández S, Sánchez-Solis M, Rol MÁ, Larqué E, Madrid JA. Assessment of circadian rhythms of both skin temperature and motor activity in infants during the first 6 months of life. *Chronobiol Int.* 2011 May;28(4):330-7. doi: 10.3109/07420528.2011.565895.
- Zubidat AE, Haim A. Artificial light-at-night – a novel lifestyle risk factor for metabolic disorder and cancer morbidity. *J Basic Clin Physiol Pharmacol* 2017; 28(4): 295–313. doi: 10.1515/jbcpp-2016-0116

3

DOCUMENTO

**Grupo de trabajo Comité Español de Iluminación sobre los
posibles riesgos de la iluminación LED**
**Consideraciones Sobre los Efectos de la Luz en el Ecosistema
Nocturno**

Redactores:

Manuel Garcia Gil, Generalitat de Catalunya
Joaquín Baixeras Almela, Universitat de València
Ángel Morales Rubio, Universitat de València
Alejandro Sánchez de Miguel, University of Exeter

Integrantes de la Red Española de Estudios sobre la Contaminación Lumínica



Contenido

1. Introducción	83
2. Adaptación del ecosistema a la oscuridad natural	84
3. Efectos sobre los seres vivos	85
4. Cuantificación de niveles lumínicos y consideraciones espectrales	91
5. Luz intrusa directa e indirecta	95
6. Recomendaciones en el uso de lámparas TIPO PC-LED para minimizar las repercusiones en los ecosistemas	96

Introducción

El presente documento tiene como objetivo presentar una descripción de los efectos de la iluminación artificial sobre el ecosistema natural nocturno, para mostrar los posibles riesgos de una transición de iluminación principalmente basada en fuentes de luz de tipo vapor de sodio, a otras de mayor componente en onda corta (como pudieran ser los basados en semiconductores eléctricos, conocidos como ledes).

Por otro lado, se ponen de manifiesto las relaciones de los sistemas lumínicos con los seres vivos, tanto en niveles lumínicos que pueden generar una repercusión, como en las consideraciones conocidas sobre el espectro lumínico.

También se presenta la problemática de conocer el alcance de la contaminación lumínica, no solo por luz intrusa directa, sino también por conducción indirecta, es decir, por reflexión en la cúpula celeste. Este efecto genera niveles lumínicos residuales de fondo que pueden alterar a decenas de kilómetros los ecosistemas más sensibles.

En el momento de redacción del presente documento, la inclusión de una nueva tecnología en las fuentes de iluminación, basada en semiconductores tipo PC-LED, representa un cambio de paradigma en el mundo de las instalaciones de alumbrado y sus repercusiones asociadas:

- Aumento de la vida útil de la fuente de luz
- Mejora de la eficacia luminosa, la utilancia en proyecto, y mejoras en la gestión, que ocasiona una reducción del consumo energético.
- Facilidad de la inclusión de fuentes de luz de espectro de emisión diferente a las de vapor de sodio a alta presión, y que son mayoritarias en las instalaciones actuales.
- Desconocimiento de las repercusiones globales de este cambio.

En el último punto de este documento, se presentan algunas recomendaciones asociadas a las características de las instalaciones tipos PC-LED, según el conocimiento actual de sus repercusiones en el ecosistema.



2. Adaptación del ecosistema a la oscuridad natural



La radiación solar ha estado presente en nuestro planeta desde el primer momento. Casi cualquier célula puede considerarse fotosensible. Los seres vivos en el ecosistema se han adaptado y evolucionado bajo las variadas condiciones físicas del planeta, tanto en lo referente a su localización geográfica, a variables temporales y las condiciones astronómicas o climáticas. Un ejemplo bien conocido son las especies vegetales de climas estacionales, que reconocen cuando han de iniciar la floración por el aumento de horas de Sol (primavera) e igualmente entran en hibernación cuando se acorta el día (en otoño - invierno) (Gaston, Duffy et al. 2014).

La alternancia entre noche y día se ha establecido como una necesidad esencial en el funcionamiento de los ecosistemas (Minnaar, Boyles et al. 2014). Podemos decir que casi cualquier ecosistema que durante el día recibe luz, por la noche alterna su actividad; tenemos en cierto modo dos ecosistemas en uno. Cada organismo encaja dentro de este ciclo diario de acuerdo con sus características: un compromiso necesario entre (Rich and Longcore 2006):

- Vigilia e inactividad
- Descanso y trabajo
- Refrigerar y calentar
- Etc.

La intrusión de luz artificial en los ecosistemas durante la noche representa un factor de distorsión de las condiciones naturales, debido al incremento de radiación en los órganos o células sensibles. Los efectos, con carácter general, pueden ir desde una interferencia ligera, apenas perceptible o simplemente asimilable por los organismos, hasta una situación claramente

perjudicial, con una modificación severa de la conducta que hace disminuir la posibilidad de supervivencia (dificultando el desarrollo de sus actividades de alimentación, movilidad, reproducción, etc.) o expone la especie a depredación, etc. (Longcore 2004). Las repercusiones directas sobre las poblaciones son las típicas de cualquier elemento nocivo para los ecosistemas: fragmentación de las poblaciones por elementos barrera, que crean islas de colonias, disminución de las colonias que dificultan su actividad y el aumento de las necesidades energéticas, indeseables para la fase selectiva que puede favorecer a unas especies respecto a otras, en definitiva creando desequilibrios indeseados (Lacoeuille, Machon et al. 2014).

La forma de abordar el conocimiento de los efectos de la intrusión lumínica, es realizando una predicción del impacto ambiental. En ésta, se tiene que tener en cuenta la situación inicial, y la modificación del entorno sujeto a estudio. Por lo tanto, es importante conocer:

- Alcance, características y situación del entorno de análisis.
- Sensibilidad del entorno.
- Estado inicial de entorno.
- Previsión de la modificación de estado futuro en el ambiente y efectos sobre el ecosistema (en este caso objeto del documento).
- Predicción del impacto ambiental.

En procedimientos administrativos, se suelen realizar Declaraciones de Impacto Ambiental, valorando diferentes alternativas, y formulando medidas mitigadoras de los efectos sobre el medio ambiente, si fuera el caso. Prima siempre el principio de prevención.

3. Efectos sobre los seres vivos

A continuación, se presenta una recopilación de algunos de los efectos de la luz intrusa sobre los seres vivos:

- **Efectos sobre los insectos:** Los insectos son la fuente principal de biomasa y proteínas animales de los ecosistemas terrestres. Representan el grupo animal con mayor número de especies y son intermediarios notables en la cadena trófica. Su actividad es básicamente nocturna (Macgregor, Pocock et al. 2014); la mayor parte de ellos son buenos voladores. Utilizan la luz del firmamento como referencia de navegación y sus sistemas visuales están adaptados a bajísimos niveles de luz. Los elementos de iluminación artificial actúan como un superestímulo; los insectos afectados sustituyen las luces naturales del cielo nocturno por las luces artificiales y su navegación se ve fuertemente interferida. Los efectos de la luz artificial sobre este grupo animal son variados, así, podemos enumerar:
 - **Efectos de fijación o captación:** Los insectos al desplazarse se sienten cautivos de la luz o puntos brillantes. Pueden morir por impacto o por pérdida energética (agotamiento). Otros simplemente se quedan inmobilizados quedándose fijados ante la luz. Hay afectación de todo tipo de luces, desde el vapor de mercurio al vapor de sodio a alta presión, tungsteno, halógeno, etc. y hay estudios donde se prevé un auge importantísimo de la problemática si se introduce luz blanca (Davies, Bennie et al. 2012).
 - **Efecto barrera:** Muchos insectos presentan hábitos migradores. También ante los puntos brillantes, o de alta

luminancia, los insectos en sus movimientos de larga distancia se ven obstaculizados por la “barrera de luz” y se ven atrapados por ella como en el efecto anterior, pudiendo evitar o retardar su migración.

- **Pérdida de visión:** Una exposición a luz intensa, puede hacer perder la capacidad visual del insecto durante un periodo de tiempo de hasta 30 minutos, por saturación de sus receptores sensoriales.
- **Oviposición:** Las hembras, se pueden ver traídas por la luz y ponen sus huevos cerca de esta, no en los lugares adecuados.
- **Reproducción:** Depende de las especies, se puede suprimir la emisión de feromonas o dificultar la actividad de atracción durante la reproducción. Al ser animales de vida relativamente breve, pequeñas alteraciones en su actividad de acuerdo con nuestra percepción, representan un enorme desaprovechamiento de acuerdo con su vida media, limitando de manera clara sus oportunidades e implica enormes costos poblacionales. Se ha documentado que el alumbrado interfiere en los mensajes reproductivos entre luciérnagas de los dos sexos. Su ciclo se ve afectado para niveles lumínicos superiores a 0,18 lx y claramente distorsionados para niveles superiores a 0,3 lx. (Bird 2014) e independientemente de si son luces blancas o de vapor de sodio a alta presión (Hagen, Machado Santos et al. 2015).

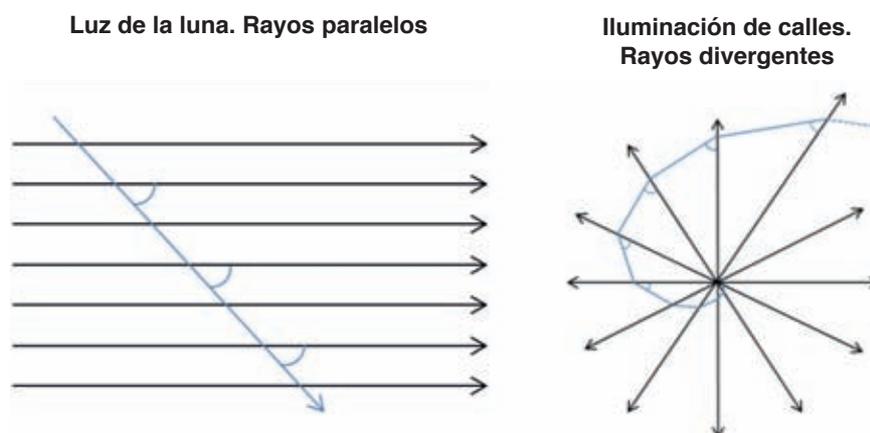


Figura 1. Pérdida de orientación por confusión de la ubicación de la Luna ante otro elemento brillante. Figura desarrollada a partir de (Rich and Longcore 2006)

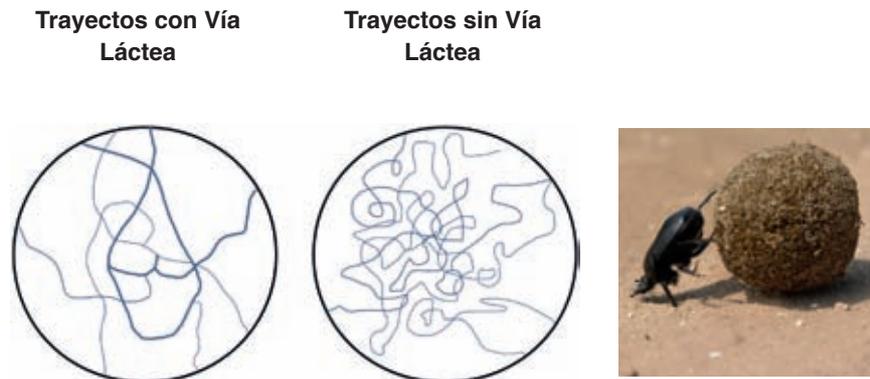


Figura 2. Imagen de los experimentos realizados en el artículo “Dung Beetles use the Milky Way for orientation”. Reconstrucción a partir de (Dacke, Baird et al. 2013)

- **Navegación:** Como hemos dicho antes muchos insectos utilizan la luz de la luna y estrellas para orientarse y una fuente de luz de luminancia exterior, genera interferencia con sus sistemas de navegación, provocando desorientación del animal (Froy 2003). La urbanización es una causa clara de desaparición de insectos en áreas habitadas y cercanas a ellas (Bates 2014).

Estos efectos dependen de diferentes factores: Las luminarias en altura tienen efectos más importantes cuando hay Luna nueva y puede ver ser un efecto contaminante en un radio de 400 metros.

Quizás uno de los casos más espectaculares es el de los escarabajos peloteros. Éstos usan la Vía Láctea para orientarse y volver a su guarida. (Dacke, Baird et al. 2013).

- **Incremento de la actividad de insectos y otros artrópodos:** Esto puede generar favorecimiento a especies, que tengan mayor tamaño. Un estudio demuestra que insectos depredadores pueden incrementar su tamaño medio al verse favorecida su actividad de alimentación. Esto pasa por ejemplo con las arañas (Lowe, Wilder et al. 2014):

- **Efectos sobre polinizadores:** Aunque existen aves (colibríes) y algunos murciélagos tropicales que pueden contribuir a la polinización, y algunas plantas no se polinizan mediante insectos, en términos generales la contribución

de los insectos a este proceso puede considerarse abrumadora. La preocupación creciente por el declive de los polinizadores en los medios agrícolas y forestales solo es comparable a la del cambio climático. De entre los estudios recientes en CL cabe destacar la importancia del descubrimiento de que una parte de responsabilidad de este declive hay que buscarlo en la CL. Muchas flores utilizan tanto a los diurnos (mayormente abejas, moscas y mariposas) como a los nocturnos (principalmente mariposas); algunas flores utilizarán solo diurnos y otras solo nocturnos. La variedad es enorme. Los polinizadores pueden estar especializados -o no- en determinados néctares. Las flores pueden estar -o no- especializadas en determinadas especies. Todo ello es expresión de una complicada red de relaciones entre flores y polinizadores. Las flores ofrecen néctar y los polinizadores compiten de acuerdo a sus posibilidades. Este proceso se lleva a cabo al mismo tiempo durante el día y la noche, que representan dos servicios de néctar servidos muchas veces por las mismas flores, pero a distintos polinizadores. Si un polinizador nocturno A se ve afectado por la contaminación lumínica a la mañana siguiente otro polinizador B puede utilizar este néctar. Pero este polinizador B puede ser necesario para una planta diurna con lo que esta planta puede quedar progresivamente sin oportunidades de polinización. De forma que las plantas especialistas verán dañadas sus poblaciones de manera indirecta (Macgregor, Evans et al. 2016, Knop, Zoller et al. 2017)

Efectos sobre vertebrados: Los vertebrados más basales (peces) son en buena medida dependientes de la luz. La mayor parte de los reptiles y aves presentan igualmente hábitos diurnos, pero tanto los anfibios, como los mamíferos han explorado los hábitos nocturnos de manera amplia y exitosa. Con carácter general, los efectos tienen una gran variabilidad en función de la especie estudiada; existe una gran variedad de situaciones. A pesar de ello, se puede observar que, en general, las especies migratorias se pueden ver afectadas porque la luz artificial nocturna dificulta la navegación (Lacoeuilhe, Machon et al. 2014) y puedan dificultar el movimiento por determinados espacios, con la consecuente mortandad asociada.

En general, las especies diurnas se ven favorecidas, pues amplían su hábitat natural de caza (temporal), al disponer de más tiempo-espacio (Lacoeuilhe, Machon et al. 2014).

A continuación revisamos algunos casos particulares que ilustran algunos de los problemas frecuentemente asociados a la contaminación lumínica en vertebrados:

Efectos sobre los anfibios: Son especialmente vulnerables a los efectos de la CL. Es uno de los grupos animales en mayor regresión. Su tegumento es altamente glandular, carecen de protección contra la radiación UV, y es sensible a la luz y al calor pues no soportan la desecación. Bajo estas condiciones, la noche es el espacio ideal. Se está estudiando si la CL podría ser una causa de la rápida regresión de estas especies, junto otros factores de tipo microbiológico y genético (Kolbert 2015). Ya desde el año 1993 se detectó variación de comportamientos de forrajeo de las ranas con niveles lumínicos muy bajos (Buchanan 1993). A modo de ejemplo, algunos estudios realizados son:

- **Reproducción:** Se ha determinado que la llamada de la rana verde entre macho y hembra también se modifica por la luz intermitente que les ilumina (Rich and Longcore 2006).

- **Retraso en el crecimiento:** En el estudio de Buchanan (1993) se sometieron renacuajos de la rana africana *Xenopus laevis* a ciclos periódicos de 12 horas de claridad y oscuridad. Durante el experimento, se crearon diferentes niveles de iluminación en ciclos de o noche. Desde ciclos de noche oscura (0,0001 lx), noche de luna clara (0,01 lx) o hábitat iluminado (100 lx). Se demostró

que los renacuajos con niveles bajos de iluminación se habían desarrollado mejor que los otros. Incluso los ciclos lunares y la variación de nivel lumínico de la noche provoca retraso en la metamorfosis. De forma que el atraso de su desarrollo, los hace más vulnerables y tienen riesgo de morir depredados.

- **Variación en el comportamiento de caza:** Se realizó un experimento entre sapos donde se establecían áreas de control oscuras en un entorno iluminado. Dada la metamorfosis de la especie (de forma simultánea), se observó que la migración masiva en las ranas, se paraba en áreas iluminadas para presentar una mayor densidad de insectos (Buchanan 1993). Esto provocaba atropellamientos y las hace más vulnerables a las condiciones del entorno.

Efectos sobre aves: Las aves nocturnas también adaptan los ciclos a la alternancia de noche y día. Algunos efectos que les influyen:

- **Efecto barrera o desorientación en la migración:** Un elevadísimo número de aves mueren al año en EE.UU. y Canadá. Los impactos en edificios o torres iluminadas son el principal desencadenante (ETIBETAS 2009). Hasta el punto que en Nueva York, en la etapa de migración de aves, se apaga la iluminación ornamental de algunos rascacielos (Kinver 2010, News 2015).

También las aves se orientan por las estrellas y se ven afectados en este caso, y provocando nuevamente desorientación (Rich and Longcore 2006). Esto ocurre especialmente por grandes elementos lumínicos en zonas oscuras (plataformas petrolíferas, faros, etc).

- **Efecto barrera y desorientación:** Muchas especies migran a micro hábitats para cambiar su proceso vital. Un ejemplo son los polluelos de la Pardela cenicienta, que en las noches de octubre y noviembre, abandonan sus nidos en cuevas y acantilados, para empezar su actividad en aguas marinas (Wilhelm, Schau et al. 2013). En las bajadas hacia el mar, se deslumbran y desorientan. El caso está bien estudiado en nuestras costas, en las islas Canarias, Malta, Fuerteventura, Filipinas... (Rodríguez, Rodríguez et al. 2011) (Mula Laguna 2014) (Pilar 2012) (Raine 2007) (Troy, Holmes et al. 2011)

· **Aumento en los periodos de recogida de forraje:**

Esta actividad se produce durante el día, pero las aves aumentan el proceso durante la noche por la iluminación artificial (Falco naumanni, Fulica atra...) (Santos, C. Miranda et al. 2010)

· **Dificultad de ocultación de aves predatoras:**

Hay aves que se ocultan en la oscuridad, para dificultar que sean vistas y facilitar su actividad de presa. Por ejemplo, las lechuzas y búhos cazan en niveles lumínicos de gran oscuridad (niveles por debajo de 0,01 lx). Si los niveles son superiores, se producen alteraciones en el medio y deben esconderse en zonas de cobertura forestal o hábitats de características similares.

· **Incremento del canto de los pájaros durante la mañana:**

Bajo la luz artificial, aumentan su actividad en fases en las que no debieran. Por ejemplo el petirrojo europeo (Erithacus rubecula), el mirlo común (Turdus merula) y el mirlo de primavera (Turdus migratorius), empiezan a cantar de manera natural con niveles lumínicos de una media de 1,26 lx, pero sometido a luz artificial empiezan con 0,05 lx (Kempnaers, Borgström et al. 2010, Bulyuk, Bolshakov et al. 2014).

· **Incremento en la posibilidad de caza:**

Para Charadrius hiaticula, Charadrius alexandrinus, Pluvialis squatarola, Calidris alpina, Tringa totanus a partir de 0,74 lx por ejemplo (Gaston, Bennie et al. 2013).

· **Alimentación de polluelos:**

Puede incrementar la tasa de alimentación de polluelo durante la noche. Es el caso del petirrojo europeo (Erithacus rubecula) (Perkin, Hölker et al. 2011).

· **Variaciones en el periodo reproductivo:**

Según estudios de Dominoni (2015) se avanza un mes la etapa reproductiva en el mirlo común, un aspecto que no favorece en general a la especie, ya que desequilibra su fisiología (Schoech, Bowman et al. 2013) y su balance energético a lo largo del año. Con niveles lumínicos de alumbrado artificial (dentro de ciudades) los pájaros tienen un comportamiento diferente debido a la variación de los ciclos circadianos, creados por la luz recibida (Brandstätter 2001), incluso para niveles de resplandor luminoso relativamente bajos (0,3 lx para el mirlo) (Kempnaers, Borgström et al. 2010,

Domini 2013, Dominoni, Quetting et al. 2013, Dominoni, Carmona-Wagner et al. 2013). A pesar de todo existe desconocimiento de la problemática y el funcionamiento de los ciclos circadianos y sus efectos en las aves es todavía fragmentario. Lo que refleja el estado actual de conocimiento es la importancia de bajos niveles de luz en este tipo de animales y la modificación de sus ciclos biológicos (Dominoni 2015).

Efectos sobre reptiles: Aunque no sean un grupo mayoritariamente de actividad nocturna, los reptiles también sufren las consecuencias directas e indirectas de la CL. A modo de ejemplo ilustrativo:

· **Los procesos de reproducción:**

Pueden verse afectados. Hay especies que utilizan la oscuridad para protegerse de los depredadores en sus etapas más vulnerables, y son sensibles a todo tipo de luz (Rivas, Santidrián Tomillo et al. 2015). Un claro ejemplo, y muy estudiado, son las crías de tortuga boba (Caretta caretta) (Angel 2014). Toda luz les afecta y cuando acaban de salir del huevo se orientan con la luz recibida del mar (reflejo de la Luna o estrellas). Si hay luz en, por ejemplo, un paseo marítimo, hoteles o parecido, se desorientan y acaban exhaustas y/o expuestas a depredadores.

Su sensibilidad es muy elevada y la reducción de hábitats para el desove ha sido dramática. Debido a este suceso de desove puede transformarse en noticia en las playas mediterráneas. (Ramos-Salvat 2014).

· **Reducción de la actividad nocturna: Las serpientes cascabel**

(*Crotalus viridis*) son activas durante el día en épocas frías y durante la noche en épocas estivales en las que el calor diurno puede ser sofocante. Sin embargo la percepción requiere una combinación de umbral luminoso y térmico, en el que niveles lumínicos superiores a 1 lx actúan de inhibición de su comportamiento nocturno (Gaston, Bennie et al. 2013). Debido a esto, la iluminación en noches de verano inhibe su comportamiento.

Efectos sobre peces: Los peces son sensibles a la luz. De hecho los pescadores utilizan el recurso a modo de sistema de atracción hace años (Gengnagel, Wollburg et al. 2013).

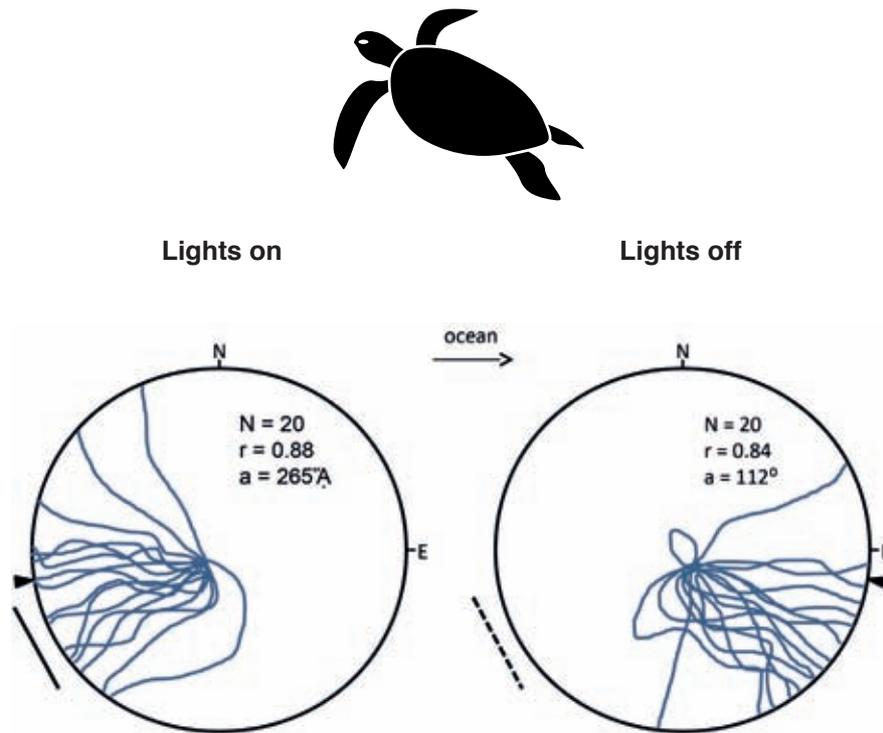


Figura 3. Modificación del camino que siguen las crías al nacer. Reconstrucción a partir de (Gaston, Duffy et al. 2014)

También se usa en la industria piscícola para aumentar la producción (Carrillo 2006). Algunos estudios son:

- **Atracción:** Por ejemplo, el “mukene” (*Rastrineobola argentea*), es un pez pequeño y plateado que se ve atraído por la luz. Se trata de un método muy utilizado para la pesca que pone en peligro individuos inmaduros de la especie. Esta especie vive en lagos de Kenia, Tanzania y Uganda, donde es importante para el mantenimiento de las poblaciones locales. Pero la proliferación de luz artificial ha hecho disminuir enormemente sus poblaciones.
- **Alteración de ciclos circadianos:** Los peces también se mueven con la alternancia luz y oscuridad en los ciclos circadianos. La *Perca fluviatilis* se empieza a distorsionar con 1 lx y de forma generalizada con 10 lx (Bruning, Holker et al. 2015).
- **Detección de presas:** El salmón se ve favorecido en su actividad (en detrimento de otras especies) con niveles lumínicos entre 0,01-5 lx.

- **Repulsión:** Es el caso de las granjas de halibut o fletán (*Hippoglossus hippoglossus*). Esta especie muestra repulsión a la luz y ve afectada su reproducción por la radiación ultravioleta.

- **Modificación del hábitat nocturno acuático:** El agua tiene una influencia muy importante en lo que se denomina migración vertical en el agua (viaje de crustáceos y zooplancton a capas superiores durante la noche y bajas durante el día). Con niveles inferiores a 0,1 lx ya se ven afectados. La irrupción de niveles lumínicos en el agua afecta a los peces que buscan precisamente estas migraciones diarias de su base alimenticia (Boscarino, Rudstam et al. 2009, Perkin, Hölker et al. 2014) (Rahmah, Senoo et al. 2013).

- **Alteración en los tiempos de migración:** Para el *Salmón salar*, y niveles de 14 lx (Riley, Bendall et al. 2012).

Efectos sobre mamíferos. Los ciclos circadianos: La pérdida de la oscuridad puede alterar el entorno donde consiguen el alimento. No olvidemos que la mayor parte de los mamíferos mantienen actividad nocturna, algunos de ellos estricta. Dos grandes órdenes de mamíferos, los roedores (ratas, ratones, hamsters, lemmings) y los quirópteros (murciélagos, vampiros) mantienen una gran actividad nocturna y las luces artificiales introducen enormes alteraciones en sus equilibrios y competencia. Combinado con el efecto que la luz ejerce sobre las poblaciones de insectos, base de las poblaciones para algunos de estos animales, el resultado es realmente alarmante.

Además, los mamíferos, se rigen por el denominado ciclo circadiano, que modifica nuestra actividad en función de si es día o noche. Las hormonas de actividad y las de recuperación o descanso están totalmente supeditadas a los ciclos de luz y oscuridad. Las alteraciones débiles pueden afectar también la fisiología y comportamiento de las especies y con las consecuentes modificaciones del ecosistema.

A modo de ejemplo y según estudios realizados:

- **Alteración por la tracción de presas a la luz:** Para algunas especies de murciélagos la presencia de luz nocturna es un factor crítico. Es difícil, sino imposible generalizar. Es claro que la presencia de alumbrado público genera una atracción de insectos alrededor de las luminarias. Las especies de murciélagos tolerantes a la luz pueden aprovechar estas fuentes de luz y ver favorecida su estrategia de captura. Generalmente este hecho se da en combinación con que se trata de especies que nidifican fácilmente en techos y umbráculos, con lo que el hábitat urbano ha favorecido sus poblaciones. El caso más conocido es el del murciélago enano (*Pipistrellus pipistrellus*), una especie pequeña, ágil, que vuela relativamente rápido y con muchos cambios de dirección. Puede mantener una dieta basada exclusivamente en insectos que se ven atraídos por las fuentes de luz y se alimenta de forma abundante alrededor de las farolas. Sin embargo, en contraste, las especies del género *Myotis* (ratoneros) tienen serias dificultades ante la presencia de luz y sus poblaciones están en recesión por la proliferación de alumbrado público en zonas abiertas en la montaña. Por lo tanto aunque no se puede generalizar, es obvio que por defecto o exceso, los murciélagos y la

cadena trófica asociada altera su equilibrio (Lacoeuilhe, Machon et al. 2014).

- **Pérdida de zonas de caza para especímenes nocturnos:** Por ejemplo, los leones son depredadores nocturnos y buscan la luna nueva o como mucho un 40% de la Luna para desarrollar su actividad de ocultación ante la presa. Prefieren cazar con niveles inferiores a 0,15 lx (Packer, Swanson et al. 2011). Con luna llena cazan mucho menos.

- **Dificultades para alimentarse para pequeñas especies:** A algunas nocturnas, como los ratones de playa, les cuesta alimentarse en zonas ligeramente iluminadas debido a la exposición a depredadores.

- **Alteración de ciclos circadianos:** Se ha detectado ya en ratones para niveles superiores a 0,01 lx, pero en todo tipo de mamíferos puede haber alteraciones de las concentraciones hormonales, y en particular de los ciclos circadianos (Giannetto, Fazio et al. 2011). Incluso a niveles de alumbrado público de luz de sodio y para primates (Le Tallec, Perret et al. 2013).

- **Reducción nocturna de la actividad:** Por ejemplo, en ratones (como el *Phyllotis xanthopygus*), a niveles lumínicos superiores a 1,5 lx. Eso quiere decir que hay menos posibilidades de alimentación. Ocurre a diversas especies de ratones nocturnas (Kramer and Birney 2001).

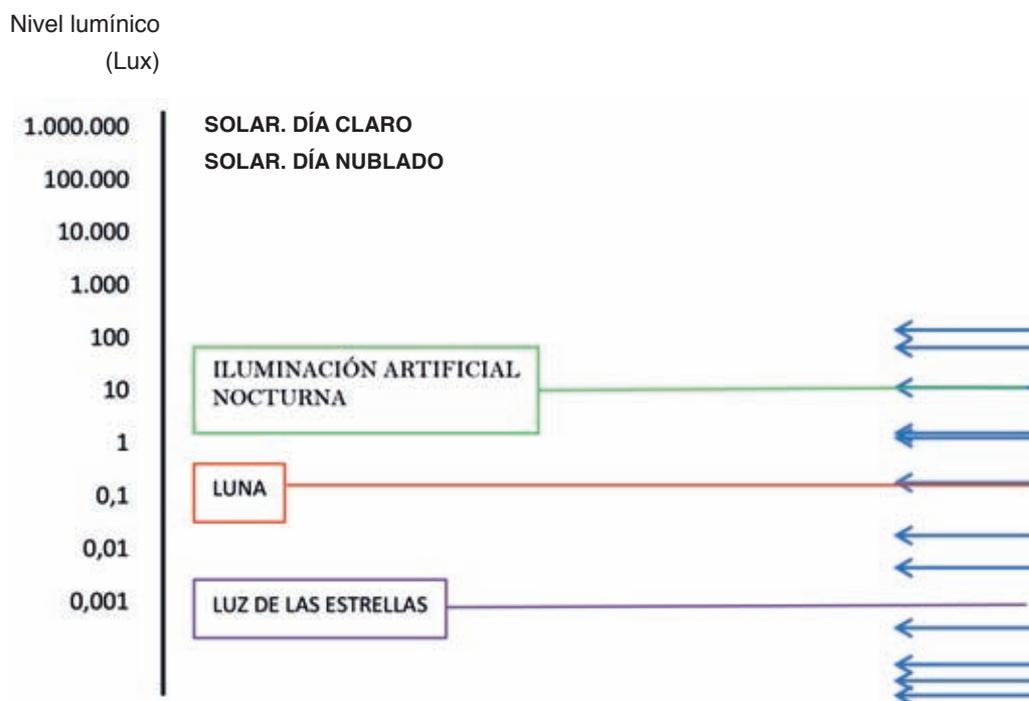
4. Cuantificación de niveles lumínicos y consideraciones espectrales

4.1. Niveles lumínicos

De entrada, es importante tener en cuenta que **la consideración de niveles lumínicos desde el punto de vista del ser humano está claramente sesgada** para el análisis de la afectación al ecosistema, puesto que los sistemas visuales de las diferentes especies son muy diversos. A pesar de ello, debido a las recopilaciones bibliográficas actuales, y a la facilidad de comparación con los sistemas luminotécnicos

existentes, se desarrolla el apartado con esta consideración.

Actualmente, el estudio de la ciencia de estas repercusiones está en continuo avance. Las primeras publicaciones completas fueron las de Longcore y Rich (Longcore 2004, Rich and Longcore 2006) y quizás la recopilación más importante, la realizó Kevin J. Gaston a partir del 2012 (Gaston, Davies et al. 2012).



Diferentes umbrales lumínicos de afectación al ecosistema (Gaston, Duffy et al. 2014)

Figura 4. Niveles lumínicos naturales (izquierda) y de referencia de algunos efectos sobre el ecosistema (derecha). Simplificación realizada a partir de datos de (Gaston, Duffy et al. 2014)

Tabla de valores umbral de lumínicos observados, y que los relaciona con los efectos biológicos

Espece	Efecto	Umbral	Fuente a partir de (Gaston, Bennie et al. 2013)
Barred owl <i>Strix varia</i>	Localización de presa	1,6·10 ⁻⁶ lux	Dice (1945)
Long eared owl	Localización de presa	2,7·10 ⁻⁶ lux	
Barn owl <i>Tyto alba</i>	Localización de presa	5,7·10 ⁻⁶ lux	
Burrowing owl <i>Spetyto cunicaria</i>	Localización de presa of prey	2,8·10 ⁻⁶ lux	
Common toad <i>Bufo bufo</i>	Incremento detección presa	2,8·10 ⁻⁶ lux	Larse&Pedersen (1982)
Syrian hamster <i>Mesocricetus auratus</i>	Alteración ritmo cardiaco	0,01 lux	Evans et al.(2007a)
Salmon <i>Salmo salar</i>	Incremento detección presa	0,01-5 lux	Metcalfe et al.1997)
Fruitly <i>Drosophila melanogaster</i>	Variación actividad	0,03 lx	Bachleitner et al.(2007)
Brown rat <i>Rattus norvegicus</i>	Incremento tumoral	0,2 lux	Dauchi et al.(1997)
Brown rat <i>Rattus norvegicus</i>	Incremento tumoral	0,21 lux	Cos et al.(2006)
Ringed plover <i>Charadrius alexandrinus</i>	Superior captura	0,74 lux	Santos et al.(2010)
Deer mouse <i>Peromyscus maniculatus</i>	Reducción actividad nocturna	0,93 lux	Falkenberg&Clarke (1998)
Prairie Rattlesnake <i>Crotalus viridis</i>	Reducción actividad	1 lux	Clarke et al.(1996)
American robin <i>Turdus migratorius</i>	Inicio de canto avanzado	0,05- 3,06 lux	Miller (2006)

Tabla 1. Confección a partir de Tabla 3 del artículo sobre efectos de ciertos niveles lumínicos en animales (Gaston, Bennie et al. 2013)

Actualmente no existen metodologías, modelos o protocolos matemáticos para evaluar de forma generalizada la repercusión de la radiación lumínica sobre ecosistemas Para los seres vivos de comportamiento más nocturno (ya sean insectos, predadores, etc.), **una mínima porción de luz (a menudo inferior al valor del nivel lumínico de la luna llena)**, ya ocasiona efectos en el ecosistema. El valor de iluminación que proporciona la luna llena normalmente está por debajo de 0.26 lux. (Kyba, Mohar et al. 2017, Longcore 2017)

4.2. Consideraciones espectrales

Los animales se mueven con sistemas de visión muy diferentes al nuestro o incluso desconocidos: Por ejemplo murciélagos que se mueven a través de señales de radio que emiten como un radar y se crean una imagen tridimensional en el espacio. Son ciegos desde el puntos de vista de cómo los humanos entendemos la luz (Lacoeuilhe, Machon et al. 2014, M. Cryan 2014); hay serpientes parece que tienen sistemas sensoriales de infrarrojos y hay aves con visión tetracrómica (tienen 4 tipos de conos).

Se considera que de forma mayoritaria, los animales de visión nocturna, tienen sus fotoreceptores con mayor sensibilidad en las radiaciones de onda corta.

Una herramienta que se usa en la comunidad científica para considerar que los lúmenes medidos para la afectación medio ambiental al ecosistema y animales nocturnos, es usar espectros de forma que consideren comportamientos generales: como la visión escotópica, el de acción de la fotosíntesis, etc. (Aubé, Roby et al. 2013) (Bessolaz 2009).

El hecho de que la visión de los otros seres vivos pueda ser diferente a la nuestra, hace que puedan ser especialmente sensibles a la luz en la componente azul. Incluso en poca cantidad de ella. Así pues, la luz blanca, puede tener una interferencia muy importante en el medio, incluso de forma independiente a la temperatura de color. Más bien el hecho determinante es la existencia de la componente azul. Se ha reportado además que no es suficiente con conocer aspectos

cualitativos de las fuentes de luz (como IRC o temperatura de color), sino que debe conocerse su espectro de emisión; puesto que para características similares (Poiani, Dietrich et al. 2015), los seres vivos se comportan de forma diferente. Los insectos son especialmente sensibles a estas bandas, incluso les produce la muerte (Hori, Shibuya et al. 2014, Pawsonl 2014). La evidencia científica muestra que para las especies nocturnas de mayor sensibilidad, cualquier distorsión en su entorno oscuro afecta al equilibrio natural y puede alterar las interacciones sociales naturales (Kurvers and Hölker 2014).

Una forma de poder analizar estos factores, se muestra a modo de resumen en la tabla siguiente. En 2013 se realizó un estudio que comparaba diferentes espectros de emisión y su potencial efecto contaminante respecto al iluminante CIE D65 (luz solar) , comparando: MSI-Melatonin Suppression Index ;IPI- Induced Photosynthesis Index ; SLI-Star Light Index.

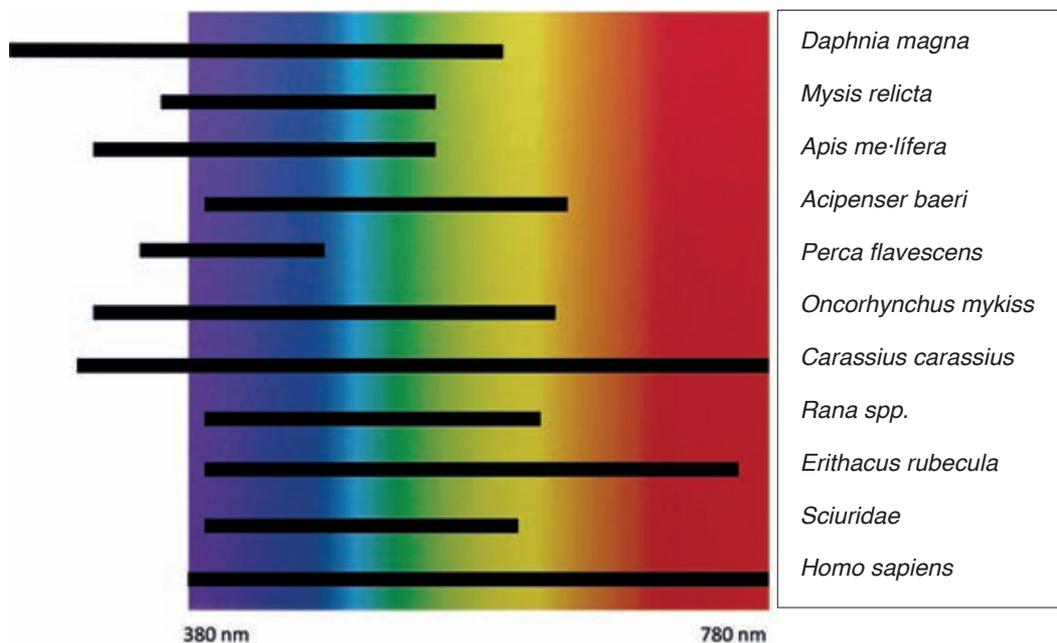


Figura 5. Diferente sensibilidad espectral para seres vivos. Reconstrucción a partir de (Perkin, Hölker et al. 2011)

Distance (km)	Clear sky						Cloudy Sky					
	MSI		IPI		SLI		MSI		IPI		SLI	
	0	30	0	30	0	30	0	30	0	30	0	30
LPS	0.008	0.014	0.241	0.349	0.053	0.078	0.012	0.015	0.317	0.359	0.072	0.081
HPS	0.099	0.113	0.342	0.465	0.188	0.218	0.107	0.114	0.430	0.477	0.210	0.211
Metal Halide	0.663	0.634	0.678	0.651	0.547	0.567	0.647	0.631	0.658	0.648	0.563	0.570
Halogen	0.329	0.364	0.592	0.761	0.544	0.583	0.350	0.369	0.718	0.779	0.571	0.587
Incandescent	0.203	0.241	0.572	0.820	0.431	0.474	0.225	0.245	0.759	0.846	0.461	0.478
Fluorescent T8 cool-white	0.403	0.427	0.549	0.594	0.561	0.595	0.417	0.430	0.579	0.598	0.585	0.598
LED 5000 K	0.500	0.533	0.601	0.631	0.598	0.610	0.517	0.536	0.618	0.633	0.608	0.611
Philips LED 4000 K	0.422	0.445	0.555	0.607	0.521	0.550	0.435	0.448	0.591	0.611	0.543	0.553
LED 2700 K	0.261	0.280	0.439	0.516	0.330	0.349	0.271	0.282	0.492	0.524	0.346	0.352
Nichia Amber	0.026	0.038	0.384	0.598	0.120	0.156	0.034	0.040	0.543	0.620	0.146	0.159
Lumiled PC AMBER	0.034	0.042	0.357	0.540	0.107	0.140	0.039	0.043	0.491	0.558	0.131	0.144
LED 5000 K Filtered	0.136	0.162	0.336	0.437	0.315	0.362	0.151	0.165	0.406	0.446	0.349	0.367
LED 2700 K Filtered	0.056	0.071	0.288	0.403	0.173	0.214	0.065	0.073	0.370	0.415	0.203	0.218
CIE D65	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Tabla 2. Características fotométricas de las lámparas y su potencial contaminante lumínico referido al patrón CIE D65. Datos extraídos de (Aubé, Roby et al. 2013).

5. Luz intrusa directa e indirecta

Luz intrusa es toda aquella que, no estando en la superficie iluminada, supone una agresión a una zona que debería estar en condiciones de oscuridad. Esta puede ser introducida en un hábitat humano (dormitorio, salón, etc.), o un ecosistema nocturno.

Las repercusiones más conocidas son las **directas**, es decir, aquella que suponen una emisión lumínica sin reflexiones, provenientes del punto de luz.

En la actualidad, están surgiendo evidencias que determinan la importancia del brillo del cielo durante la noche como emisor de luz que altera el ecosistema natural. Un emisor de

luz que, a pesar de ser de intensidad muy moderada, genera una intrusión general y muy extensa en los ecosistemas nocturnos: **La luz intrusa indirecta**. La necesidad de oscuridad importante para muchas especies, hace que niveles de CL en el cielo afecte a su comportamiento (Kyba, Ruhtz et al. 2011, Kyba, Hanel et al. 2014).

Así pues, debido a que el brillo del cielo constituye un emisor de luz residual, este puede constituirse como una fuente de luz que crea intrusión (Kyba, Ruhtz et al. 2011, Kyba and Hölker 2013). Estos niveles, pueden ser suficientes para alterar comportamientos de caza, reproducción etc., en animales de actividad nocturna más sensibles.

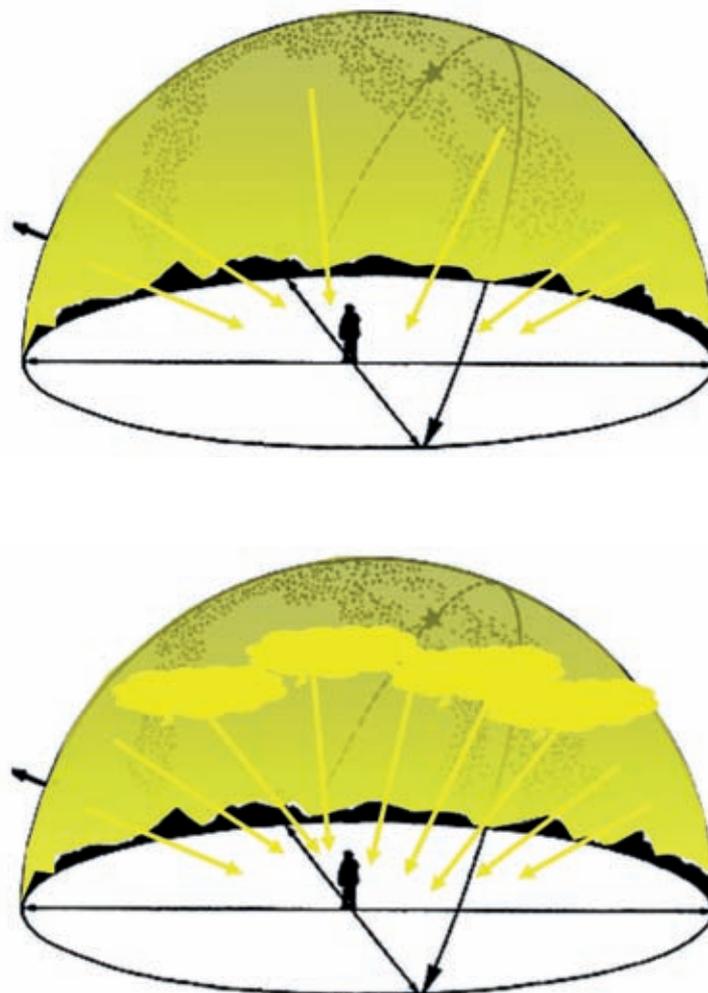


Figura 6. Ilustración de cómo se altera el nivel lumínico en el suelo en función del brillo de la cúpula celeste. En la primera en cielo claro, y en la segunda en cielo cubierto de nubes, en su efecto amplificado (García Gil 2015)

6. Recomendaciones en el uso de lámparas TIPO PC-LED para minimizar las repercusiones en los ecosistemas

Este último apartado, aborda los aspectos más representativos a tener en cuenta en el uso de fuentes de luz tipo LED para alumbrado artificial nocturno, con el objetivo de minimizar las repercusiones de la contaminación lumínica sobre los ecosistemas en la noche. Se puede considerar como resumen de los anteriores y, a pesar de citar los LED's en diferentes ocasiones, es posible extrapolar las consideraciones también a otras fuentes de luz en función de su espectro de emisión.

Los LEDs considerados son los de tipología PC-LED (Phosphor Converted Light Emitting Diode), que son los más utilizados en la actualidad. La redacción se ha dividido por una parte en factores a tener en cuenta para minimizar los efectos más comunes, y por otra parte la consideración del alcance de la contaminación lumínica en el medio natural nocturno, debido al resplandor luminoso.

6.1. Factores de minimización

En el uso de sistemas lumínicos, las opciones para minimizar la contaminación lumínica son:

1. Evitar cualquier luz intrusa sobre los ecosistemas.

Actualmente, el estudio de estas repercusiones está en continuo desarrollo. Las primeras publicaciones completas fueron las de Longcore y Rich (Longcore 2004, Rich and Longcore 2006). Las últimas las realizó Kevin J. Gaston (Gaston, Davies et al. 2012).

Los ecosistemas más sensibles, lo son a niveles lumínicos muy reducidos. Normalmente bajo los niveles de la luz de la Luna, esto es por debajo de los 0,3 lx, o incluso por debajo 0,1 lx el comportamiento de algunos seres vivos puede verse influido (Kyba, Mohar et al. 2017). En la tabla se indican los niveles lumínicos típicos y su correspondencia con la luz

Niveles lumínicos típicos	Correspondencia	Ejemplo de niveles de afectación para algunos seres vivos nocturnos
100.000 lx	Sol a medio día	
10.000 lx	Día nublado	
200 lx	Puesta de sol	
10 lx	Alumbrado artificial nocturno	
1 lx	Luz intrusa en zonas de máxima protección según reglamentaciones	(...)
0,1-0,4 lx	Luna llena	0,5 lx búsqueda alimentación peces
0.01	Límite de los luxímetros comerciales	0,25 lx disrupción de melatonina en ratas
0,01-0.04 lx	Luna en fase creciente	0,2 lx comportamiento luciérnagas 0,1 lx búsqueda de alimentación en roedores
0,0001 lx	Entorno oscuro con noche estrellada	0,04 lx máxima actividad para ranas
1 micro lux	Entorno oscuro, bajo cobertura vegetal	0.03 lx modificación actividad mosca de la fruta 0,003 lx actividad en ciertos anfibios 0,001 lx actividad polillas (...)

Tabla 3. Datos a partir de (Gaston, Duffy et al. 2014) y (Longcore, Rich 2016)

natural. Es conocida la cronobiología por la luz de la luna, por lo que su presencia en el firmamento y el efecto de luz es significativo en los comportamientos de seres vivos más nocturnos (Kronfeld-Schor, Dominoni et al. 2013). Debido a este factor, la luz intrusa artificial en los ecosistemas naturales debería ser casi nula y por tanto se debería evitar la luz dispersa procedente de los lugares iluminados artificialmente, fomentando el uso de sistemas ópticos de control de la luz (lentes, reflectores, etc.), e implantando instalaciones con utilancias mantenidas superiores al 0,5 o si fuera posible cercanas a 0,7 (incluyendo el factor de mantenimiento) para fuentes de luz tipo LED.

Actualmente no existen metodologías, modelos o protocolos matemáticos para evaluar de forma generalizada la repercusión de la radiación lumínica sobre ecosistemas. Sin embargo, para los seres vivos de comportamiento totalmente nocturno (ya sean insectos, predadores, etc.), una mínima porción de luz, ocasiona repercusiones importantes en su ecosistemas.

“Los ecosistemas más sensibles, son muy frágiles ante el impacto de la intrusión de luz, puesto que tienen necesidad de oscuridad. La inclusión de luz intrusa por debajo de niveles que generan la luna (0,1 lx), tienen repercusiones negativas en esta biodiversidad”.

2. Evitar el uso de las instalaciones cuando no sea necesario.

El empleo de la iluminación LED, permite un uso mucho más flexible, adaptado e inteligente, del servicio lumínico en función de las necesidades específicas. Esto puede permitir, tener la cantidad y tipología de luz necesaria, en el momento necesario y en la dirección adecuada.

La telegestión a nivel de cuadro de maniobra, o de forma más concreta, a nivel de punto de luz, puede permitir reducir el impacto de la luz aquellos momentos en los que la iluminación puede atenuarse.

Una iluminación sostenible, no solo desde el punto de vista económico, sino también desde el punto de vista medioambiental, implica iluminar aquello que se debe iluminar, durante el tiempo que se deba iluminar, con la potencia adecuada y con el espectro de luz menos perjudicial para los ecosistemas.

“El uso de sistemas de gestión del alumbrado, para ajustar el servicio lumínico a las necesidades en cada momento, puede minimizar los efectos sobre el ecosistema, evitando radiación e intensidades sobrantes y no útiles”.

3. Evitar los intervalos de radiación de más impacto (longitud de onda < 500 nm).

De forma general, la reglamentación que hace referencia a las limitaciones de radiación, tienen en cuenta el uso de lámparas de baja componente en radiación de longitud de onda corta para las zonas de máxima protección (zonas E1). Suele ser este factor el determinante: La presencia de radiación de onda corta. Su minimización se realiza normalmente mediante la prescripción de lámparas de vapor de sodio, sistemas de filtración, o elementos de radiación controlado por debajo de 440 nm o 500 nm. (Narisada and Schreuder 2004, MINISTERIO-DE-INDUSTRIA 2008, JUNTA DE ANDALUCÍA 2010).

En la legislación de más reciente publicación, se recomienda limitaciones también en temperatura de color, y se habla explícitamente de las fuentes de luz LED, también en zonas de protección denominadas E2 (alta) y E3 (moderadas). (GENCAT 2014, GENCAT 2015).

Normalmente, los animales diurnos tienen una visión adaptada al espectro de la luz que predomina durante las horas de presencia de Sol; esto es, visión diurna o fotópica; y los animales nocturnos están más adaptados a las condiciones nocturnas de luz natural. Como ejemplo se presenta en la Figura 5 la comparación de la “visión” de diferentes seres vivos (K. Perking, Holker et al. 2013).

Otros animales se mueven con sistemas de visión muy diferentes al nuestro o incluso desconocidos: Por ejemplo, hay murciélagos que se desplazan gracias a señales de audio que emiten como un radar y se crean una imagen tridimensional en el espacio. Son ciegos desde el punto de vista de cómo los humanos entendemos la luz (Lacoeuilhe, Machon et al. 2014, M. Cryan 2014); hay serpientes que tienen sistemas sensoriales de infrarrojos y hay aves con visión tetracrómica (tienen 4 tipos de conos).

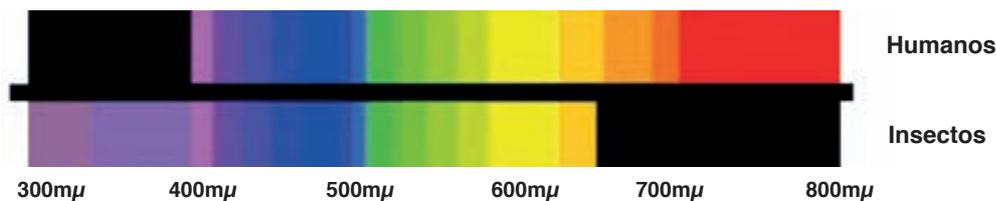


Figura 7. Comparación de la sensibilidad en el espectro visible de los humanos e insectos (Dolsa and Albarrán 1998)

A pesar de no tener información de detalle de su sensibilidad, se puede considerar que de forma mayoritaria, hay repercusiones superiores con radiaciones de onda corta.

Los insectos son especialmente sensibles. Aún con poca componente azul, si la luz es blanca, puede tener una interferencia muy importante en el medio (incluso de forma independiente a la temperatura de color). Más bien el hecho determinante es la existencia de la componente azul o ultravioleta. Se ha reportado además que no es suficiente con conocer aspectos cualitativos de las fuentes de luz (como IRC o temperatura de color), sino que debe conocerse su espectro de emisión; puesto que para características similares (Poiani, Dietrich et al. 2015), los seres vivos se comportan de forma diferente. La evidencia científica muestra que para las especies nocturnas, cualquier distorsión en su entorno oscuro afecta al equilibrio natural y puede alterar las interacciones sociales naturales (Kurvers and Hölker 2014).

En el caso de los murciélagos, que han sido estudiados de forma continua, existen especies que se ven atraídas por la luz (debido al aumento de insectos en sus proximidades), y otras que se ven repelidas. También hay estudios que parece indicar la peligrosidad y dependencia de luz blanca o amarilla, y otros en los que no hay diferencias significativas, entre luz generada por lámparas LED o vapor de sodio a baja presión. (Stone, Jones et al. 2012, Lacoueilhe, Machon et al. 2014, Stone, Wakefield et al. 2015, Rowse, Harris et al. 2016).

“De forma mayoritaria, debe reducirse el espectro de radiación más nociva en cada caso. En caso de desconocerse, debe minimizarse o eliminarse la radiación por debajo de 500 nm”.

6.2. Efectos aumentativos: la luz intrusa indirecta.

La luz intrusa es toda aquella que, no estando en la superficie iluminada, supone una interferencia en una zona que debería estar en condiciones de oscuridad. Esta intrusión, puede ser introducida en el hábitat humano (dormitorio, salón, etc.), o en el ecosistema nocturno.

Las efectos más conocidos son los **directos**, es decir, aquella que suponen una emisión lumínica sin reflexiones, provenientes las instalaciones de alumbrado.

En la actualidad, están surgiendo evidencias que constatan la importancia del brillo del cielo durante la noche como emisor de luz que altera el ecosistema natural. Un emisor de luz que, aún siendo de intensidad muy moderada, genera una intrusión general y muy extensa en los ecosistemas nocturnos: **La luz intrusa indirecta**. La necesidad de oscuridad para muchas especies naturales, hace que niveles de contaminación lumínica en el cielo afecte a su comportamiento (Kyba, Ruhtz et al. 2011, Kyba, Hanel et al. 2014). Estos niveles, pueden ser suficientes para alterar comportamientos de caza, reproducción etc., en animales de vida nocturnos.

El valor de fondo de cielo es muy variable para cada ubicación, en función de múltiples factores (encendido y regulación de sistemas de iluminación, composición atmosférica, etc.). Pero una variable que se ha observado que tiene un factor de amplificación (AF) considerable es la cobertura debido a nubes (Figura 8). Según modelizaciones matemáticas, estos valores observados van de unos valores pico entre a 1,6 a 8,16 (Kocifaj 2014), y esto repercute en los niveles lumínicos nocturnos, creando una disrupción en el ciclo natural nocturno, de forma que desaparezca la influencia de los ciclos lunares, en extensas áreas de territorio (Bará 2016) (Ribas 2016).

Nivel lumínico intruso debido a emisión indirecta de la CL

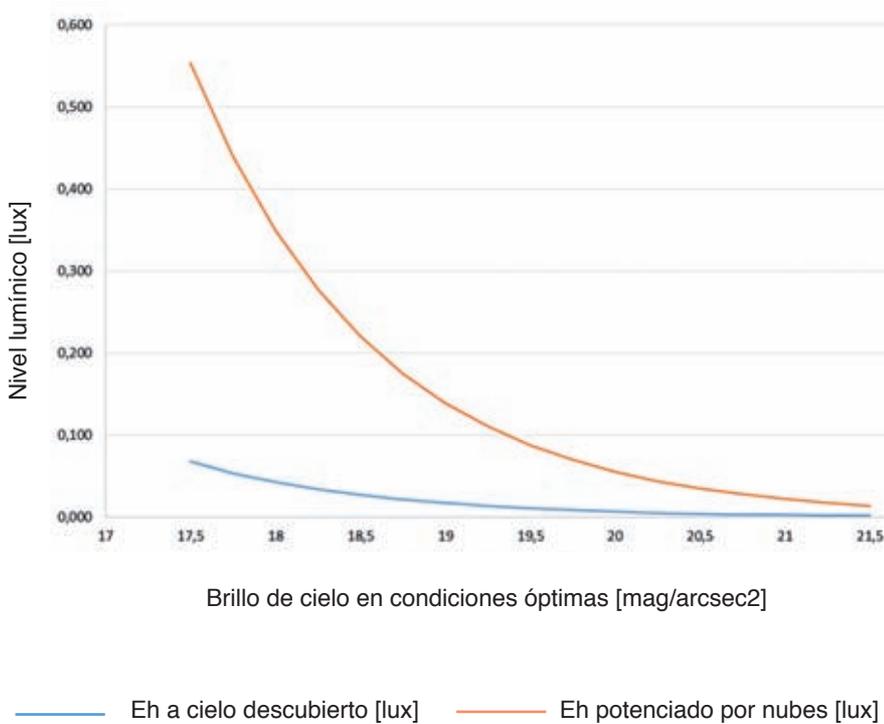


Figura 8. Ejemplificación de la variación de la iluminación horizontal debido al efecto amplificado de la nubosidad. (García Gil 2015)

El brillo de la cúpula celeste se mide a partir del valor del fondo de cielo. Una unidad aceptada es [mag·arcsec⁻²]. En las zonas más oscuras, su valor es superior a 21,4 mag·arcsec⁻², y este valor baja a menos de 17 en zonas urbanas (niveles más bajos corresponden a lugares más contaminados lumínicamente). La influencia de las zonas urbanas en la contaminación lumínica se extiende decenas y centenas de kilómetros. Así, el cielo nocturno contaminado se convierte en un emisor de luz que genera valores de iluminancia en el suelo que pueden ser superiores a los 0,2 lux. Estos niveles son suficientes para afectar a los ecosistemas más nocturnos, de forma que para proteger los entornos más sensibles, no es suficiente con planificar el alumbrado de las zonas más cercanas, sino también de las grandes ciudades que pueden estar a decenas de kilómetros.



Figura 9. Medida de brillo de cielo de Barcelona

Referencias

- Angel, A. e. a. (2014). "Ecological risk assessment of sea turtles to tuna fishing in the ICCAT Region." ICCAT 70(5).
- Aubé, M., J. Roby and M. Kocifaj (2013). "Evaluating Potential Spectral Impacts of Various Artificial Lights on Melatonin Suppression, Photosynthesis, and Star Visibility." PLoS ONE 8(7): e67798.
- Bará, S. (2016). "Anthropogenic disruption of the night sky darkness in urban and rural areas." Royal Society Open Science 3(10).
- Bates, A. e. a. (2014). "Garden and landscape-scale correlates of moths of differing conservation status : significant effects of urbanization and habitat diversity." PLoS ONE 9(1): 11.
- Berry, M., D. T. Booth and C. J. Limpus (2013). "Artificial lighting and disrupted sea-finding behaviour in hatchling loggerhead turtles (*Caretta caretta*) on the Woongarra coast, south-east Queensland, Australia." Australian Journal of Zoology 61(2): 137-145.
- Bessolaz, N. (2009). Towards an efficient control of light pollution : the optimization of the public lighting system from an accurate modeling of light pollution. LICORNESS.
- Bird, S., Parker J. (2014). "Low levels of light pollution may block the ability of male glow-worms (*Lampyrus noctiluca* L.) to locate females." Journal of Insect Conservation 18(4): 7.
- Boscarino, B. T., L. G. Rudstam, J. L. Eillenberger and R. Gorman (2009). "Importance of light, temperature, zooplankton and fish in predicting the nighttime vertical distribution of *Mysis diluviana*." Aquatic Biology 5(3): 263-279.
- Brandstätter, E. G. a. R. (2001). "Complex bird clocks." The Royal society 356: 1801-1810.
- Bruning, A., F. Holker, S. Franke, T. Preuer and W. Kloas (2015). "Spotlight on fish: Light pollution affects circadian rhythms of European perch but does not cause stress." Science of The Total Environment 511(0): 516-522.
- Buchanan, B. W. (1993). "Effects of enhanced lighting on the behaviour of nocturnal frogs." Animal Behaviour 45(5): 893-899.
- Bulyuk, V. N., C. V. Bolshakov, A. Y. Sinelschikova and M. V. Vorotkov (2014). "Does the reaction of nocturnally migrating songbirds to the local light source depend on backlighting of the sky?" Avian Ecology and Behavior 25: 21-26.
- Carrillo, M. (2006). "Manipulación fotoperiodica para controlar el crecimiento de los peces." Retrieved 09-abr-2015, from <http://www.ott.csic.es/rdcsic/rdcscicesp/rdbi27esp.htm>.
- CONSEJERIA-DE-MEDIO-AMBIENTE (2010). Reglamento para la Protección de la Calidad del Cielo Nocturno frente a la contaminación lumínica y el establecimiento de medidas de ahorro y eficiencia energética. D357/2010. CONSEJERIA-DE-MEDIO-AMBIENTE. Sevilla, JUNTA-ANDALUCIA., from <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/menuitem.7e1cf46ddf59bb227a9e205510e1ca/?vgnnextoid=0cdfa41d76567510VgnVCM2000000624e50aRCRD&vgnnextchannel=21c62de6577ba410VgnVCM1000001325e50aRCRD>.
- Dacke, M., E. Baird, M. Byrne, Clarke H. Scholtz and Eric J. Warrant (2013). "Dung Beetles Use the Milky Way for Orientation." Current Biology 23(4): 298-300.
- Davies, T. W., J. Bennie and K. J. Gaston (2012). Street lighting changes the composition of invertebrate communities.
- Dolsa, G. and M. T. Albarrán (1998). La problemática de la contaminación lumínica en la conservación de la diversidad. I sesión de trabajo sobre contaminación lumínica, Barcelona.
- Domini, D. M. (2013). "Urban-like night illumination reduces melatonin release in European blackbirds (*Turdus merula*): implications of city life for biological time-keeping of songbirds." Frontiers in Zoology: 10.
- Dominoni, D. (2015). "The effects of light pollution on biological rhythms of birds: an integrated, mechanistic perspective." Journal of Ornithology: 1-10.
- Dominoni, D., M. Quetting and J. Partecke (2013). Artificial light at night advances avian reproductive physiology.
- Dominoni, D. M., E. O. Carmona-Wagner, M. Hofmann, B. Kranstauber and J. Partecke (2013). "Individual-based mea-

- surements of light intensity provide new insights into the effects of artificial light at night on daily rhythms of urban-dwelling songbirds." *Journal of Animal Ecology* 83(3): 681-692.
- ETIBETAS. (2009). "La principal causa de muerte no natural en aves son las ventanas de vidrio." Retrieved 23-03-2015, from <http://matiascallone.blogspot.com.es/2009/05/la-principal-causa-de-muerte-no-natural.html>.
- Froy, O., L. Gotter, A. et al. (2003). "Illuminating the Circadian Clock in Monarch Butterfly Migration." *Science* 300(5623): 1303-1305.
- Garcia Gil, M. (2015). "Predicción del impacto ambiental de la contaminación lumínica : propuesta de una metodología para proyectos luminotécnicos de ingeniería", Universitat Politècnica de Catalunya. Tesis doctoral.
- Gaston, K. J., J. Bennie, T. W. Davies and J. Hopkins (2013). "The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal." *Biol Rev Camb Philos Soc* 88(4): 912-927.
- Gaston, K. J., T. W. Davies, J. Bennie and J. Hopkins (2012). "REVIEW: Reducing the ecological consequences of nighttime light pollution: options and developments." *Journal of Applied Ecology* 49(6): 1256-1266.
- Gaston, K. J., J. P. Duffy, S. Gaston, J. Bennie and D. T.W. (2014). "Human alteration of natural light cycles: causes and ecological consequences." *Oecologia*.
- GENCAT. (2014). "Projecte de Decret de desenvolupament de la Llei 6/2001." Retrieved 10-oct-2014, 2014, from http://mediambient.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/atmosfera/contaminacio_lluminosa/doc/projecte_de_decret.pdf.
- GENCAT (2015). Decret 190/2015 de desenvolupament de la Llei 6/2001 d'ordenació ambiental de l'enllumenament per a la protecció del medi nocturn. DOGC, GENCAT.
- Gengnagel, T., P. Wollburg and E. Mills (2013). Alternatives to Fuel-based Lighting for Night Fishing. THE LUMINA PROJECT. University of Bayreuth, Germany
- Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, USA, U.S. Department of Energy.
- Giannetto, C., F. Fazio, I. Vazzana, M. Panzera and G. Piccione (2011). "Comparison of cortisol and rectal temperature circadian rhythms in horses: the role of light/dark cycle and constant darkness." *Biological Rhythm Research* 43(6): 681-687.
- Hagen, O., R. Machado Santos, M. Nivert Schindwein and V. Ravara Viviani (2015). "Artificial Night Lighting Reduces Firefly (Coleoptera: Lampyridae) Occurrence in Sorocaba, Brazil." *Advances in Entomology* 3(1): 24-32.
- Hori, M., K. Shibuya, M. Sato and Y. Saito (2014). "Lethal effects of short-wavelength visible light on insects." *Sci. Rep.* 4.
- K. Perking, E., F. Holker and K. Tockner (2013). "The effects of artificial lighting on adult aquatic and terrestrial insects." *Freshwater Biologi.*
- Kempenaers, B., P. Borgström, P. Loës, E. Schlicht and M. Valcu (2010). "Artificial Night Lighting Affects Dawn Song, Extra-Pair Siring Success, and Lay Date in Songbirds." *Current Biology* 20(19): 1735-1739.
- Kinver, M. (2010). "Nueva York "apaga" las luces para ayudar a aves migratorias." Retrieved 23-03-2015, from http://www.bbc.co.uk/mundo/ciencia_tecnologia/2010/09/100902_nueva_york_luces_migracion_aves_jrg.shtml.
- Knop, E., L. Zoller, R. Ryser, C. Gerpe, M. Hörler and C. Fontaine (2017). "Artificial light at night as a new threat to pollination." *Nature* 548(7666): 206-209.
- Kocifaj, M., Solano, H (2014). "Quantitative analysis of night skyglow amplification under cloudy conditions " *Journal of astronomical society* 443: 12.
- Kolbert, E. (2015). La sexta extinción. Una historia nada natural.
- Kramer, K. and E. Birney (2001). "Effect of light intensity on activity patterns of Patagonian leaf-eared mice,." *Journal of Mammalogy* 82(2): 535-544.

- Kronfeld-Schor, N., D. Dominoni, H. de la Iglesia, O. Levy, E. D. Herzog, T. Dayan and C. Helfrich-Forster (2013). "Chronobiology by moonlight." *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 280(1765).
- Kurvers, R. H. J. M. and F. Hölker (2014). "Bright nights and social interactions: a neglected issue." *Behavioral Ecology*.
- Kyba, C. C. M., A. Hanel and F. Holker (2014). "Redefining efficiency for outdoor lighting." *Energy & Environmental Science* 7(6): 1806-1809.
- Kyba, C. C. M., A. Mohar and T. Posch (2017). "How bright is Moonlight." *Astronomy & Geophysics* 58(1): 1.31-31.32.
- Kyba, C. C. M., T. Ruhtz, J. r. Fischer and F. Holker (2011). "Cloud Coverage Acts as an Amplifier for Ecological Light Pollution in Urban Ecosystems." *PLoS ONE* 6(3): e17307.
- Kyba, C. M. and F. Hölker (2013). "Do artificially illuminated skies affect biodiversity in nocturnal landscapes?" *Landscape Ecology* 28(9): 1637-1640.
- Lacoeuilhe, A., N. Machon, J. F. Julien, A. Le Bocq and C. Kerbiriou (2014). "The Influence of Low Intensities of Light Pollution on Bat Communities in a Semi-Natural Context." *PLOS* 9(10): e103042.
- Le Tallec, T., M. Perret and M. Théry (2013). "Light Pollution Modifies the Expression of Daily Rhythms and Behavior Patterns in a Nocturnal Primate." *PLOS.org* 8(11).
- Longcore, T. (2017). "How bright the moon: correcting a propagated figure error in the literature", 2017, from <https://travislongcore.net/2017/08/06/how-bright-the-moon-correcting-a-propagated-figure-error-in-the-literature/>.
- Longcore, T., Rich C. (2004). "Ecological light pollution." *Frontiers in Ecology and the Environment* 2(4): 191-198.
- Lowe, E. C., S. M. Wilder and D. F. Hochuli (2014). "Urbanisation at Multiple Scales Is Associated with Larger Size and Higher Fecundity of an Orb-Weaving Spider." *PLOS* 9(8).
- M. Cryan, P. e. a. (2014). "Behavior of bats at wind turbines." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*: 6.
- Macgregor, C. J., D. M. Evans, R. Fox and M. J. O. Pocock (2016). "The dark side of street lighting: impacts on moths and evidence for the disruption of nocturnal pollen transport." *Global Change Biology*: n/a-n/a.
- Macgregor, C. J., M. J. O. Pocock, R. Fox and D. M. Evans (2014). "Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of light pollution: a review." *Ecological Entomology*: n/a-n/a.
- MINISTERIO-DE-INDUSTRIA (2008). Real Decreto 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07. T. y. C. Ministerio de Industria. BOE. 279: 45988-46057.
- Minnaar, C., J. G. Boyles, I. A. Minnaar, C. L. Sole and A. E. McKechnie (2014). "Stacking the odds: light pollution may shift the balance in an ancient predator-prey arms race." *Journal of Applied Ecology*: n/a-n/a.
- Mula Laguna, J., Barbara, N., Metzger B. (2014). Light pollution impact on "tubenose" seabirds: an overview of areas of concern in the Maltese Islands. M. Birdlife, Birdlife, Malta: 15.
- Narisada, K. and D. Schreuder (2004). *Light pollution handbook*, Springer.
- News, B. (2015). "New York state to dim lights to save migrating birds." Retrieved 30-abr-2015, from <http://www.bbc.com/news/world-us-canada-32491715>.
- Packer, C., A. Swanson, D. Ikanda and H. Kushnir (2011). "Fear of Darkness, the Full Moon and the Nocturnal Ecology of African Lions." *PLOS.org*: 4.
- Pawsonl, S. M., Bader M. K.-F. (2014). "LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature." *Ecological Applications* 24(7): 1561-1568.

- Perkin, E. K., F. Hölker, J. S. Richardson, J. P. Sadler, C. Wolter and K. Tockner (2011). "The influence of artificial light on stream and riparian ecosystems: questions, challenges, and perspectives." *Ecosphere* 2(11): art122.
- Perkin, E. K., F. Hölker, K. Tockner and J. S. Richardson (2014). "Artificial light as a disturbance to light-naïve streams." John Wiley & Sons Ltd.
- Pilar, E. (2012). "Fuerteventura se "apaga" por la parda." Retrieved 26-jan-2015, 2012, from <http://www.abc.es/20121106/natural-biodiversidad/abci-fuerteventura-pardela-contaminacion-luminica-201211061110.html>.
- Poiani, S., C. Dietrich, A. Barroso and A. Costa-Leonardo (2015). "Effects of residential energy-saving lamps on the attraction of nocturnal insects." *Lighting Research and Technology* 47(3): 338-348.
- Rahmah, S., S. Senoo and G. Kawamura (2013). "Photoreponse ontogeny and its relation to development of pineal organ and eye in larval bagrid catfish *Mystus nemurus* (Valenciennes)." *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology* 46(6): 367-379.
- Raine, H. (2007). Light pollution and its effect on Yelkouan Shearwaters in Malta; causes and solutions. B. Malta, BirdLife Malta: 55.
- Ramos-Salvat, G. (2014). "Una Tortuga marina pone huevos por primera vez en la playa de Tarragona". El Pais. Tarragona.
- Ribas, S. (2016). "How Clouds are Amplifying (or not) the Effects of ALAN." *International Journal of Sustainable Lighting* 1: 32-39.
- Rich, C. and T. Longcore (2006). *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Washington, DC, Island Press.
- Riley, W. D., B. Bendall, M. J. Ives, N. J. Edmonds and D. L. Maxwell (2012). "Street lighting disrupts the diel migratory pattern of wild Atlantic salmon, *Salmo salar* L., smolts leaving their natal stream." *Aquaculture* 330-333(0): 74-81.
- Rivas, M. L., P. Santidrián Tomillo, J. Diéguez Uribeondo and A. Marco (2015). "Leatherback hatchling sea-finding in response to artificial lighting: Interaction between wavelength and moonlight." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 463(0): 143-149.
- Rodriguez, A., B. Rodriguez and M. P. Lucas (2011). "Trends in numbers of petrels attracted to artificial lights suggest population declines in Tenerife, Canary Islands." *IBIS. The International Journal of Avian Science*.
- Rowse, E. G., S. Harris and G. Jones (2016). "The Switch from Low-Pressure Sodium to Light Emitting Diodes Does Not Affect Bat Activity at Street Lights." *PLOS ONE* 11(3): e0150884.
- Santos, C., A. C. Miranda, J. Granaderiro, P. Lourenço, J. Saraiva and J. Palmerim (2010). "Effects of artificial illumination on the nocturnal foraging of waders." *Acta Oecologica* 26(2): 166-173.
- Schoech, S. J., R. Bowman, T. P. Hahn, W. Goymann, I. Schwabl and E. S. Bridge (2013). "The effects of low levels of light at night upon the endocrine physiology of western scrub-jays (*Aphelocoma californica*)." *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology* 319(9): 527-538.
- Stone, E. L., G. Jones and S. Harris (2012). "Conserving energy at a cost to biodiversity? Impacts of LED lighting on bats." *Global Change Biology* 18(8): 2458-2465.
- Stone, E. L., A. Wakefield, S. Harris and G. Jones (2015). "The impacts of new street light technologies: experimentally testing the effects on bats of changing from low-pressure sodium to white metal halide." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370(1667).
- Troy, J. R., N. D. Holmes and M. C. Green (2011). "Modeling artificial light viewed by fledgling seabirds." *Ecosphere* 2(10): art109.
- Wilhelm, S. I., J. J. Schau, E. Schau, S. M. Dooley, D. L. Wiseman and H. A. Hogan (2013). "Atlantic Puffins are Attracted to Coastal Communities in Eastern Newfoundland." *Northeastern Naturalist* 20(4): 624-630.

