

(05-013) - Technological and legislative developments to improve the sustainability and environmental quality of public lighting installations

Redrado Salvatierra, Guillermo ¹; Andrés Díaz, Jose Ramón ¹; Navarrete De Gálvez, Enrique ¹; GAGO-CALDERÓN, ALFONSO ¹

¹ Universidad de Málaga

The consolidation of the LED technology in the lighting industry makes of it the reference in the design or renovation of outdoor lighting installations. The design of Public Lighting installations is undergoing continuous technical evolution, the appearance of weak points to be reinforced and assessments of the most significant consequences detected.

The improvement in the ability to control emissions in the range of blue radiation (< 500 nm), mainly responsible for relevant effects of light pollution (atmospheric dispersion, alteration of biological patterns of living beings,...), is forcing both the modification of legislation and the evolution and development of new road lighting products and components.

The recent modifications of legislation in different administrations and the guidelines of international organizations (UNESCO, Starlight Initiative,...) that have been established to ensure more sustainable and healthy lighting facilities while maintaining energy savings and efficiency criteria will be analyzed. Likewise, the technical solutions that manufacturers are providing will be presented.

Given the variety of regulations and technical solutions, an experimental comparison is carried out between products manufactured with these alternatives to develop a selection guide for equipment adapted to the new trend of legislation.

Keywords: LED lighting; street lighting; light pollution; energy efficiency

Desarrollos tecnológicos y legislativos para la mejora de la sostenibilidad y calidad ambiental de las instalaciones de alumbrado público

La consolidación de la tecnología LED en iluminación la convierte en la referencia en el diseño o renovación de estas instalaciones de alumbrado exterior. El diseño de las instalaciones de Alumbrado Público está viviendo evoluciones técnicas continuas, aparición de puntos débiles a reforzar y valoraciones de consecuencias más significativas detectadas.

La mejora en la capacidad de controlar las emisiones en el entorno de la radiación azul (< 500 nm), responsables principales de efectos relevantes de contaminación lumínica (dispersión atmosférica, alteración de patrones biológicos de seres vivos, ...), ha obligado a que tanto legislaciones como productos y componentes de luminarias viales estén adaptándose.

Se van a analizar las modificaciones recientes de legislaciones en diferentes administraciones y las pautas de organismos internacionales (UNESCO, Starlight Initiative,...) que se han establecido para asegurar instalaciones más sostenibles y saludables manteniendo criterios de ahorro y eficiencia energética. Asimismo, se presentarán las soluciones técnicas que están aportando los fabricantes.



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Ante la variedad de normativas y soluciones técnicas, se realiza una comparativa experimental entre productos fabricados con estas alternativas y generamos una guía de selección de equipos adaptados a las nuevas legislaciones.

Palabras clave: iluminación LED; alumbrado público; contaminación lumínica; eficiencia energética

Correspondencia: Alfonso Gago Calderón; agago@uma.es

1. Introducción

La consolidación de la tecnología LED en el sector de la iluminación casi ha desterrado del mercado cualquier alternativa tecnológica previa (incandescencia, halógenos, descarga,...) y es la referencia de diseño o renovación de estas instalaciones dado su mayor capacidad de reproducción de color (CRI), capacidad de selección de la temperatura de color (TCC) y la emisión de manera continua en un amplio segmento de la radiación visible, a diferencia de las lámparas de descarga con una distribución espectral constituida por picos concretos de longitudes de onda.

Su implantación en esta última década ha venido acompañada de numerosas evoluciones técnicas, determinación de puntos sensibles o débiles a reforzar y una valoración de las numerosas consecuencias significativas que se derivan de su implantación masiva y que se han detectado en este tiempo por usuarios, técnicos municipales y profesionales y científicos vinculados a este sector.

La mejora en la capacidad de aumentar la eficiencia de emisiones libres en el espectro visible (400 – 700 nm) o con un porcentaje bajo de emisiones en el espectro azul (< 500 nm), responsables principales de efectos relevantes de contaminación lumínica (mayor dispersión por la atmosfera, alteración de patrones biológicos de personas, animales y plantas, ...) (Green, 2022); (Menéndez-Velázquez, 2022), ha supuesto que tanto las legislaciones como los productos y herramientas de desarrollo de luminarias viales estén adaptándose a esta realidad.

De este modo, una de las estrategias emergentes en desarrollo para combatir o paliar la contaminación lumínica (Ashdown, 2021), especialmente el resplandor nocturno, es usar equipos LED de emisión lumínica con temperaturas cálidas ($\leq 3000\text{K}$) o incluso centralizar la emisión en el espectro del ámbar reduciendo significativamente o eliminado completamente las misiones azules y violetas (Esposito, 2023).

Análogamente a los desarrollos tecnológicos y al conocimiento que se está generando con el análisis de las instalaciones realizadas, es posible observar el progresivo proceso de implantación y consolidación de nuevas legislaciones, a niveles español, europeo -EU Green Public Procurement Criteria for Road Lighting and Traffic Signals (Traverso, 2017)- y mundial, así como las pautas de organismos internacionales como la UNESCO (Bonnes, 2004), la *Dark Sky Alliance* (Dunn, 2024) o la *Starlight Initiative* (Starlight Initiative, 2015) para generar instalaciones más sostenibles y saludables, preservando el derecho a observar el cielo (el 80% de la población mundial vive en zonas con contaminación lumínica nocturna significativa (Falchi, 2016) (Flies, 2023)) y manteniendo criterios de ahorro y eficiencia energética (Doulos, 2019) (Gibson, 2021). En general, estas adaptaciones están encaminadas a restringir la temperatura de color de las luminarias y la cantidad de emisión al hemisferio superior (Pothukuchi, 2021).

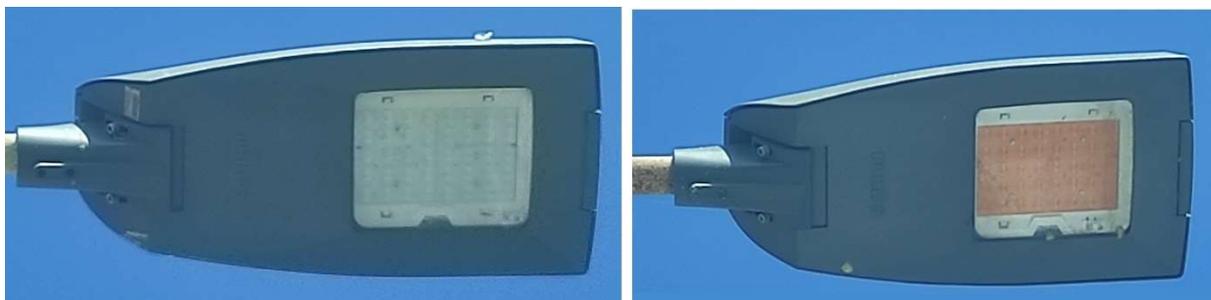
Estos estándares indicados anteriormente, en general, marcan en estos momentos como exigible o recomendable las emisiones de luz en el entorno o por debajo de los 3.000K (luz cálida) al estar estrechamente relacionada y directamente proporcional la cantidad de luz azul emitida con esta variable. Así lo hacen las recomendaciones de la *Dark Sky Alliance* pero también las legislaciones recientes de un, cada vez mayor, número de países como Alemania, Italia, o Eslovenia (Falchi, 2019) (Schroer, 2020), o las recomendaciones gubernamentales a este aspecto como el documento "Requerimientos técnicos exigibles para luminarias con tecnología LED de alumbrado exterior" del Gobierno de España, generado por el Comité Español de Iluminación, que ha pasado fijar una limitación superior en la temperatura de color de 3000K en su última revisión -la número 13 del 2023- frente a las anteriores donde se especificaba este límite como 5000K inicialmente en las primeras versiones del documento a

las más repetida la luz neutra o 4.000K que ha sido el criterio generalizado a lo largo de toda la década de los 2010s y el inicio de los 2020s.

En esta línea de evolución estas mismas entidades recomiendan trabajar con temperaturas de color por debajo de estos niveles máximos y algunas de las propuestas más exigentes, como la *Starlight Initiative* promovida desde la isla de la Palma cuyos preceptos están recogidos en la legislación vigente (Ley del Cielo -Ley 31/1988- y el Reglamento que la regula -R.D. 243/1992 del 13 de marzo de 1992, modificado por el R.D. 580/2017 de 12 de junio-) para la protección contra la contaminación lumínica y que fijan criterios muy específicos para las islas de la Palma y Tenerife para la protección de observatorio astronómico de la primera de las islas citada, marcan no como recomendable sino como obligatorio para ciertas zonas de protección el uso de una iluminación totalmente libre de emisiones azules o con temperaturas en el entorno de los 2200K o menos.

Los fabricantes de luminarias están aplicando dos alternativas para adaptarse a estas nuevas normativas y recomendaciones. Ver Figura 1. Mientras que los fabricantes de emisores LEDs trabajan en el desarrollo de recubrimientos de fosforo (elementos usados para convertir la luz azul de alta energía que emiten los cristales de silicio en radiaciones en el rango del verde, amarillo y rojo) más complejos para conseguir luz a 1800K y 2200K con eficiencias elevadas, otras industrias vinculadas al sector de la iluminación en exteriores como son los fabricantes de lentes secundarias para la adaptación de la luz emitida a las necesidades de los entornos trabajan el desarrollo de lentes con aditivos ópticos para actuar como filtros de luz azul y convertir la luz que emiten LEDs de 3000K o 4000K en soluciones en estos nuevos rangos cuasi libres de este segmento de emisiones consideradas contaminantes (*“Amber coloured lenses eliminate ~99 % of the blue light spectrum from white light LEDs to ensure colours are always warm in urban environments”* Ledil www.ledil.com).

Figura 1. Dos luminarias adaptadas para el cumplimiento de la normativa *Starlight* con LED de 2200K y lentes transparentes y con lentes filtro ámbar. Localización Isla de la Palma, Islas Canarias. [Fuente: elaboración propia]



2. Objetivos

Ante la diversidad de opciones y de criterios de descripción técnicas de los fabricantes de componentes y luminarias LED de muy baja o nula emisión en el espectro azul, en este trabajo realizamos una comparativa experimental entre productos fabricados con estos paradigmas presentados: (1) LEDs con recubrimientos de fosforo de muy baja temperatura de color o emisión ámbar y lentes transparentes y (2) LEDs con recubrimientos de fósforo estándar y lentes con filtros de luz azul. Así, detallamos los resultados obtenidos generando una guía de uso para la selección de equipos adaptados a las diferentes normativas y legislaciones.

Con este fin, se va a determinar con qué tipo de LED PC de luz blanca, en los rangos más estandarizados a nivel comercial caracterizadas por su TCC [luz cálida (3000K) neutra (4000K) y fría (6000K)] y su CRI [medio (70) y elevado (90)], se obtienen mejores prestaciones de emisión de luz aplicando lentes con filtros del espectro de la luz azul. Los valores luminotécnicos de emisión generados y de eficiencia energética obtenidos se van a comparar

con los resultados que ofrecen el uso de LEDs emisores de luz blanca fabricados con cubiertas de fósforo (LED PC White) específicas para generar estas temperaturas de color de muy bajo valor en condiciones de consumo energético y configuración de montaje similares.

Este análisis previo se va a realizar con dispositivos y sistemas en estado de nuevo. Como último objetivo del trabajo, se analizará también la degradación de estas tecnologías con el paso del tiempo. Para ello simulamos la evolución de los valores luminotécnicos de equipos cuyos componentes se exponen a la radiación solar ultravioleta (UV) mediante ciclos acelerados de exposición a luz UV artificial. Con estos datos es posible extrapolar y comparar el comportamiento esperado de ambas soluciones una vez instaladas y transcurrido un tiempo funcionando en un entorno exterior expuesto de manera directa a la acción del sol.

3. Metodología

3.1 Comparativa comportamientos fotométricos de lentes ámbar y LED muy bajo TCC

Se han fabricado 9 matrices de LEDs con diferentes emisores de luz según se detalla en la Tabla 1. Todas ellas usan LEDs del mismo fabricante CREE de familia XP-G3 que tiene modelos desde los 6000K hasta los 1800K y dos rendimientos cromáticos (CRI) diferentes: >70 & > 90 y de la familia XP-E2 para emisores del tipo PC-Ámbar (Zhang, 2011).

Tabla 1: Listado de matrices de LED ensayadas. [Fuente: elaboración propia]

LED CREE		Especificaciones técnicas nominales		
ID	Referencia	TCC	CRI	Minimum Luminous Flux (lm) @350mA 85°C
1	XPGDWT-01-0000-00M50	6000K	> 70	172 [Bin S5]
2	XPGDWT-01-0000-00E50	6000K	> 90	114 [Bin R2]
3	XPGDWT-BS-CACE-A0LE5	4000K	> 70	164 [Bin S4]
4	XPGDWT-U1-0000-00FE5	4000K	> 90	122 [Bin R3]
5	XPGDWT-BS-CACE-A0KE7	3000K	> 70	164 [Bin S4]
6	XPGDWT-U1-0000-00E7G	3000K	> 90	114 [Bin R2]
X	XPGDWT-B1-CACE-00GEA	2200K	> 70	139 [Bin R5]
Y	XPGDWT-01-0000-00FBE	1800K	> 70	122 [Bin R3]
Z	XPEBPA-L1-0000-00C01	PC-ÁMBAR	--	100 [Bin Q4] @350mA 25°C

Las matrices están formadas por 2 ramas en paralelo de 12 LED con los emisores desplegados para poder adaptar lentes sobre bloques de 2x2 LEDs de 50x50 mm. Los binnes elegidos para cada TCC son de la gama más alta del fabricante teniendo en cuenta que las eficiencias máximas no son equiparables para cada temperatura de color.

Se va a usar en este experimento lentes del fabricante LEDIL. Este es uno de los primeros referentes de este tipo de producto que ha generado un portafolio específico de este tipo de lentes tintadas que además cuenta con modelos de lentes para la generación de fotometría equivalentes con y sin filtro. Se han seleccionado 3 modelos de lentes de las que se pueden conseguir piezas tanto en el formato sin tinter como tintado para tres tipos diferentes de fotometría según la clasificación de la IESNA (Sociedad de Ingenieros de Iluminación de Norteamérica). Los modelos de lentes se describen en la Tabla 2.

Es de destacar de estos valores de la Tabla 2 que, mientras que los rendimientos declarados por el fabricante para las tres lentes transparente son idénticos con un 94% de valor, el

rendimiento para las lentes con filtro ámbar se especifica como un rango abierto que llega a ser de hasta 10 puntos (69-70%).

Para evaluar el funcionamiento de las 10 matrices de LED (ver figura 2) utilizando las diferentes lentes detalladas se va a medir el flujo luminoso total y el diagrama fotométrico de cada unidad de medidas con un goniofotómetro de doble reflexión diseñado por la Universidad de Málaga homologado y calibrado por la Agencia Nacional de Acreditación Española [ENAC] (Muñoz-Martínez, 2006) (ver Figura 3). También se obtendrán tanto el diagrama espectral de emisión como los valores de TCC y CRI generados usando un espectrómetro MK350S Premium del Fabricante: UPRtek.

Todas las matrices de LED se alimentan usando un mismo modelo de fuente de alimentación (Meanwell XLG-50-AB). Estas cuentan con un potenciómetro manual con el que se calibra la corriente de salida y se fija una misma potencia para todas las matrices de LED.

Tabla 2: Listado de lentes LED ensayadas. [Fuente: elaboración propia]

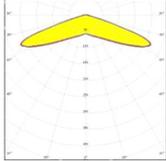
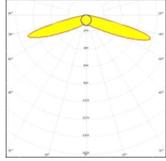
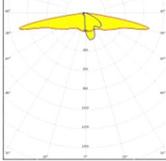
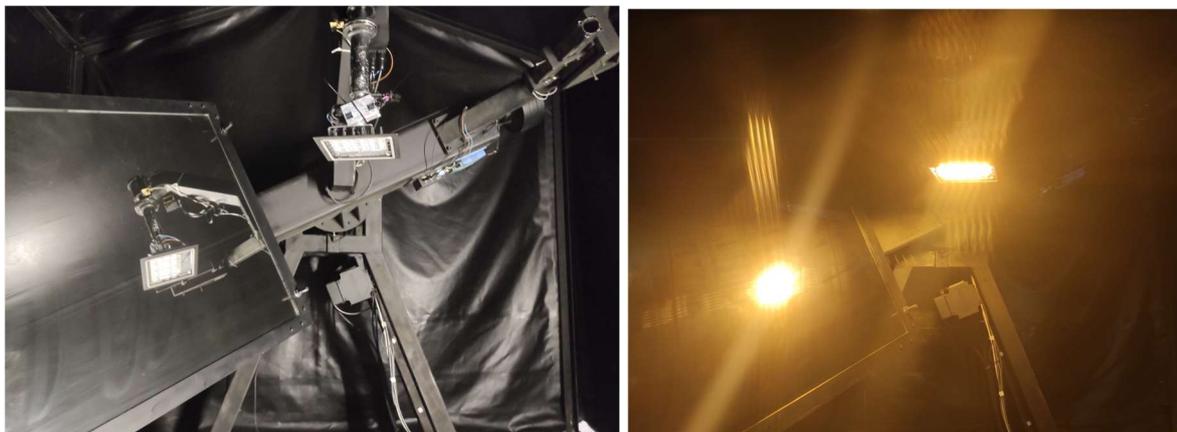
Especificaciones técnicas Lentes LEDIL				
ID	Referencia del Fabricante	Tipo de Vial	Rendimiento nominal	Diagrama fotométrico
A2	C14680_STRADA-2X2-VSM	IESNA Tipo V	94%	
A1	C18606_AMBER-2X2-VSM		74-80%	
B2	C15135_STRADA-2X2-T1	IESNA Tipo I. Simétrico.	94%	
B1	C18513_AMBER-2X2-T1		77-84%	
C2	C15021_STRADA-2X2-SCL	IESNA Type II/III	94%	
C1	C18607_AMBER-2X2-SCL		69-79%	

Figura 3: Goniofotómetro para medidas experimentales. [Fuente: elaboración propia]



Tanto las medidas en el goniofotómetro como con el espectrómetro no se realizan con los equipos arrancados en frío (temperatura ambiente). Metodológicamente se encienden previamente para que estas alcancen un modo de trabajo estabilizado en funcionamiento con una temperatura del cristal equivalente a un funcionamiento real. Todas las luminarias están encendidas, al menos, 30 minutos antes de hacer las medidas en un laboratorio climatizado a 25°C (UNE-EN 13032-4:2016 Luz y alumbrado. Medición y presentación de datos fotométricos de lámparas y luminarias. Parte 4: Lámparas LED, módulos y luminarias). Igualmente, se realizan tres medidas consecutivas de cada luminaria, registrando el valor medio de la emisión lumínica (lúmenes), de la TCC, del CRI, de la longitud de onda predominante y del cociente entre la radiación del pico de frecuencia de la zona azul con respecto a la radiación del pico de la longitud de onda predominante.

3.2 Degradación de lentes por el efecto de la UV

Con respecto a la estabilidad de las lentes y su degradación con el tiempo de uso, se ha seleccionado una matriz de LEDs de referencia con LEDs de CREE con TCC cálida (3000K) que se usa para medir la variación de propiedades ópticas que sufren las lentes ante una exposición acelerada a radiación UV.

Para ello se utiliza una cámara de ensayos QUV Basic con lámparas UVB-313 (Ver Figura 4) donde se disponen en su base dos conjuntos de lentes con curvas fotométricas de salida equivalentes en los formatos transparente y ámbar (lentes C1 y C2). Mantenemos la matriz de led consignada para el experimento fuera de la cámara climática y sin encender para evitar su degradación. En diferentes momentos, se detiene la exposición y se mide el flujo de salida de la matriz óptica de referencia: A) sin lentes; B) con las lentes transparentes y C) con las lentes ámbar, así como la temperatura de color generada en cada caso. El ensayo se ha realizado según la norma UNE-EN ISO 4892-3:2016 "Plásticos. Métodos de exposición a fuentes luminosas de laboratorio. Parte 3: Lámparas UV fluorescentes (ISO 4892-3:2013)".

4. Resultados

4.1 Comportamientos fotométricos de lentes ámbar y LEDs con muy baja TCC.

Los resultados de las medidas realizadas para diferentes combinaciones de matrices de LEDs y lentes según la metodología descrita se exponen en la Tabla 3. Se especifica para cada combinación de matriz de led y lente los valores de TCC, CRI, longitud de onda predominante y relación entre la cantidad de luz total emitida con respecto a la porción emitida dentro del espectro de la luz azul (< 500 nm) (Criterio de validación de la regulación *Starlight*).

Desde el punto de vista espectral, en los LED de baja temperatura de color y PC-Ámbar aparece siempre un pico en el entorno 440-450 nm siendo este el máximo del rango del color azul (< 500 nm). En los LED blancos (≥ 3000 K) usando lentes ámbar para conseguir el pico máximo del azul siempre se da en el extremo del rango 499 nm. Las lentes ámbar generan una TCC en el mismo rango que los LEDs PC de 2200K.

El uso de LED con CRI elevados y filtros ámbar generan unas L_p (nm) más elevadas que sus equivalentes en TCC pero con valores de CRI más bajos. Solo estos últimos cumplen con el requisito de L_p incluido en 595 ± 10 nm (Criterio de validación de la regulación *Starlight*). Los criterios mencionados buscan una reproductividad cromática similar a las lámparas de descarga de vapor de sodio de alta y baja presión, mientras que no hacen ninguna incidencia en aplicar mejoras dentro de la reproductividad cromática de la luz que sí permite esta tecnología sin necesidad de incluir cantidades significativas de luz azul. Este aspecto no se valora regulatoriamente por las legislaciones vigentes.

Tabla 3: Resultados de las medidas fotométricas realizadas. [Fuente: elaboración propia]

B.O.		Medidas Luminotécnicas					
LED	Lente	Flujo luminoso [lm]		TCC (K)	CRI	Lp (nm)	Radiación[Lp(blue)]/Radiación[Lp] (Frecuencia pico azul)
1	A1	4321	79,0%	3098	50	569	0,067 (499 nm)
1	A2	5469	100%	6790	75	446	1,000 (446 nm)
1	B1	4559	77,0%	3364	57	570	0,127 (499 nm)
1	B2	5902	100%	6776	75	447	1,000 (447 nm)
1	C1	Sin medida		2826	47	574	0,040 (499 nm)
1	C2	Sin medida		6163	73	446	1,000 (446 nm)
2	A1	3459	69,0%	2810	60	569	0,040 (499 nm)
2	A2	5016	100%	6858	93	450	1,000 (450 nm)
2	B1	3578	72,0%	3115	69	569	0,186 (499 nm)
2	B2	4965	100%	6357	93	450	1,000 (450 nm)
2	C1	Sin medida		2502	57	573	0,071 (499 nm)
2	C2	Sin medida		5995	91	450	1,000 (450 nm)
3	A1	Sin medida		2479	51	590	0,030 (499 nm)
3	A2	Sin medida		4038	72	440	1,000 (440 nm)
3	B1	4566	80,5%	2625	59	590	0,059 (499 nm)
3	B2	5677	100%	4119	73	441	1,000 (441 nm)
3	C1	3979	73,0%	2321	48	589	0,019 (499 nm)
3	C2	5406	100%	3862	71	441	1,000 (441 nm)
4	A1	Sin medida		2494	65	609	0,103 (499 nm)
4	A2	Sin medida		4363	93	450	1,000 (450 nm)
4	B1	3715	77,5%	2709	72	610	0,193 (499 nm)
4	B2	4794	100%	4402	93	450	1,000 (450 nm)
4	C1	3184	69,0%	2227	61	610	0,056 (499 nm)
4	C2	4579	100%	4195	92	451	1,000 (451 nm)
5	A1	4445	82,0%	2220	54	599	0,022 (499 nm)
5	A2	5415	100%	3262	76	598	0,972 (446 nm)
5	B1	4428	75,5%	2418	61	598	0,054 (499 nm)
5	B2	5865	100%	3288	75	596	0,970 (446 nm)
5	C1	3844	80,5%	2187	52	596	0,018 (499 nm)
5	C2	4778	100%	3096	74	598	0,766 (446 nm)
6	A1	3162	78,0%	2157	69	620	0,066 (499 nm)
6	A2	4062	100%	3119	93	620	0,490 (453 nm)
6	B1	Sin medida		2312	75	619	0,125 (499 nm)
6	B2	Sin medida		3122	93	620	0,486 (453 nm)
6	C1	2647	73,0%	2010	65	620	0,040 (499 nm)
6	C2	3628	100%	3084	93	618	0,436 (452 nm)
X	A2	4953		2164	73	609	0,174 (449 nm)
X	B2	4832		2180	74	609	0,098 (449 nm)
X	C2	4519		2167	73	609	0,095 (448 nm)
Y	A2	3992		1796	73	618	0,062 (444 nm)
Y	B2	3871		1815	73	615	0,064 (444 nm)
Y	C2	3526		1806	72	615	0,065 (444 nm)
Z	A2	2783		1822	41	596	0,010 (445 nm)
Z	B2	2678		1811	41	598	0,011 (443 nm)
Z	C2	2728		1813	41	598	0,012 (444 nm)

Los LEDs de CRI más elevado tienen una mayor cantidad de luz azul que los de CRI bajo que se da en el extremo del rango (499 nm). Igualmente, tienen una importante cantidad de luz roja que hace que su Lp se desvíe del valor de 595 nm a la parte del espectro de ese color.

Los LED blancos de temperatura de color de 1800 K tienen una TCC similar al PC-Ámbar pero con un CRI muy superior (+ 30 puntos). Sin embargo, su L_p se aleja mucho del valor de 595 nm desviándose hacia el color rojo.

Todas las soluciones analizadas cumplen, en general, con el objetivo de minimizar las emisiones azules, aunque solamente las soluciones que lo eliminan cuasi completamente son los equipos de lentes ámbar y el led PC-Ámbar y, de este modo, son las dos únicas soluciones que cumplen con la totalidad de las especificaciones concretas de la *Starlight Initiative*.

Desde el punto de vista de la eficiencia energética las soluciones que usan PC-Ámbar consiguen unos resultados mucho más bajos que el resto de las opciones analizadas; mientras que las otras dos soluciones de LED de baja emisión en el azul basados en conversión con fósforo (2200K y 1800K) ofrecen resultados de emisión lumínica mejores que las que se consiguen con las lentes con filtros. En general, esta superioridad se puede atribuir al peso de las radiaciones por debajo de los 500 nm que, aún siendo pequeñas, se mantienen en estos emisores. El rendimiento que se obtiene en las radiaciones > 500 nm se puede valorar como equivalente en las dos opciones.

Como era esperable, los LED con temperaturas de color frías y neutras tienen pérdidas más significativas que los cálidos al usar las lentes con filtros por el propio porcentaje de luz azul que emiten de base. De este modo, la solución menos eficiente para estas lentes es usar LEDs fríos. Los resultados efectivos de irradiancia en los LEDs neutros y cálidos son similares por lo que las dos opciones serían una opción viable desde este punto de vista, aunque como se estableció al inicio de esta sección, el espectro fotométrico de la salida se ajusta mucho mejor a los requisitos de especificaciones de trabajo para entornos naturales protegidos.

Por último, es relevante destacar como los valores de eficiencia de las lentes depende de la modificación que generan sobre la salida propia de los encapsulados LED (diagrama hemisférico de 120° de salida). Esta pérdida de rendimiento causada por la salida de forma es similar tanto en el formato transparente como en modo filtro ámbar.

4.2 Degradación de las lentes transparentes y UV

La Figura 4 muestra las fotografías de dos lentes (transparente y ámbar) al inicio y al final del experimento de medida de la degradación. Se puede comprobar como una mera inspección visual no muestra un deterioro o diferenciación evidente entre los dos momentos descritos. Sin embargo, sí existe una degeneración que provoca una reducción de sus rendimientos de transmisión lumínica y en la TCC de la luz que emiten.

La figura 5 recoge la evolución del comportamiento de las lentes transparentes a lo largo del experimento. Se pueden observar dos curvas de pendiente negativa sostenida similar, reduciéndose tanto el rendimiento (pasando de un 95,12% inicial hasta el 87,94% tras superar las 2000 horas de prueba, lo que supone una variación de más de 7 puntos porcentuales) como la temperatura de color generada (evolucionando desde una salida inicial de 3147K hasta unos 2928K finales en el mismo tramo de tiempo lo que supone una variación de 219K).

La Figura 6 muestra los valores tomados en la evolución del comportamiento de las lentes ámbar en los mismos instantes de tiempo que las lentes transparentes. En este caso, la eficiencia de transmisión de las lentes, al igual que en el caso anterior, se va reduciendo, pero en un porcentaje menor. Así, pasamos de una eficiencia inicial del 75,78% hasta el 72,69%, lo que supone una reducción total en el proceso de 3,09 puntos porcentuales.

Con respecto a la evolución de la variación de la temperatura de color emitida no se aprecia una curva de tendencia de evolución consistente, bajando inicialmente para entrar en una zona estable y volver a subir en la parte final del experimento. En cualquier caso, todas las medidas realizadas quedan comprendidas en unos rangos de dispersión muy pequeño, con límite superior en 2192K y límite inferior en 2146K (separación de 46K).

Figura 4: Equipo usado para el envejecimiento de las lentes mediante UV y resultado visual del experimento. [Fuente: elaboración propia]



Figura 5: Evolución de la TC y rendimiento de emisión de lentes transparentes en función de la degradación por UV. [Fuente: elaboración propia]

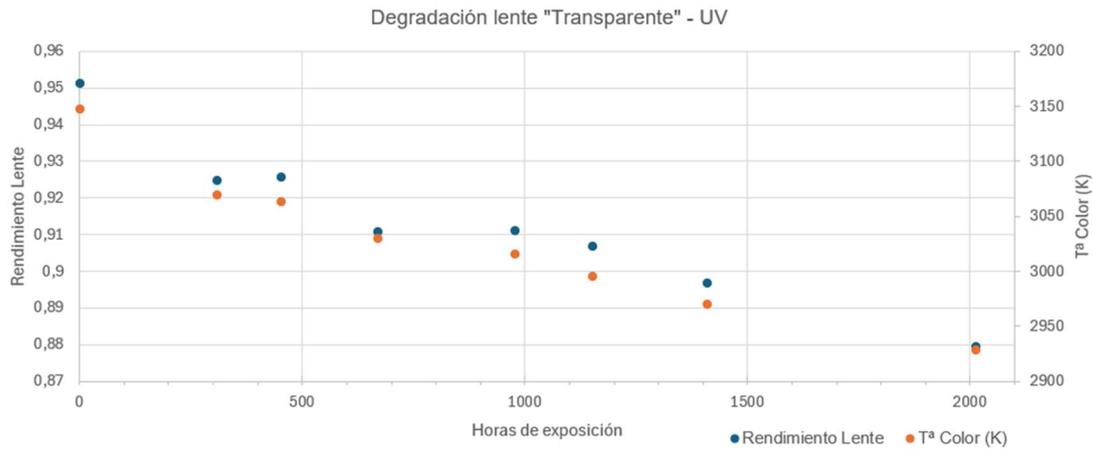
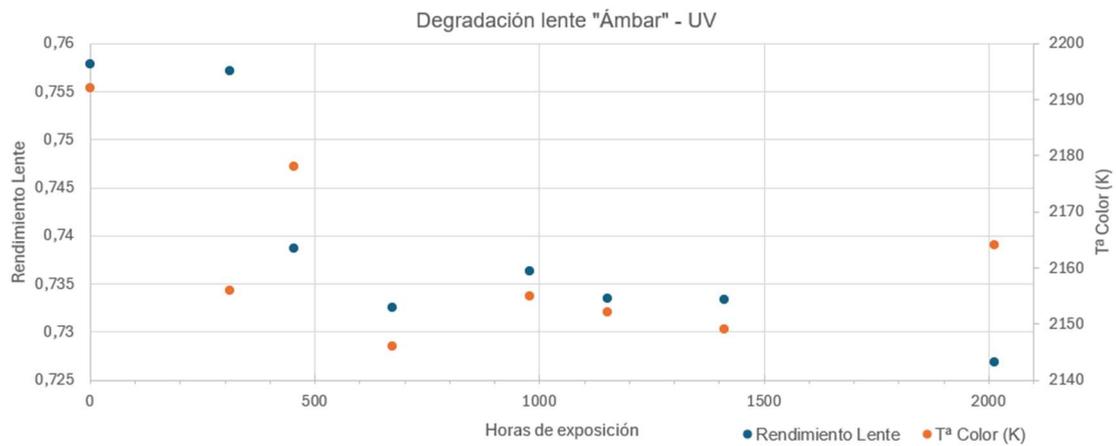


Figura 6: Evolución de la TC y rendimiento de emisión de lentes ámbar en función de la degradación por UV. [Fuente: elaboración propia]



5. Conclusiones

La investigación y el desarrollo tecnológico que se está implementando en los equipos de iluminación destinados a iluminación exterior se está enfocando no solamente en la búsqueda de soluciones cada vez más eficientes energéticamente hablando, sino que se está sometiendo, incluso con más fuerza, a criterios de sostenibilidad y de calidad ambiental, buscando la reducción de la contaminación lumínica que se genera, tanto para la comodidad y bienestar de los seres vivos como para la reducción del brillo nocturno y la visibilidad del cielo estrellado. En este sentido, se están desarrollando modelos de luminarias con emisiones libres de luz azul, el espectro más contaminante de los emitidos por los LEDs PC blancos. Este es un reto tecnológico que supone transformar o eliminar la emisión natural de estos dispositivos que radian haces monocromáticos entre los 440-450 nm.

En este trabajo se han comparado las dos líneas de trabajo que se están desarrollando por la industria: lentes con filtros para eliminar la luz azul y emisores LED con capas de fósforo de baja permeabilidad que transforman la mayor parte de la radiación azul emitida desde su cristal de silicio.

El análisis de las soluciones disponibles en el mercado con los componentes en estado de nuevo indica que las lentes de filtro azul son la mejor solución global, alcanzando un comportamiento visual óptimo por su espectro generado y una eficiencia suficiente usando como elementos emisores LED de TCC cálidos (3000K) y CRI 70. Las soluciones basadas en conversión de fósforo bien quedan muy por debajo en rendimiento (caso PC-Ámbar) u obtienen mejores eficiencias de flujo emitido, pero con una emisión fotométrico de peor calidad o más contaminante según las especificaciones de los estándares internacionales. La elección de uso de una u otra solución estará condicionado por la existencia requisitos de protección del medio ambiente más o menos elevados (parques naturales, espacios protegidos, ...) en cada tipo de Proyecto específico y la necesidad de obtener los mejores valores de eficiencia energética posible.

Este trabajo también ha analizado la degradación esperada de las dos alternativas en estudio por la exposición continuada a la radiación UV solar. Se establece que la afección de las lentes transparentes es mayor que en el caso de las lentes ámbar tanto en el nivel de pérdida de radiación emitida que provocan como la composición espectral de la misma. Las lentes transparentes sufren una variación significativa de su luz emitida hacia la reducción de temperatura de color, lo que indica que el segmento donde más se pierde transmitancia en la lente es en de la radiación de menor longitud de onda haciendo que ganen peso las radiaciones verdes/amarillas/rojas con respecto a las azules. Esto se mantiene en el comportamiento de las lentes ámbar, donde el filtrado de la luz azul natural de la lente hace que la degradación en este segmento no sea relevante y, así, las modificaciones de la temperatura de color son poco significativas por lo que el espectro de salida sufre pequeñas o nulas modificaciones.

Teniendo en cuenta los experimentos realizados, la principal desventaja del uso de las lentes ámbar es la de tener mayores pérdidas de emisión obteniendo de equipos con peores eficiencias energéticas (95,12% Vs 75,78% de rendimiento de las lentes sin y con filtro). Sin embargo su mayor resistencia al efecto de la luz UV hace que esta desventaja se menor considerando el comportamiento del equipo a lo largo de toda su vida útil (87,94% Vs 72,69% respectivamente)

Por último, con respecto a la percepción visual que la luz que las instalaciones provocan en conductores y viandantes, es significativo destacar que una variación de más de 200 K en la TCC es ya perceptible por las personas, que tenemos referencias permanentes de los valores estandarizados de estas variables por las diferentes instalaciones de alumbrado que observamos en nuestra vida cotidiana. Así, la percepción de variaciones se relacionan inmediatamente con la degradación de las luminarias. Por el contrario, la variación de niveles

de radiación inferiores a un 30% en los valores normales de las instalaciones de alumbrado no son percibidos por el ojo humano como una reducción significativa y no se interpreta como un deterioro evidente de las luminarias. Así, las pérdidas en eficiencia repercuten en un menor cumplimiento de los requerimientos estandarizados recomendados para las instalaciones y las variaciones en la TCC en una percepción visual sensible de la degradación de los equipos. En ambos casos, la afección del paso del tiempo es en mayor en las lentes transparentes que en las lentes ámbar. Este condicionante mejora el comportamiento comparativo de los filtros ámbar con respecto a las soluciones basadas en la conversión de fósforo y el uso de lentes sin filtro haciendo que la diferencia de eficiencias iniciales encontradas en los equipos nuevos, se equiparen con estas variaciones por la exposición solar continuada.

Referencias

- Ashdown, I. (2021). Quantifying Light Pollution Sources. IES Illuminating Engineering Society USA.
- Bonnes, M., Carrus, G., Bonaiuto, M., Fornara, F., & Passafaro, P. (2004). Inhabitants' environmental perceptions in the city of Rome within the UNESCO programme on man and biosphere framework for urban biosphere reserves. *Ann. NY Acad. Sci.*, 1024, 175-186.
- Doulos, L. T., Sioutis, I., Kontaxis, P., Zissis, G., & Faidas, K. (2019). A decision support system for assessment of street lighting tenders based on energy performance indicators and environmental criteria: Overview, methodology and case study. *Sustainable Cities and Society*, 51, 101759.
- Dunn, N., & Edensor, T. (2024). *Dark skies: places, practices, communities* (p. 294). Taylor & Francis.
- Esposito, T., & Radetsky, L. C. (2023). Specifying non-white light sources in outdoor applications to reduce light pollution. *Leukos*, 19(3), 269-293.
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C., Elvidge, C. D., Baugh, K., ... & Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science advances*, 2(6), e1600377.
- Falchi, F., Furgoni, R., Gallaway, T. A., Rybnikova, N. A., Portnov, B. A., Baugh, K., ... & Elvidge, C. D. (2019). Light pollution in USA and Europe: The good, the bad and the ugly. *Journal of environmental management*, 248, 109227.
- Flies, E., Allegretto, G., Kendal, D., Somerville, A., Anderson, S., Ogg, M., & Pendoley, K. (2023). The human values of dark skies: Light pollution as an emerging justice issue.
- Gibson, J., Olivia, S., Boe-Gibson, G., & Li, C. (2021). Which night lights data should we use in economics, and where?. *Journal of Development Economics*, 149, 102602
- Green, R. F., Luginbuhl, C. B., Wainscoat, R. J., & Duriscoe, D. (2022). The growing threat of light pollution to ground-based observatories. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 30(1), 1.
- Menéndez-Velázquez, A., Morales, D., & García-Delgado, A. B. (2022). Light pollution and circadian misalignment: a healthy, blue-free, white light-emitting diode to avoid chronodisruption. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1849.
- Pothukuchi, K. (2021). City light or star bright: a review of urban light pollution, impacts, and planning implications. *Journal of Planning Literature*, 36(2), 155-169

Starlight Initiative. (2015). Declaration in defence of the night sky and the right to starlight. *La Palma Biosphere Reserve*: <http://www.starlight2007.net/pdf/StarlightDeclarationEN.pdf>. Accessed, 15.

Schroer, S., Huggins, B. J., Azam, C., & Hölker, F. (2020). Working with inadequate tools: legislative shortcomings in protection against ecological effects of artificial light at night. *Sustainability*, 12(6), 2551.

Traverso, M., Donatello, S., Moons, H., Rodriguez, R., Quintero, M.G.C., ... & Hoof, T. G. V. (2017). Revision of the EU green public procurement criteria for street lighting and traffic signals. *Publications Office of the European Union: Luxembourg*.

Zhang, W. (2011). *Impact of heat on the light output and chromaticity of direct-emitting and phosphor-converted amber LEDs* (Doctoral dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY).

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

