



TESIS DOCTORAL

ESTUDIO DE INDICADORES DE CALIDAD DE FUENTES LUMINOSAS Y SU CORRELACIÓN  
CON LA DISCRIMINACIÓN Y LA APARIENCIA DEL COLOR CON FUENTES  
CONVENCIONALES Y FUENTES LED

Eduardo Manuel Cordero Pérez

Departamento de Física

Conformidad de los Directores:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Pedro Pardo", written over a large, light blue scribble.

Fdo: Pedro J. Pardo

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "M. Suero", written over a large, light blue scribble.

Fdo: María Isabel Suero

2015

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>RESUMEN DE PUBLICACIONES Y RESULTADOS. ....</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>CLASIFICACIÓN DE FUENTES LUMINOSAS.....</b>	<b>8</b>
5.1	Introducción.....	8
5.2	Definiciones.....	8
5.2.1	CIE ( <i>Commission Internationale de l’Eclairage</i> ).....	9
5.2.2	CRI ( <i>Color Rendering Index</i> ).....	9
5.2.3	CCT ( <i>Correlated Color Temperature</i> ). ....	9
5.3	Fuentes Naturales .....	10
5.3.1	Origen de la energía del sol .....	10
5.3.2	Fuentes solares y luz natural .....	11
5.3.3	La luz natural y modelos. ....	13
5.3.4	La luz natural a lo largo del día y el rendimiento intelectual .....	15
5.4	Fuentes incandescentes y halógenas. ....	16
5.5	Lámparas de descarga a alta presión. ....	19
5.5.1	Lámparas de halogenuro metálico .....	21
5.5.1	Lámparas de sodio .....	23
5.5.1	Lámparas de vapor de mercurio .....	25
5.6	Tecnología LED .....	26
<b>6</b>	<b>TECNOLOGÍA LED.....</b>	<b>26</b>
6.1	Introducción.....	26
6.2	Distribución espectral de potencia.....	29
6.3	Aplicaciones .....	31
6.3.1	Señalización dinámica.....	31
6.3.1	Displays y pantallas .....	32
6.3.1	Alumbrado arquitectónico .....	33
6.3.2	Alumbrado vial .....	33
6.3.3	Iluminación interior .....	34
6.3.4	En el automóvil .....	35
6.4	Radiación UV LED .....	37
6.4.1	Tratamiento de aguas .....	37

---

6.4.2	Procesos de endurecimiento.....	38
6.5	LED para agricultura .....	39
6.6	Conclusiones.....	40
<b>7</b>	<b>PROCESO DE CÁLCULO DEL CRI 13.3 1995.....</b>	<b>41</b>
7.1	Antecedentes.....	41
7.2	Procedimiento CIE 13.3-1995 para el cálculo del CRI.....	42
7.2.1	Introducción.....	42
7.2.2	Pasos a seguir.....	42
7.2.3	Generación de la fuente de referencia .....	43
7.2.1	Muestras del procedimiento CIE 13.3-1995 .....	43
7.2.1	Cálculo del CRI según CIE 13.3-1995 .....	45
<b>8</b>	<b>LIMITACIONES DEL PROCEDIMIENTO CIE 13.3 1995 EN LEDS BLANCOS.....</b>	<b>48</b>
8.1	Introducción.....	48
8.1	La relación entre las muestras y la curva espectral de la fuente test .....	48
<b>9</b>	<b>DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>52</b>
9.1	Instrumentos de medida .....	52
9.2	Cabinas de iluminación .....	54
9.3	Muestras utilizadas (NCS).....	58
<b>10</b>	<b>COPIA COMPLETA DE TRABAJOS PUBLICADOS .....</b>	<b>61</b>
<b>11</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>119</b>
<b>12</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>120</b>

## **1 AGRADECIMIENTOS.**

Este trabajo se realizó con mucho esfuerzo y gracias a la dedicación y a la ayuda de muchas personas.

Gracias a mi equipo de trabajo, el Grupo Orión de Óptica de la UEx al completo (Julia, María Isabel, Guadalupe, Francisco, Angel Luís y Pedro). Gracias por enseñarme esta disciplina, por tener paciencia conmigo, por estar siempre pendiente del trabajo y disfrutar con la investigación. Gracias especiales a mis Directores, María Isabel Suero y Pedro Pardo.

Gracias a todos los que colaboraron en los ensayos y participaron como observadores en el laboratorio.

Gracias a mis compañeros de la Escuela de Ingenierías Industriales que también me ayudaron, especialmente a mi amigo y compañero Carlos Cárdenas, por su ánimo constante, su amistad, sus consejos y experiencia.

Gracias a mi familia, a los que debo este trabajo. A mis padres y mi hermana por tanta ayuda siempre. Gracias a Isabel por todo el camino recorrido y mi hija Isabel, que con cada sonrisa, nos ilumina la vida.

## 2 INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN.

En este trabajo teórico y experimental se han estudiado aspectos relacionados con la reproducción cromática y apariencia del color de fuentes luminosas. Los motivos que han llevado a realizar todos los estudios y experiencias que se explican en esta tesis doctoral son, por un lado, la escasez de experiencias con observadores reales que existen a nivel internacional sobre estos conceptos y, por otro, las anomalías que presenta el procedimiento de cálculo vigente del índice de reproducción cromática para la tecnología LED. Esta última circunstancia fue publicada por la *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE) en 2007[1], en la que advertía que el método del cálculo del índice de reproducción cromática actual no ofrece resultados satisfactorios para el caso de la tecnología LED.

El reto de la comunidad científica internacional es, por tanto, conseguir un nuevo parámetro o conjunto de parámetros, que logren cuantificar la capacidad de una fuente luminosa de reproducir los colores y que, dicha capacidad, esté de acuerdo con la opinión de los observadores.

En esta compleja tarea trabajan actualmente varios grupos de investigación internacionales. Con este trabajo, desarrollado dentro del Grupo Orión de Óptica de la UEx, se ha pretendido aportar algo de luz a los problemas planteados.

El texto de este trabajo se ha organizado de la siguiente forma:

- Definición de objetivos.
- Estado actual de fuentes luminosas comerciales.
- Proceso de cálculo del CRI según procedimiento CIE 13.3 1995.
- Limitaciones del procedimiento CIE 13.3 1995 para LEDs blancos.
- Dispositivo experimental.
- Resumen de las publicaciones presentadas.
- Resultados.

- Conclusiones.

### 3 OBJETIVOS.

Los objetivos principales que se persiguen en este trabajo son los siguientes.

- Estudiar la variabilidad de las muestras del álbum NCS ante cambios de iluminantes para poder utilizarlas en pruebas de reproducción cromática.
- Estudiar la capacidad de los observadores para ordenar una serie de muestras donde se varía únicamente el tonoy utilizar los tonos únicos como referencia. Estudiar los cambios al cambiar la fuente luminosa.
- Estudiar la correlación entre los valores calculados de CRI por el procedimiento CIE 13.3 1995 y la opinión de los observadores en pruebas subjetivas de valoración de la naturalidad de una fuente luminosa.
- Identificar las razones por las que se producen las diferencias entre el CRI calculado y la percepción de los observadores para el caso de las fuentes LED.

Para lograr estos objetivos, se han realizado diferentes tareas en el laboratorio previas a la realización de todas las experiencias, como son:

- La medición de todas las curvas de reflectancia de las muestras del álbum NCS
- Creación de una herramienta en MATLAB capaz de operar con curvas de reflectancia y ordenar por diferencias de color.
- Fabricar una cabina de iluminación a medida para realizar las pruebas.

## 4 RESUMEN DE PUBLICACIONES Y RESULTADOS.

Los resultados de esta tesis doctoral se pueden clasificar en tres partes. En la primera de ellas, relacionada con el método de cálculo del CIE CRI, se han realizado aportaciones significativas en cuanto al estudio de la variabilidad de este índice frente al cambio de muestras sobre las que se calcula.

Inicialmente se hizo un estudio de la variabilidad de las muestras NCS ante el cambio de fuente luminosa. Este estudio se hizo empleando como espacio de color CIECAM02, el espacio de apariencia del color que además de integrar una etapa de adaptación cromática permite fijar las condiciones del entorno de la observación. Los resultados de este trabajo fueron comunicados en el IX Congreso Nacional del Color de Alicante en 2010 [2] y sirvieron como punto de partida para posteriores etapas de esta investigación ya que nos confirmó la poca variabilidad en cromaticidad de las muestras del álbum NCS ante cambios de iluminante, permitiendo así ser utilizado para las posteriores partes del trabajo de investigación.

Con este conjunto de muestras estables NCS se realizó el estudio de la variabilidad del algoritmo de cálculo del CRI ante el cambio de muestras. Para ello se procedió a comparar, con un grupo de fuentes luminosas fijo, los resultados obtenidos del CRI empleando las muestras originales definidas por la CIE, otro conjunto de 10 muestras provenientes del ColorChecker también recomendado por la CIE y, finalmente, un conjunto de muestras metámeras para el iluminante D65 con las propuestas oficiales de la CIE. Este conjunto de muestras metámeras se escogió de entre las muestras NCS. Así mismo se estudió la variación del índice de CRI al cambiar el espacio cromático utilizado del  $U^*V^*W^*$  original al CIE  $L^*a^*b^*$ . Los resultados indicaron una gran variabilidad del índice del CRI ante cambios en ambos parámetros (conjunto de muestras y espacio de color) especialmente en fuentes con un perfil espectral con picos, como es el caso de las primeras fuentes LED RGB, y en menor medida, por las fuentes LED blancas. Estos resultados fueron comunicados en la X Reunión Nacional de Óptica en 2012 [3].

A continuación, correspondiendo a una segunda parte del trabajo, ante la variabilidad de los resultados del CRI al cambiar el conjunto de muestras sobre el que se calcula, se realizó un estudio que ha evaluado el tono percibido por los

observadores de distintas muestras del álbum NCS al cambiar de fuente luminosa. Para ello se diseñó y realizó una prueba psicofísica de escalamiento de tono basada en los tonos únicos. Se escogió la variación de tono como variable a estudiar ya que, después de un análisis teórico del algoritmo de CRI y comparándolo con las valoraciones subjetivas de observadores en cuanto a naturalidad de las fuentes luminosas, se vio que es la variación de tono junto con la mayor saturación lo que penaliza a las fuentes LED blancas frente a otros tipos de fuentes de espectro continuo o incluso fluorescente. Los resultados de esta prueba de escalamiento de tono han revelado que los observadores no perciben esas diferencias de tono que el algoritmo de CRI calcula, ya que utilizan como punto de referencia los tonos únicos que permanecen bastante estables ante el cambio de fuente luminosa. Estos resultados han sido comunicados en la 25th Conference of the International Color Vision Society celebrado en 2015 [4] y han sido enviados para su publicación a la revista Journal of the Optical Society of America A[5].

También se ha comprobado si los nuevos índices de color rendering propuestos por varios autores basados en el espacio de apariencia de color CIECAM02 solucionan este problema de la minusvaloración de las fuentes LED blancas frente a las valoraciones de observadores reales. Los resultados, comunicados en el X Congreso Nacional de Color de Valencia [6], indican que el uso de este espacio de apariencia de color no soluciona este problema.

Finalmente, correspondiente a la tercera parte de este trabajo, se ha estudiado si las distintas fuentes luminosas presentan diferentes características en cuanto a la capacidad que tiene un observador de discriminar diferencias de color cuando una escena es iluminada con esa fuente luminosa. Los resultados de este trabajo de investigación revelaron un resultado muy novedoso: existe una correlación entre la temperatura de color de una fuente luminosa y la capacidad de los observadores de percibir diferencias de color pequeñas. Esta diferente capacidad provocada por la fuente no está asociada al perfil espectral concreto sino a la distribución de energías en las zonas del espectro donde son más sensibles los tres tipos de conos, por lo que se manifiesta a través de una temperatura de color óptima en torno a 6500K. Estos resultados dieron lugar a dos publicaciones en revistas con índice de impacto y que ocupan posiciones relevantes en su categoría del JCR[6-7].



## 5 CLASIFICACIÓN DE FUENTES LUMINOSAS.

### 5.1 Introducción

La vida diaria del mundo desarrollado no se entiende sin luz artificial. El hombre ha convertido en una necesidad la disponibilidad de luz en cualquier momento, situación y actividad. Esta flexibilidad no ha sido siempre posible pero, con el desarrollo, las sociedades de nuestro entorno disponen de la posibilidad técnica y económica de acceder a soluciones de iluminación para sus propósitos.

Se expondrán las principales características de las fuentes de luz, también denominadas lámparas, que están vigentes en la actualidad. Se expondrán los atributos y características principales de las fuentes comerciales existentes, haciendo especial hincapié en la distribución espectral de potencia.

Las características principales de una fuente son, el precio, la vida útil, la potencia eléctrica, la relación lm/W, su distribución espectral de potencia, índice de reproducción cromática, temperatura de color y las características de control y alimentación. De todos estos parámetros o características, este trabajo se centra en la distribución espectral de potencia como responsable de la reproducción cromática y todos los aspectos relacionados con la visión del color.

### 5.2 Definiciones

En los siguientes apartados aparecerán diferentes conceptos y definiciones que es conveniente introducirlas en esta parte del trabajo.

- CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*).
- CRI (*Color Rendering Index*).
- Radiación del cuerpo negro de Planck.
- CCT (*Correlated Color Temperature*).

### **5.2.1 CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*).**

CIE es el organismo internacional que coordina todo lo relacionado con la luz, la iluminación, la visión del color, la fotobiología e imagen. Desde su fundación en 1913 ha publicado numerosos trabajos que han sido admitidos por la comunidad científica y la industria como estándar internacionales.

### **5.2.2 CRI (*Color Rendering Index*)**

CRI es un indicador, asociado a la distribución espectral de potencia de una fuente luminosa, que cuantifica la capacidad de reproducir colores de dicha fuente. Se denomina Índice de Reproducción Cromática (IRC o Ra) o CRI (*Color Rendering Index*). Toma valores entre 0 y 100, normalmente. Incluso puede tomar valores negativos. Se considera que una fuente luminosa con un valor de CRI entre 90 y 100 reproduce muy bien los colores, mientras que si dicho valor es inferior a 50, se consideran fuentes que reproducen los colores de forma deficiente.

En la norma de alumbrado interior UNE 12464.1 [8] se pueden consultar los valores de CRI necesarios (mínimos) a conseguir por parte de la instalación de iluminación, según la actividad que se desarrolle en cada parte del edificio o industria.

Para obtener el valor de CRI existe un procedimiento normalizado definido por CIE. El procedimiento vigente es un estándar internacional y está definido en la publicación CIE 13.3 1995 [9], que se expondrá más adelante.

### **5.2.3 CCT (*Correlated Color Temperature*).**

La temperatura de color es un concepto que proviene de la ecuación de radiación de Planck del cuerpo negro y se mide en grados Kelvin. La temperatura de color correlacionada de una fuente luminosa blanca coincide con la temperatura de color del cuerpo negro con la misma apariencia aunque no tiene porqué estar la cromaticidad de dicha fuente sobre el *locus spectral*, a diferencia de lo que le ocurre a los radiadores térmicos [10].

La temperatura de color correlacionada se denomina cálida en valores entre 2700K y 3500K, neutra entre 3500K y 5000K y fría para valores superiores a 5000K.

### 5.3 Fuentes Naturales

Son fuentes que proceden de la naturaleza. La fuente más importante es el sol, que proporciona luz y energía a nuestro planeta.

La luz natural presenta una composición espectral ideal para la vida animal y vegetal en la tierra. El reloj biológico de la vida depende de la luz del sol, del día y de la noche. Las plantas y los animales prosperan con la luz natural. La intensidad y rango de las radiaciones que las formas de vida reciben de la luz natural, son difíciles de imitar en condiciones artificiales.

Con la llegada de la revolución industrial y el posterior desarrollo, el mundo trabaja las 24h del día y, para muchas actividades, no hay separación entre el día y la noche. Las actividades laborales y técnicas, por tanto necesitan por lo general luz artificial en algún momento del día. Como ejemplo, en las fábricas agroalimentarias, la luz natural no está permitida.

#### 5.3.1 Origen de la energía del sol

El interior del Sol es un gran reactor nuclear donde cada segundo, 564 millones de toneladas de hidrógeno se convierten en 560 millones de toneladas de helio. La diferencia de cuatro millones de toneladas se transforma en energía de acuerdo a la relación de Einstein,  $E = mc^2$ , donde  $m$  es la cantidad de masa perdida,  $c$  es la velocidad de la luz y  $E$  la cantidad de energía resultante.

Este proceso de producción de energía, millones de veces más eficiente que la combustión química, ha mantenido al Sol brillando durante casi 5000 millones de años y puede mantenerlo así por lo menos una cantidad igual de años más. En general, todas las estrellas obtienen su energía de reacciones de este tipo; sus núcleos son enormes reactores nucleares en explosión continua, donde unos elementos se funden para formar otros, liberando en el proceso rayos gamma y neutrinos en cantidades formidables. Las temperaturas y

presiones tan altas que imperan en el interior de las estrellas permiten que estas reacciones se den en forma espontánea.

En el núcleo del Sol, a una temperatura de cerca de 20 millones de grados y a una presión de 100000 millones de veces la de la atmósfera de la Tierra al nivel del mar, una gran cantidad de electrones y núcleos atómicos se mueven en todas direcciones. Las colisiones entre los núcleos aquí no sólo son posibles, sino inevitables, dando lugar a las reacciones de fusión. Todo esto ocurre en una esfera de aproximadamente un décimo del radio del Sol, que es donde se produce toda la energía que, de aquí, viaja hasta su superficie, y finalmente es radiada hacia el espacio.

Otras fuentes naturales proceden del reino animal y deben su origen al efecto de la “bioluminiscencia”, que se genera como consecuencia de una reacción química, dentro de seres vivos, mediante la cual una sustancia bioquímica, la luciferina, sufre una oxidación catalizada por la enzima luciferasa, y en este proceso se emite luz. Se trata, por tanto, de una conversión directa de la energía química en energía lumínica. Este fenómeno está extendido en todos los niveles biológicos: bacterias, hongos, celentéreos, gusanos, moluscos, cefalópodos, crustáceos, insectos, equinodermos, peces,...etc.

### **5.3.2 Fuentes solares y luz natural**

Desde el punto de vista arquitectónico, la luz natural es un factor muy importante de diseño, más apreciado en países con menor número de horas de Sol al año o menor radiación solar. La gestión del aporte de luz natural en el diseño de un edificio resulta importante por dos motivos fundamentales. En primer lugar, porque con un buen aprovechamiento de luz natural, el edificio será energéticamente más eficiente y, en segundo lugar, porque si se maximiza el uso de la luz natural, se tendrá mejor confort visual.

Además del aporte de luz natural clásico mediante ventanas, huecos o lucernarios, es posible introducir la luz natural dentro de un edificio mediante otras estrategias. Existen en el mercado captadores de luz natural que son capaces de concentrar la radiación y guiarla al interior bien mediante tubos con alto grado de reflexión o mediante fibra óptica. En cualquiera de los casos, los sistemas han de incorporar filtros UV para poder ser empleados e iluminación interior.

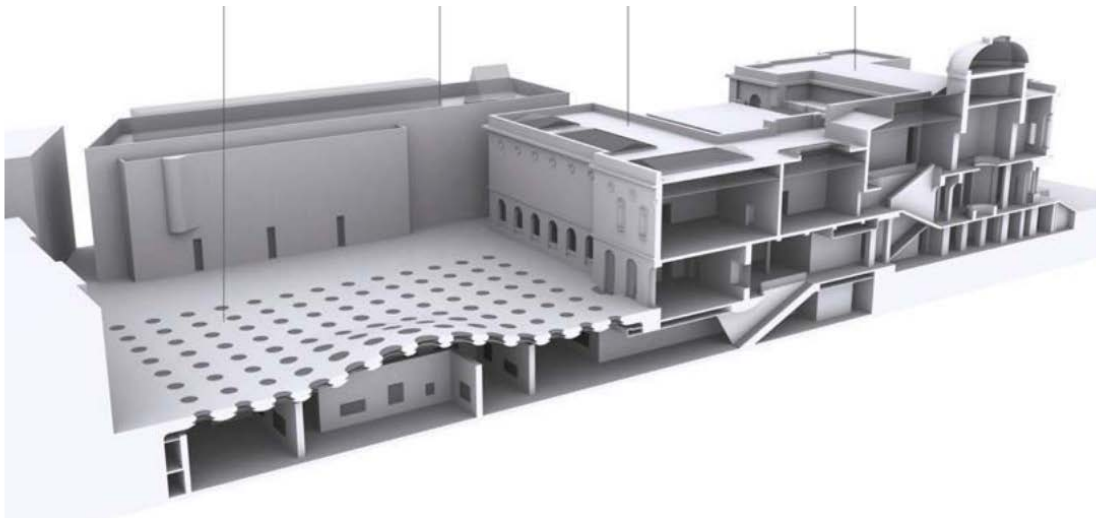
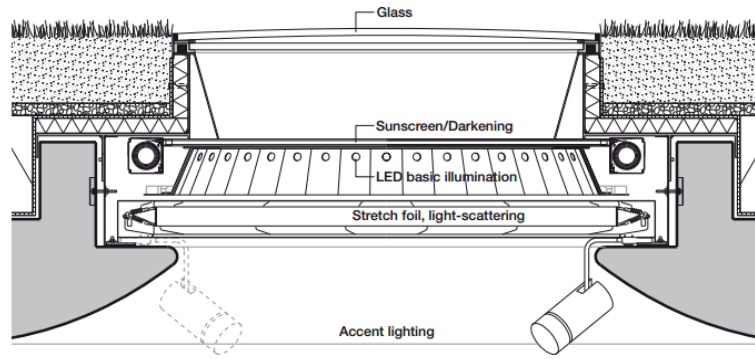


**Ilustración 1** Sistema de iluminación interior mediante fibra óptica



**Ilustración 2** Captador solar con tubo de alta reflectancia.

Existen sistemas de control en el mercado capaz de crear sistemas híbridos naturales y artificiales, de tal forma que a medida que la luz natural va decreciendo, la luz artificial va creciendo para que el nivel se mantenga en los valores fijados en el proyecto. Una solución híbrida natural-artificial es la solución que maximiza la eficiencia energética de una instalación sin tener en cuenta la eficiencia propia de la tecnología de fuente empleada. En la siguiente figura se puede observar cómo se ha resuelto la iluminación en un museo con esta solución.

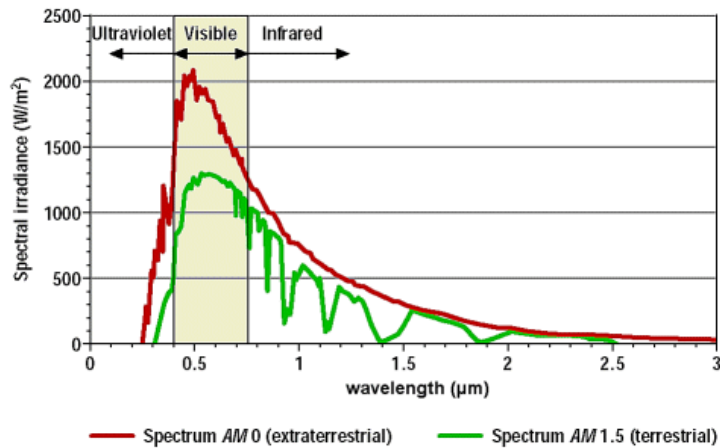


**Ilustración 3** Lucernarios de un museo que incorporan luz artificial LED y sistema de control.

### 5.3.3 La luz natural y modelos.

La luz natural es una fuente ampliamente estudiada y es posible encontrar en la bibliografía numerosas referencias que modelan matemáticamente su distribución espectral en diferentes condiciones climáticas y geográficas.

El espectro solar y la intensidad de la radiación es muy variable y depende de muchos factores, la hora del día, del día del año, clima, etc. por lo que los modelos matemáticos sólo son un indicador que, con frecuencia, no puede ser empleado como una referencia para realizar comparaciones con otras fuentes artificiales.

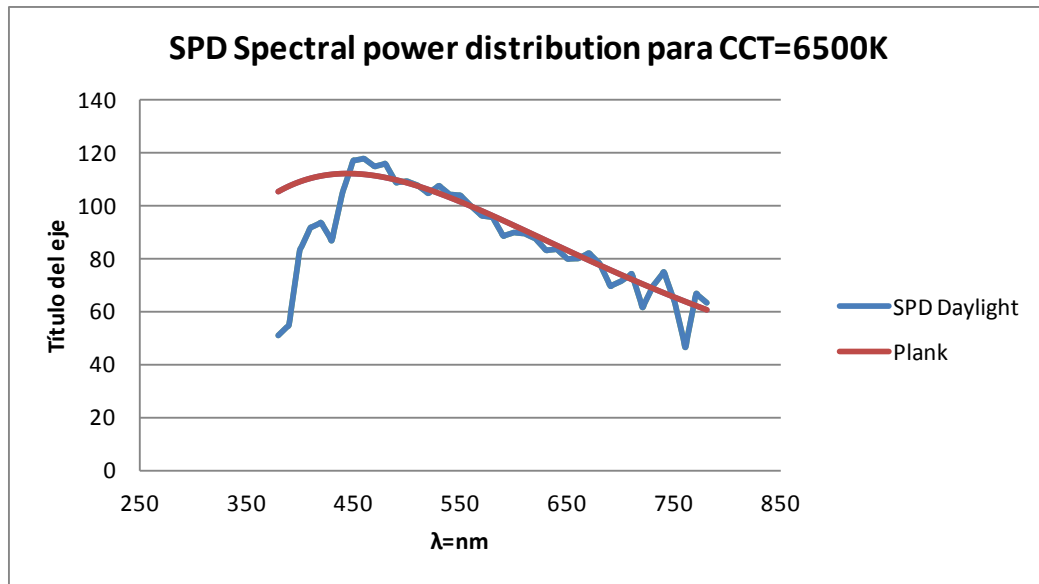


**Ilustración 4** Ejemplo de irradiancia espectral de la luz solar.

Los modelos y distribuciones espectrales de potencia similares a la luz natural se denominan *daylight*. El modelo matemático aceptado por CIE para un iluminante *daylight* está en la publicación CIE 15:2004 [11] aunque su origen se basa en trabajos de Judd, MacAdam y Wyszecki en 1964 [12]. En este método se definen las funciones numéricas  $S_0(\lambda)$ ,  $S_1(\lambda)$  y  $S_2(\lambda)$  y los coeficientes multiplicadores  $M_1$  (CCT) y  $M_2$  (CCT), que son función de la temperatura de color correlacionada CCT.

La expresión final de la distribución espectral de potencia SPD queda:

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda)$$



**Ilustración 5.** SPD según el modelo daylight y según el modelo de Plank para CCT 6500K

### 5.3.4 La luz natural a lo largo del día y el rendimiento intelectual

La radiación solar en la superficie de la tierra es una cantidad variable a lo largo del día y está relacionada con los ciclos de la naturaleza, la biología y los biorritmos.

La luz del amanecer presenta una temperatura de color más fría que la del atardecer. La luz más fría se suele asociar al arranque del día y a mayor actividad, mientras que la luz más cálida se relaciona con el fin de la jornada.

Ya que nuestros biorritmos están acompasados con la variación de la luz solar, la fuente de luz artificial ideal sería una fuente capaz de emular la luz natural a lo largo del día en el interior del edificio. Sería como trabajar al aire libre.

Se ha comprobado que al realizar tareas bajo una fuente de luz con temperatura de color fría aumenta la actividad y la concentración.[13]

OSRAM y Transfer Center for Neuroscience and Learning de Alemania, realizaron en 2011[14], un estudio en un aula secundaria técnica de la localidad alemana de Ulm, bajo la dirección del Dr. Hannah Helbig. Los alumnos realizaron pruebas y tests escritos en una misma aula bajo dos fuentes. Una fuente constante estandar fluorescente de 4000°K y una fuente



variable LED capaz de emular el espectro solar diario, con periodos en los que la iluminación alcanzaba 14000K, conseguidos con la ayuda de LED azules. Los mismos alumnos consiguieron mejores resultados bajo la iluminación LED, ya que conseguía mantener la concentración de los estudiantes por más tiempo.



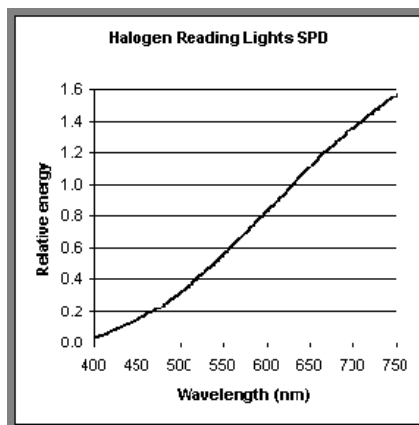
**Ilustración 6** Estudiantes de secundaria técnica. Estudio OSRAM. 2011.

Existen otros estudios del mismo fabricante OSRAM sobre los efectos biológicos de la luz que prueban que la actividad bajo una fuente cronobiológica, es decir, una fuente artificial que emula a la luz natural, consigue un doble efecto positivo [15]. Por un lado estimula la actividad en las fase inicial con luz con temperatura de color más fría, por otro, favorece el descanso en la fase con temperatura de color más cálida y, como consecuencia, los alumnos podían dormir mejor.

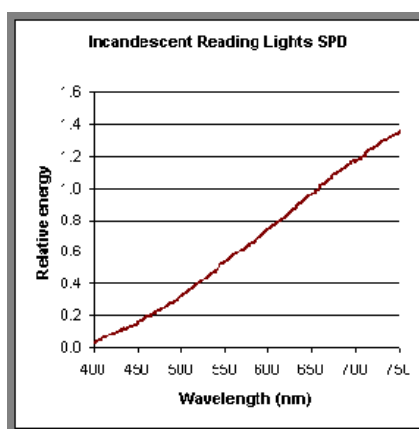
#### **5.4 Fuentes incandescentes y halógenas.**

Las fuentes incandescentes y halógenas son fuentes basadas en el calentamiento de un filamento, que emite radiación por temperatura. Su sencillez y su ingenio ha alumbrado al mundo prácticamente todo el siglo XX. Sin embargo, el desarrollo de otras tecnologías energéticamente más eficientes ha producido una reducción de su fabricación. Actualmente, la tecnología incandescentes está prohibida en la Unión Europea.

Desde el punto de vista espectral, la tecnología incandescente presenta una distribución continua, fielmente modelada por la ecuación de radiación del cuerpo negro de Planck, a una temperatura de color aproximada de 2856K.



**Ilustración 7** Spectral Power Distribution (SPD) de una fuente halógena.



**Ilustración 8** Spectral Power Distribution (SPD) de una fuente incandescente.



**Ilustración 9** Ejemplos de fuentes halógenas de diferentes tipos.

En la siguiente tabla se resumen los valores medios que presentan estas fuentes desde el punto de vista energético y de vida útil.

Fuente	lm/W	Vida útil (h)	CRI
Incandescente	10	1000	100
Halógena	20	2000	100

En el caso de la tecnología halógena, se mejoran los valores de vida útil y eficacia debido al ciclo del halógeno que se produce alrededor del filamento incandescente.

Las fuentes incandescentes se pueden modelar matemáticamente mediante la ecuación de Planck:

$$S(\lambda) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\left(\frac{c_2}{CCT \cdot \lambda}\right)} - 1}$$

$$\text{Donde: } c_1 = 2\pi h c^2 \text{ y } c_2 = \frac{hc}{k}$$

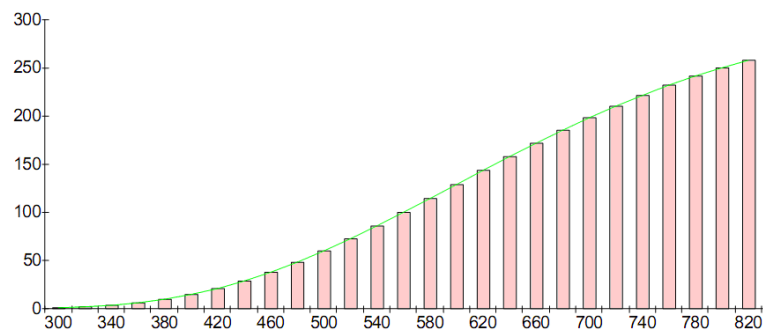
La curva, también denominada distribución espectral SPD (*Spectral Power Distribution*) se normaliza al valor de radiación de 560 nm, obteniéndose la distribución  $S_N(\lambda)$ :

$$S_N(\lambda) = S(\lambda) \frac{100}{S(560)}$$

Para el caso particular de una CCT= 2856 K, la distribución  $S(\lambda)$  viene dada por la siguiente expresión:

$$S(\lambda) = 100 \left(\frac{560}{\lambda}\right)^5 \frac{e^{\frac{1,435 \cdot 10^7}{2848 \times 560}} - 1}{e^{\frac{1,435 \cdot 10^7}{2848 \lambda}} - 1}$$

que corresponde al denominado iluminante CIE A [16].



**Ilustración 10.**  $S(\lambda)$  de iluminante CIE A a CCT=2856K

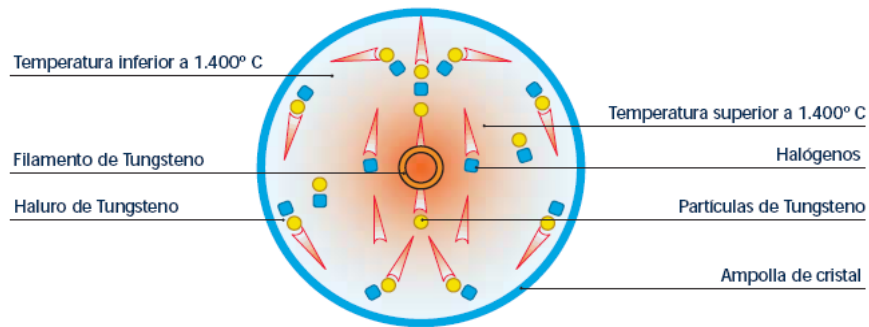


Figura 7. Ciclo del halógeno.

**Ilustración 11** Ciclo del halógeno**5.5 Lámparas de descarga a alta presión.**

Las fuentes de tecnología de descarga se basan en la emisión de un arco eléctrico. Dicho arco se produce en una zona de la lámpara en diferentes condiciones de presión y en presencia de una atmósfera de gas concreta, dependiendo del tipo de lámpara.

Las lámparas de descarga se clasifican en:

1. Halogenuro metálico cerámico
2. Halogenuro metálico de cuarzo
3. Vapor de sodio a alta presión
4. Vapor de sodio a baja presión
5. Vapor de mercurio
6. Mercurio luz mezcla

De los tipos anteriormente mencionados, las fuentes de halogenuro son el tipo de fuente de descarga que está liderando los nuevos proyectos de alumbrado por su conjunto equilibrado de características, mientras que las fuentes de sodio se mantienen en el mercado debido a su eficacia en lm/W. El resto de fuentes está en desuso.

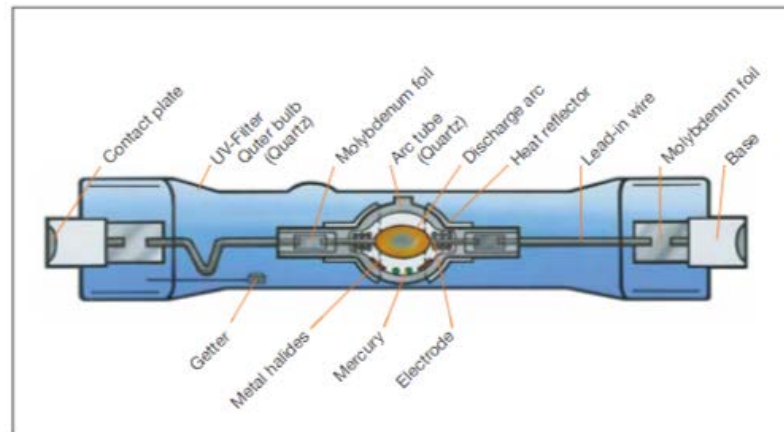


**Ilustración 12** Fuentes de descarga

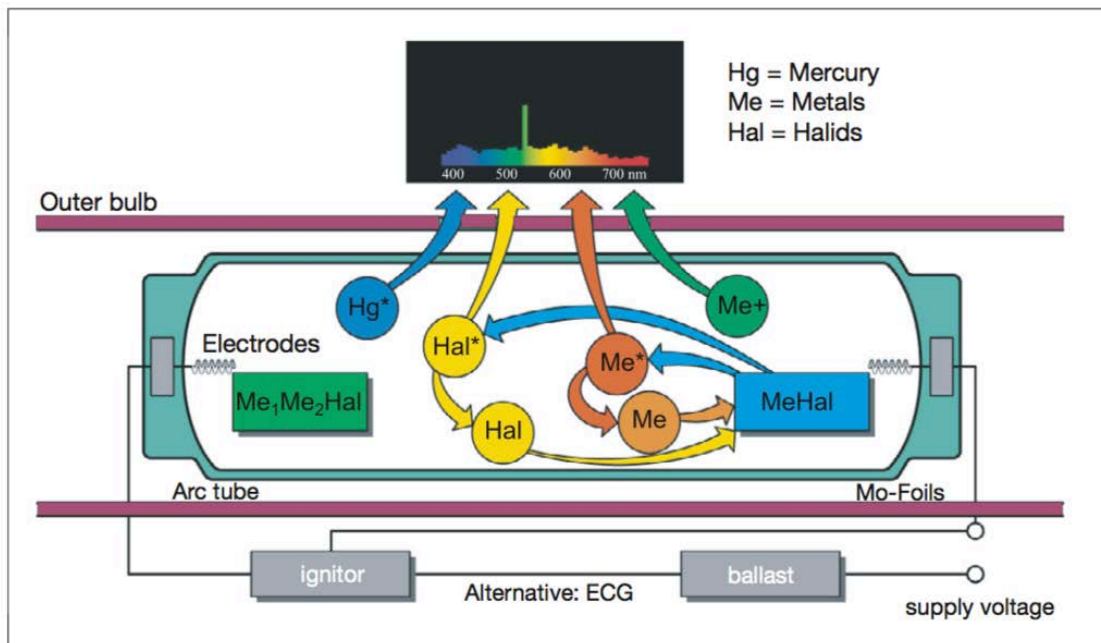
En los últimos años, se ha avanzado en los sistemas de regulación y control de las lámparas de descarga, diseñando fuentes de alimentación capaces de regular el flujo luminoso con el objeto de ahorrar energía en algunos periodos. Debido a la naturaleza de este tipo de fuentes, los equipos de regulación no permiten reducciones de flujo inferiores al 50% del valor nominal de este tipo de fuentes. Si se intenta reducir el flujo, el arco eléctrico se extingue con facilidad. Igualmente, las variaciones en el flujo provocadas por la fuente de alimentación, también ocasionan importantes variaciones en el espectro de emisión de estas fuentes. Si se compara esta situación con la tecnología LED, en este tipo de tecnología la regulación es posible hacerla desde el 1% al 100% con variaciones poco significativas del espectro de emisión, con una respuesta temporal inmediata ante los cambios a la vez que poseen una buena proporcionalidad entre flujo emitido y consumo eléctrico

### 5.5.1 Lámparas de halogenuro metálico

La tecnología de halogenuro metálico presenta el conjunto más equilibrado de propiedades de las fuentes de descarga. Por esta razón, es la lámpara de descarga que ocupa mayor cuota de mercado en nuevos proyectos de alumbrado. También, recibe mayores esfuerzos en I+D por parte de los fabricantes, no sólo desde el punto de vista de innovaciones en la fuente, si no también en los equipos de regulación.



**Ilustración 13** Esquema funcional de una lámpara de halogenuro metálico.



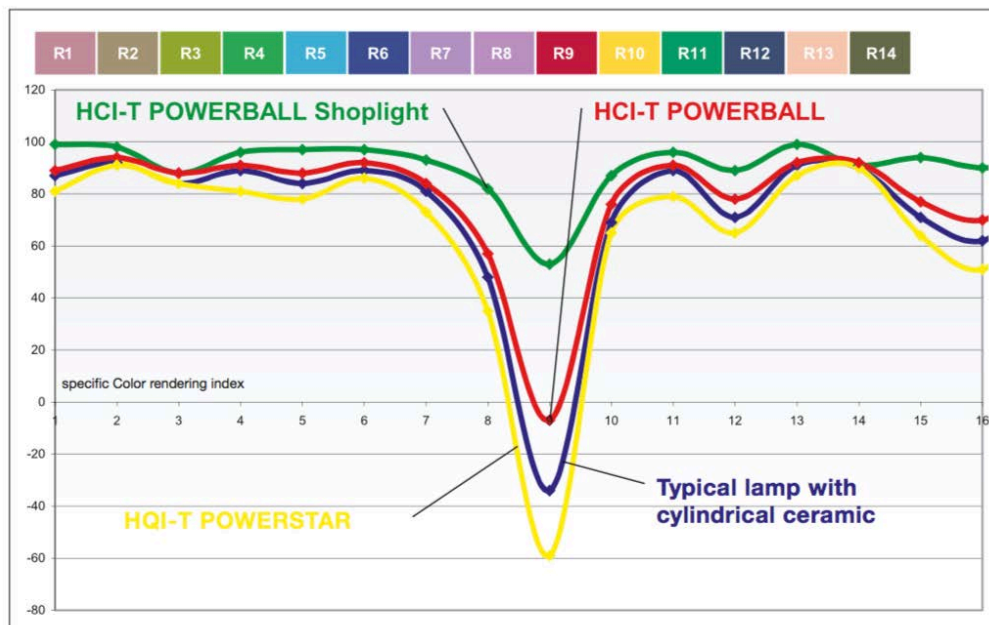
**Ilustración 14** Esquema de reacciones metálicas en el bulbo.

Las fuentes de halogenuro se conocen también por la abreviatura HM (Metal Halide). Es una lámpara de descarga HID (High Intensity Discharge), que presenta un conjunto de atributos equilibrados, destacando sus niveles de lm/W y CRI altos (75-95).



**Ilustración 15:** Ejemplos de fuentes de halogenuro metálico

Desde el punto de vista espectral, las fuentes de halogenuro presentan un perfil típico con picos marcados, que son capaces de desarrollar valores de CRI entre 75 y 95. En la gráfica siguiente se muestra los valores conseguidos por varias fuentes de halogenuro en cada una de las 14 muestras normalizadas del atlas Munsell para el cálculo del CRI según el procedimiento CIE 13.3 1995[9].



**Ilustración 16:** Valores de  $R_i$  para diferentes fuentes de halogenuro metálico del fabricante OSRAM.

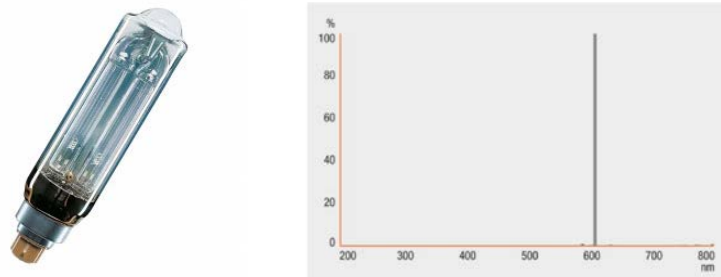
Las lámparas de halogenuro metálico pueden ser de tipo cuarzo o tipo cerámicos, atendiendo al material con el que se construye el tubo donde se genera el arco eléctrico. Los halogenuros metálicos cerámicos pueden alcanzar mayor temperatura, por lo que consiguen las siguientes ventajas:

- Resultan más eficientes.
- Consiguen mejor reproducción cromática.
- Aumentan la vida útil porque las reacciones químicas en los electrodos son menos agresivas.

Por estas razones, las fuentes cerámicas, se consideran de una gama superior a las fuentes de cuarzo, que se mantienen aún en el mercado a un precio y prestaciones inferiores.

### 5.5.1 Lámparas de sodio

La tecnología de sodio está presente en dos tipos, de alta y baja presión. La fuente de baja presión ofrece una distribución espectral prácticamente monocromática, aunque presentan valores de eficacia muy altos que pueden alcanzar los 180 lm/W y una vida útil de 10000h.

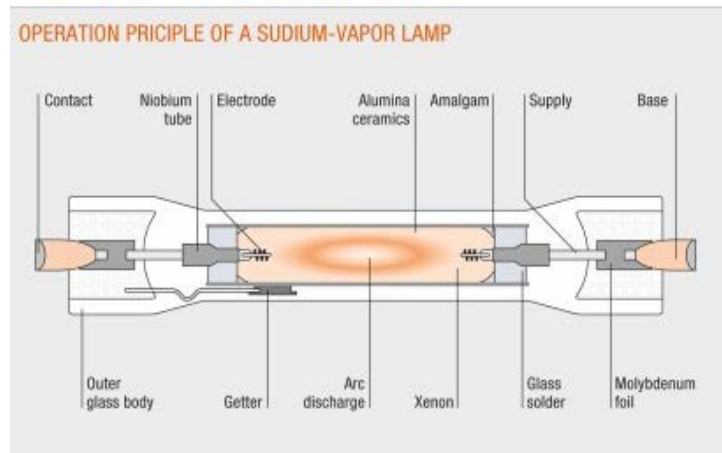


**Ilustración 17:** Lámpara de sodio a baja presión y su distribución espectral

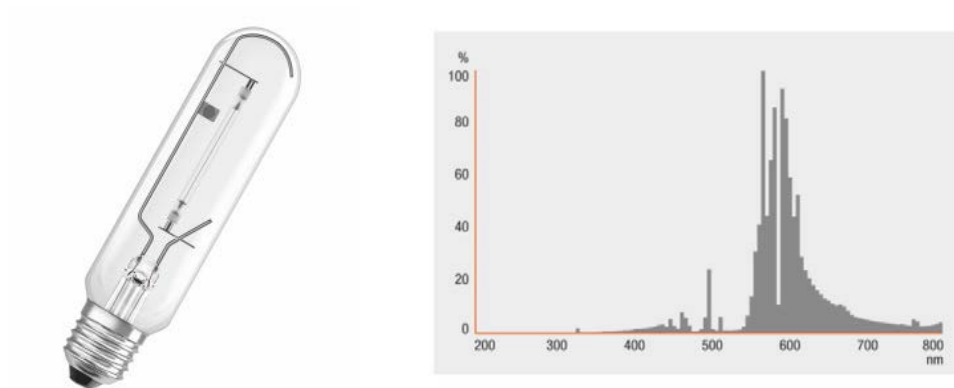
En el caso de las fuentes de alta presión, el arco eléctrico se forma sobre una amalgama de sodio y mercurio a alta presión, capaz de aumentar el espectro de emisión a más longitudes de onda. El resultado es que esta fuente presenta una eficacia sensiblemente menor que la baja presión (150 lm/W) y una vida útil superior (14000h). El aumento del espectro de emisión, consigue



un valor de CRI mayor que el de baja presión y aumenta, por tanto, las posibilidades de aplicación.



**Ilustración 18:** Esquema de una fuente de sodio a alta presión y su distribución espectral

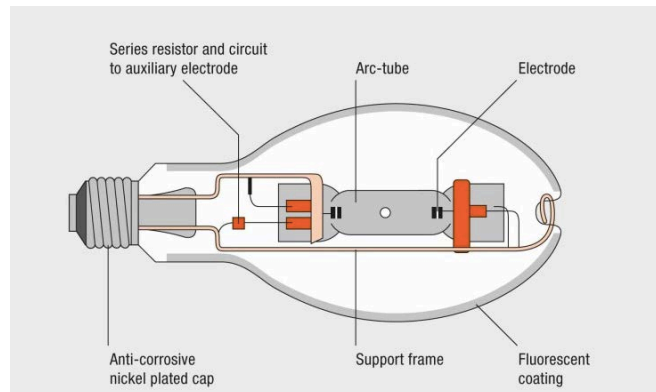


**Ilustración 19:** Lámpara de sodio a alta presión y su distribución espectral

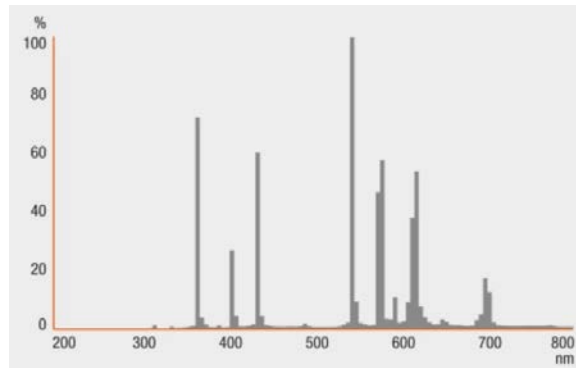
Tanto la tecnología de baja presión como de alta presión, se emplean en aplicaciones donde no es importante la reproducción cromática, como el alumbrado vial o de grandes zonas industriales.

### 5.5.1 Lámparas de vapor de mercurio

La tecnología de mercurio es más básica que las anteriores. Es una fuente que no necesita arrancador y presenta una eficacia de 50-60 lm/W. El actual reglamento de eficiencia en alumbrado exterior (RD. 1890/2008) obliga a instalar fuentes con eficacia superior a 65 lm/W, por lo que esta tecnología ya no es posible instalarla en España. Además, su fabricación a nivel mundial está limitada por el contenido de mercurio.



**Ilustración 20:** Esquema de una lámpara de vapor de mercurio



**Ilustración 21:** Lámpara de vapor de mercurio y su distribución espectral

Esta distribución espectral consigue un valor de CRI de 60.

## 5.6 Tecnología LED

La tecnología LED presenta importantes diferencias con el resto de las tecnologías anteriores. Su conjunto de características han hecho que en 10 años haya pasado de ser una tecnología emergente a una realidad. Esta realidad se traduce en un aumento de cuotas de mercado respecto a las otras tecnologías. En este apartado se tratarán dichas características a modo de resumen, para ser ampliadas en el siguiente punto.

La composición de estado sólido, le confiere propiedades de robustez, ajena a vibraciones. Es posible seleccionar la longitud de onda a emitir modificando la composición de la unión PN del diodo. La vida útil se encuentra entre 20000h y 60000h. Es más sencilla su regulación en intensidad que en la tecnología de descarga. Presenta relaciones lm/W comerciales de 120 lm/W en la actualidad, aunque se han conseguido prototipos de 300 lm/W en 2014.

# 6 TECNOLOGÍA LED.

## 6.1 Introducción

En este apartado se realizará un breve repaso sobre la actualidad de la tecnología. La tecnología LED comenzó a ser una alternativa real al resto de fuentes a partir del año 2006, donde multitud de empresas entendieron que esta forma de radiación, tendría unas ventajas que podían competir y superar a las tecnologías existentes hasta ese momento. El tejido industrial mundial comenzó la fabricación de los primeros chip LED y posteriormente, la creación y el diseño de luminarias.

El camino no ha sido sencillo donde ha habido importantes desarrollos y también errores.

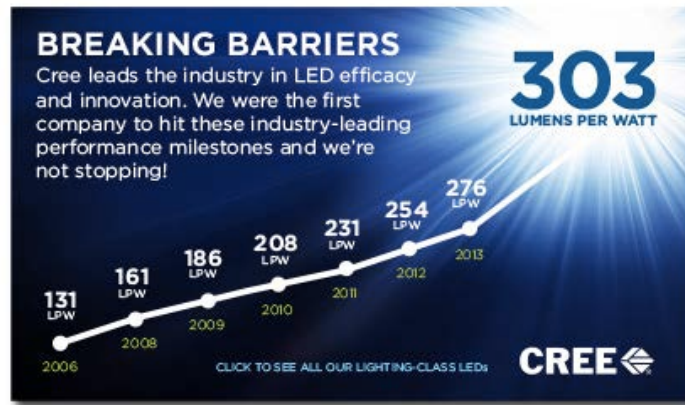
Finalmente, el mercado está formado por un número reducido de fabricantes de unidades LED o chip, con maquinaria de fabricación micro-electrónica capaces de generar placas con LEDs a gran velocidad, precisión y calidad.



**Ilustración 22:** Línea de fabricación de placas LED.

Debido a la elevada inversión necesaria tanto para la adquisición de esta maquinaria específica como también para crear una sala limpia, existen solo un número reducido de compañías a nivel mundial capaces de fabricar unidades o módulos LED. Las siguientes compañías copan más del 80% del mercado: Philips Lumileds, Osram opto, Nichia, Cree y Seoul semiconductor.

La característica más importantes en la que se basa la apuesta por esta tecnología es su origen de estado sólido, que proporciona mayor robustez que el resto de tecnologías y puede alcanzar más de 50000h de vida útil. La eficacia sigue aumentando y se encuentra actualmente entre 100 y 120 lm/W en LEDs comerciales aunque existen prototipos con valores superiores. El fabricante Cree acaba de anunciar que ha conseguido un chip de 303 lm/W. Se estima que, cuando la tecnología LED consiga generar chip comerciales con eficacia en el entorno de 200 lm/W, superarán al resto de tecnologías y prácticamente podrán copar el mercado.



**Ilustración 23:** Logro de la fabricante Cree en 2014.

Sin embargo, fabricantes de luminarias que incorporan LED son numerosos a nivel mundial. El mercado, por tanto, se comporta de forma piramidal desde el punto de vista del número de compañías que operan en el sector de la iluminación. Cuanto mayores son los requisitos tecnológicos y de inversión, menor es el número de empresas en el mercado y viceversa.

Los errores que se pueden destacar en los primeros años de esta tecnología provienen casi totalmente de los fabricantes de luminarias, responsables de su diseño y de ensamblar todos los componentes. Muchos de ellos, tuvieron la tentación de intentar aprovechar luminarias desarrolladas para lámparas de descarga e insertarles una o varias placas de LED. El resultado, como era de esperar, fue un auténtico desastre. El error más importante consistió en la gestión térmica del conjunto. No estaba bien diseñada y el calor generado por la placa de LED no se liberaba o conducía adecuadamente hacia el exterior. La consecuencia fue que la temperatura de la placa LED alcanzaba valores superiores a los recomendados por el fabricante de la placa y la vida útil de dichas luminarias era menor de lo esperado. Esto proporcionó una pérdida de confianza en los consumidores, que veían incumplida la vida útil que se escribía en el catálogo del producto. Más aún, cuando, la vida útil era una de las principales ventajas o características disruptivas que esta tecnología pretendía demostrar respecto a las existentes.

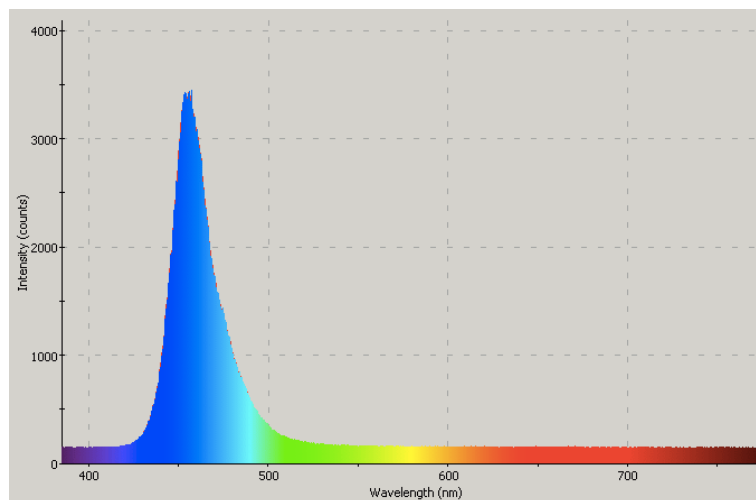
Otra característica que se ha mejorado es en luminarias RGB. Inicialmente muchos fabricantes incluían 3 chips LED, cada uno con una lente concentradora, que conseguían un efecto poco uniforme. Más adelante, los fabricantes consiguieron integrar un solo chip, más reducido,

los 3 colores RGB a los que se acopla una lente concentradora. El efecto es mucho más uniforme en la mezcla de colores.

Actualmente, muchos de los errores comentados se han solucionado. En parte, cuando los fabricantes de luminarias han comenzado a diseñar desde cero las luminarias LED y no como una adaptación de luminarias con lámpara de descarga.

## 6.2 Distribución espectral de potencia

A partir de la composición de la unión PN del diodo, se puede conocer el espectro de emisión. La distribución espectral de una radiación monocromática LED se representa en la siguiente gráfica, como ejemplo.



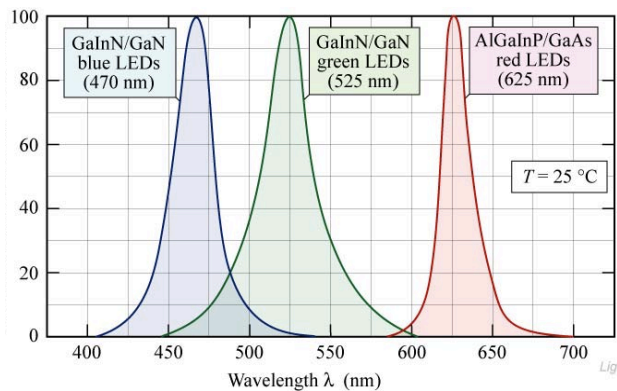
**Ilustración 24:** Distribución espectral de una emisión LED azul

Se puede observar que es una distribución concentrada en el entorno de la longitud de onda principal.

En la tecnología incandescente y de descarga, además de la radiación en la zona del espectro visible, la distribución espectral de potencia se puede extender fuera de dicha zona. Si estamos frente a una aplicación de iluminación interior o exterior, la energía radiada fuera del visible es energía no útil o energía perdida. Además, si se trata de emisión UV, necesitaría la instalación de filtros. En definitiva, con la tecnología LED es posible preveer la energía útil para la aplicación que se necesite, por lo que se considera una tecnología eficiente o más eficiente que otras

tecnologías que no tienen la oportunidad de hacerlo por su propia naturaleza de emisión.

Con esta tecnología, es posible combinar distintas distribuciones espectrales para poder conseguir diferentes efectos, propiedades o características. El más conocido son las luminarias que integran diferentes LED monocromáticos y pueden emitir una combinación por mezcla. Son las llamadas luminarias RGB, que integran los tres colores básicos rojo, verde y azul. Las luminarias RGB se emplean, sobre todo, en alumbrado arquitectónico.



**Ilustración 25:** Distribución espectral de un conjunto RGB.

En el caso monocromático, es posible diseñar, elegir o conocer qué longitud de onda se emitirá, variando la composición de la unión PN del diodo, como se puede ver en la siguiente tabla.

Color	Wavelength [nm]	Voltage drop [ $\Delta V$ ]	Semiconductor material
Infrared	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.63$	Gallium arsenide (GaAs) Aluminium gallium arsenide (AlGaAs)
Red	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	Aluminium gallium arsenide (AlGaAs) Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Orange	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Yellow	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Green	$500 < \lambda < 570$	$1.9^{[68]} < \Delta V < 4.0$	<b>Traditional green:</b> Gallium(III) phosphide (GaP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Aluminium gallium phosphide (AlGaP) <b>Pure green:</b> Indium gallium nitride (InGaN) / Gallium(III) nitride (GaN)
Blue	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Zinc selenide (ZnSe) Indium gallium nitride (InGaN) Silicon carbide (SiC) as substrate Silicon (Si) as substrate—under development
Violet	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN)
Purple	Multiple types	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Dual blue/red LEDs, blue with red phosphor, or white with purple plastic
Ultraviolet	$\lambda < 400$	$3.1 < \Delta V < 4.4$	Diamond (235 nm) <sup>[69]</sup> Boron nitride (215 nm) <sup>[70][71]</sup> Aluminium nitride (AlN) (210 nm) <sup>[72]</sup> Aluminium gallium nitride (AlGaN) Aluminium gallium indium nitride (AlGaInN)—down to 210 nm <sup>[73]</sup>
Pink	Multiple types	$\Delta V \sim 3.3^{[74]}$	Blue with one or two phosphor layers: yellow with red, orange or pink phosphor added afterwards, or white phosphors with pink pigment or dye over top. <sup>[75]</sup>
White	Broad spectrum	$\Delta V = 3.5$	Blue/UV diode with yellow phosphor

**Ilustración 26:** Composición de la unión PN y longitud de onda emitida.

Existen aplicaciones especiales que se tratarán a continuación y que provienen de emisión UV, láser LED o espectros especiales para cultivos.

## 6.3 Aplicaciones

### 6.3.1 Señalización dinámica

Esta ha sido la aplicación donde la tecnología LED ha ocupado el mercado con mayor rapidez debido a la reducción de consumo y aumento de prestaciones que supone frente a la alternativa incandescente y



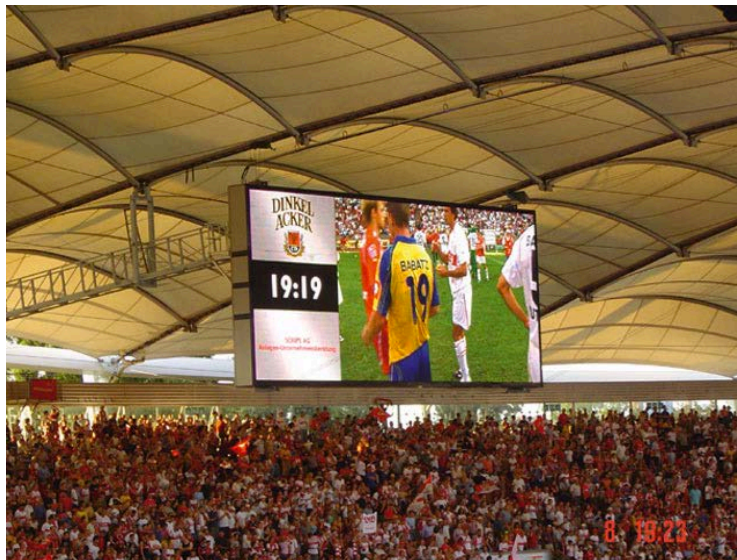
fluorescente. Actualmente, la mayoría de los semáforos se instalan con tecnología LED, por consumo y por vida útil.



**Ilustración 27:** Señalización y rótulos luminosos.

### 6.3.1 Displays y pantallas

En el campo de las grandes pantallas con la tecnología LED, actualmente se fabrican pantallas de gran formato con cada vez mayor luminosidad y resolución. Se diseñan cada vez unidades RGB de menor tamaño, por lo que se mejora el efecto pixel.



**Ilustración 28:** Pantalla LED de gran formato.

### 6.3.1 Alumbrado arquitectónico

En iluminación arquitectónica, las luminarias RGB programables se emplean para cubrir edificios o fachadas completas con imágenes, videos o escenas.



**Ilustración 29:** Alumbrado arquitectónico.

### 6.3.2 Alumbrado vial

En alumbrado vial, la tecnología LED está ocupando cada vez más mercado, ya que presentan una eficacia cada vez mayor ( $>110$  lm/W), mejores posibilidades de regulación y menor consumo de las fuentes de alimentación o equipos. Por ejemplo, existe una sustitución tipo que consiste en reemplazar luminarias de sodio a alta presión con lámpara de 250W y equipo de unos 30W (280W en total), por luminarias LED de 100W equipo incluido. Este tipo de proyectos se está abordando de forma masiva en formato de inversión ESE (empresas de servicios energéticos).

Cronológicamente, las primeras luminarias LED viales que aparecieron fueron luminarias tipo residencial (4-6 m de altura) de baja potencia (40-80W), pero, actualmente, existen productos para alumbrado vial de mayor potencia para proyectos de autopistas y autovías con valores entre 100 y 220W.



**Ilustración 30:** Luminaria modelo New York del fabricante Hess con equipo óptico de OSRAM.

### 6.3.3 Iluminación interior

En el caso de la iluminación interior, la tecnología LED supera actualmente a la fluorescencia en prestaciones, aunque su precio, en algunos casos, sigue siendo superior y es una barrera a su implantación en el mercado. En cualquier caso, el precio de las luminarias LED está en descenso y, actualmente, compiten con las luminarias que montan fluorescencia.



**Ilustración 31:** Productos LED para sustituir por luminarias fluorescentes.

Los sistemas de regulación también están evolucionando, de tal forma que, para proyectos nuevos, resulta más ventajoso diseñar con productos LED con regulación. La regulación en esta tecnología puede modificar el flujo luminoso desde el 1% al 100%. Esto no ocurre con las fuentes de descarga que, como se ha comentado anteriormente, no se pueden bajar del 50%, ya que el arco se extinguiría.

Además de los retos en iluminación interior convencional en aplicaciones de edificios, hospitales, universidades, etc. existen otras

aplicaciones especiales donde la tecnología está siendo empleada, como ejemplo, para iluminar obras de arte en museos, con mejores niveles luminotécnicos y de energía que las tecnologías convencionales.



**Ilustración 32:** Cuadro iluminado con fuentes incandescentes (parte izquierda) y LED (parte derecha) en el Museo del Prado. 2015.

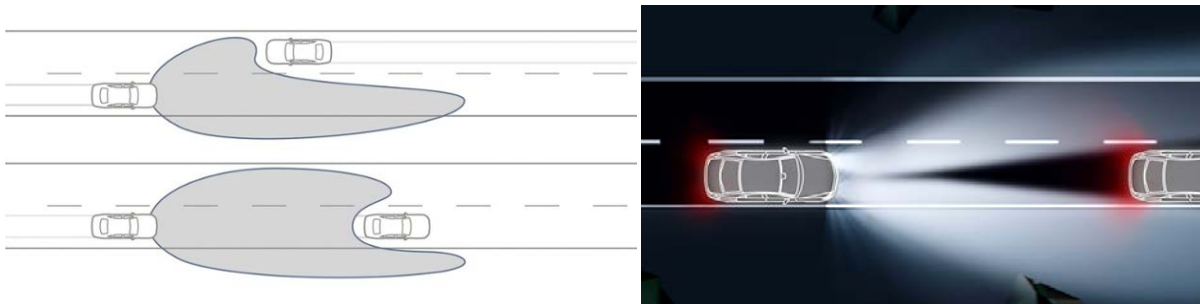
#### **6.3.4 En el automóvil**

En el campo de los faros de los automóviles, también existe una gran inversión por parte de los fabricantes. Inicialmente se empleó para formar parte de la señalización, es decir, luces traseras de posición, freno y tercera luz de freno, intermitencia, etc. En la mayoría de los automóviles actuales, las luces traseras e intermitencia son LED. En los últimos años, también se ha incorporado a la iluminación permanente delantera en casi la totalidad de los modelos nuevos ofreciendo muy buena visibilidad a los vehículos, incluso de día.



**Ilustración 33:** Luces traseras LED.

En algunos modelos, la totalidad de la iluminación del vehículo es LED. Actualmente, el reto es la iluminación delantera. Existen marcas como Mercedes Benz que han creado un sistema de iluminación dinámico e inteligente capaz de modificar la zona iluminada a través de la información que proporciona una cámara en el frontal que recoge la información de la conducción, posición de vehículos, curvas, etc. El sistema actúa de forma inteligente tanto con los vehículos que vienen de frente (figura de la izquierda) como hacia los vehículos que que ilumina desde atrás.



**Ilustración 34:** Sistema de iluminación inteligente LED de Mercedes Benz.

## 6.4 Radiación UV LED

### 6.4.1 Tratamiento de aguas

La radiación UV es útil para procesos de tratamientos de agua como los procesos de fotocatalisis (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, FotoFenton y UV/TiO<sub>2</sub>). Para estos procesos, la tecnología LED es útil porque se puede elegir la longitud de onda principal que haga más efectiva la fotocatalisis. Además, es posible diseñar luminarias que alimentación a bajo voltaje, lo que favorece su instalación en ambientes húmedos o sumergidos.

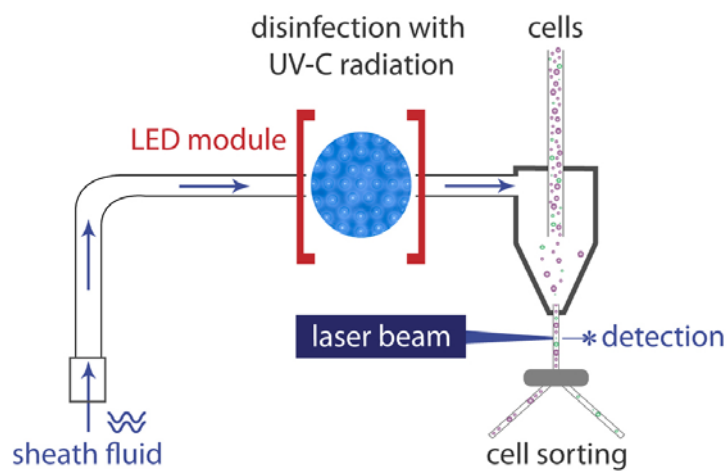
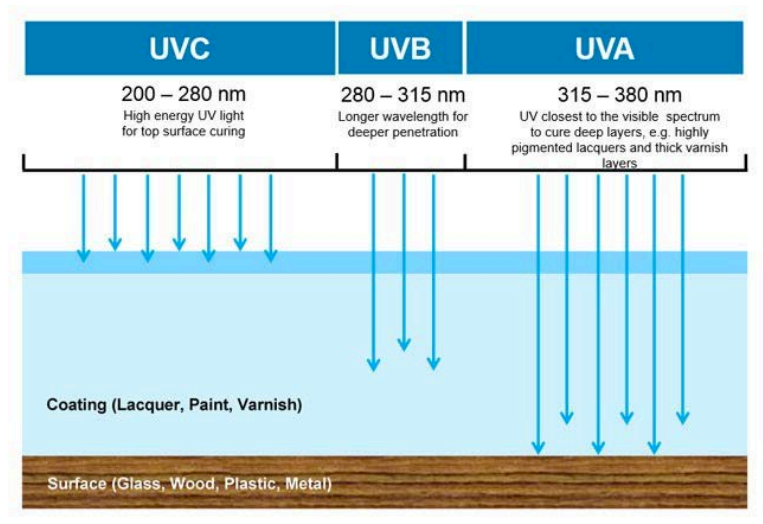


Ilustración 35: Sistema de desinfección UV.

## 6.4.2 Procesos de endurecimiento

Esta tecnología se utiliza para endurecer tintas, pinturas y adhesivos sobre sustratos como vidrio, plástico, metal y madera. Con ayuda de la radiación UV, el polímero cura con rapidez.



**Ilustración 36:** Capacidades de endurecimiento de las radiaciones UVA, UVB y UVC.



Iris Series	
Irradiance	365 nm: 7 W/cm <sup>2</sup>
	385 nm: 14 W/cm <sup>2</sup>
	395 nm: 16 W/cm <sup>2</sup>
	405 nm: 16 W/cm <sup>2</sup>
Emission window size	45 x 254 / ... mm
	66 x 142 / ... mm
Cooling	Water cooling
Wavelengths	

**Ilustración 37:** Modelo de reactor LED del fabricante Heraeus.

## 6.5 LED para agricultura

Existen numerosas investigaciones que han estudiado cómo influye la radiación en el desarrollo de las plantas. Ciertos mecanismos relacionados con el desarrollo que se produce en las plantas, son función de la radiación que reciben.

En explotaciones de invernaderos es posible añadir luz artificial para estimular las fases de germinación, crecimiento o maduración. Esta técnica se emplea más en latitudes donde la radiación solar anual es reducida.

Los fabricantes Philips y Osram tienen productos LED para estas aplicaciones. En la siguiente gráfica se puede observar la estrategia que ha seguido el fabricante Osram para diseñar una luminaria dedicada a estas aplicaciones. En discontinuo aparecen las curvas de absorción de los procesos bioquímicos de las plantas.

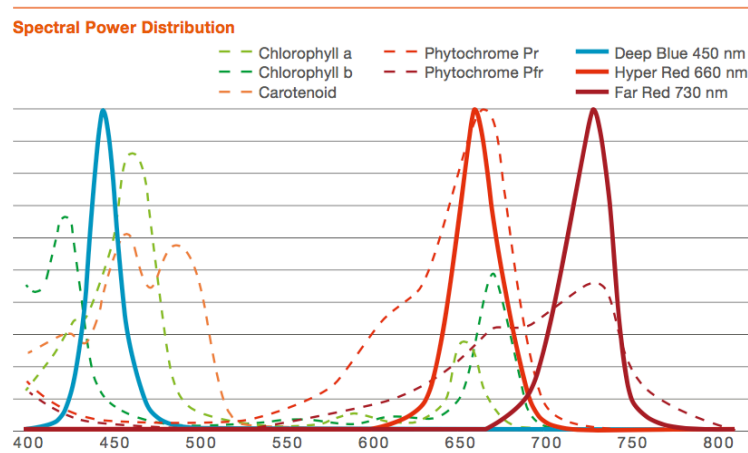


**Ilustración 38:** Imagen de invernadero con tecnología LED.

Como se aprecia en la siguiente figura, las plantas presentan curvas de absorción con una clara meseta donde tomas valores reducidos que coincide con los verdes. Así, es posible diseñar una fuente luminosa con



una distribución espectral de potencia en concordancia con la curva de absorción de la planta.



**Ilustración 39:** Estrategia de curvas espectrales de potencia del fabricante Osram.

## 6.6 Conclusiones

La tecnología LED es la mejor opción que va a existir en el mercado en los próximos años. Sus características hacen que su cuota de mercado no pare de crecer. Al ser la tecnología más novedosa, aún el precio es una de las barreras más importantes a su instalación, pero la economía de escala está favoreciendo que los precios se vayan reduciendo.

Existen multitud de aplicaciones donde esta tecnología se está aplicando debido a sus características.

Desde el punto de vista que persigue este trabajo, la iluminación con LED blancos necesita ser analizada en cuanto a la reproducción cromática y la visión del color. Estos conceptos han funcionado razonablemente bien con el resto de tecnologías, pero necesitan ser revisados y analizados con profundidad ya que se han encontrado diferencias entre la teoría y la experimentación.

## 7 PROCESO DE CÁLCULO DEL CRI 13.3 1995.

### 7.1 Antecedentes

Según CIE, el rendimiento del color CR (*Color Rendering*) se define como el efecto de una fuente de luz en la apariencia de los objetos, de forma consciente o subconsciente, en comparación con su apariencia bajo una fuente de luz de referencia[15] (CIE, 1987).

CIE recomendó en 1965 el procedimiento de medida y definición de propiedades de rendimiento de color de las fuentes de luz, basado en el test de muestras de color (*Test Colour Method*). Dicho procedimiento fue actualizado en 1974 teniendo en cuenta el efecto de adaptación del color.

CIE 13.3-1995 [9] establece el procedimiento para calcular el índice CRI (*Color Rendering Index*) siendo dicho informe una versión corregida de CIE 13.2-1974.

El procedimiento CIE 13.3-1995 está vigente para la industria desde su definición. Es un procedimiento que presenta importantes limitaciones pero sigue siendo válido como estándar para el cálculo del CRI.

En los últimos años, coincidiendo con el auge de la tecnología LED, se está promoviendo desde diferentes entidades internacionales, alternativas a este proceso de determinación de dicho indicador, ya que dicho procedimiento penaliza a dicha tecnología, además de presentar importantes limitaciones.

Como respuesta a dicha demanda después de analizar resultados de diferentes experiencias en distintos laboratorios del mundo, ha concluido que el procedimiento CIE 13.3-1995 no proporciona valores aceptables para fuentes blancas LED[1]. Propone, por tanto, definir un nuevo índice o añadir otros índices capaces de medir la capacidad de reproducción cromática de fuentes blancas, para que dicho valor, se ajuste a la percepción de los observadores. Dicho nuevo índice o grupo de índices deberían ser válidos para todas las fuentes, incluidas las fuentes LEDs.

## 7.2 Procedimiento CIE 13.3-1995 para el cálculo del CRI

### 7.2.1 Introducción

En CIE 13.3-1995 se explica el procedimiento de cálculo de CRI, el cual se expone en el siguiente apartado. Dicho procedimiento de cálculo compara el efecto de una fuente test o fuente objetivo con otra fuente de referencia sobre un mismo grupo conocido de muestras. Dichas muestras son conocidas y pertenecen al atlas Munsell .

La fuente test, de la que se desea conocer el valor de CRI, ha de tener la misma temperatura de color CCT que la fuente de referencia.

El valor de CRI se obtiene por comparación de dos iluminaciones sobre un grupo determinado de muestras. Una es la fuente test y otra una fuente de referencia.

### 7.2.2 Pasos a seguir

Los pasos que se siguen para determinar el CRI de la fuente test se enumeran a continuación.

Paso 1: Disponer de las muestras y un blanco de referencia.

Paso 2: Disponer de la curva espectral de la fuente test.

Paso 3: Generar la fuente de referencia con una CCT igual que la fuente de referencia. Este paso es necesario realizarlo mediante un proceso de ajuste.

Paso 4: Generar los valores triestímulo  $X_i, Y_i, Z_i$ .

Paso 5: Calcular las coordenadas  $(x_i, y_i)$ .

Paso 6: Calcular las coordenadas  $(u_i, v_i)$ .

Paso 7: Calcular las coordenadas  $(U_i, V_i, W_i)$ .

Paso 8: Calcular las diferencias de color  $(\Delta U_i, \Delta V_i, \Delta W_i)$ .

Paso 9: Calcular las diferencias de color  $\Delta E_i$

Paso 10: Calcular  $R_i = 100 - 4,6\Delta E_i$

Paso 11: Calcular  $CRI = R_a = \frac{1}{n} \sum_1^n R_i$

### **7.2.3 Generación de la fuente de referencia**















Según CIE existen 2 modelos de fuente de referencia según la CCT de la fuente test.

- Modelo de radiador de Planck para  $CCT < 5000K$ .
- Modelo daylight para  $CCT \geq 5000K$ .

Como la fuente de referencia ha de tener la misma CCT que la fuente test, es necesario recurrir a un proceso de ajuste. Para ello, es necesario no solo elegir el tipo de modelo, si no también, ajustar dicha temperatura de color mediante un proceso iterativo en algunos casos.

### **7.2.1 Muestras del procedimiento CIE 13.3-1995**

En el procedimiento CIE 13.3-1995 se emplean las muestras del atlas Munsell que aparecen en la siguiente tabla. El procedimiento está definido para las 8 primeras, pero también es posible evaluarlo en las 6 siguientes.

No.	Approximate Munsell notation	Colour appearance under daylight	
1	7.5 R 6/4	Light greyish red	
2	5 Y 6/4	Dark greyish yellow	
3	5 GY 6/8	Strong yellow green	
4	2.5 G 6/6	Moderate yellowish green	
5	10 BG 6/4	Light bluish green	
6	5 PB 6/8	Light blue	
7	2.5 P 6/8	Light violet	
8	10 P 6/8	Light reddish purple	
9	4.5 R 4/13	Strong red	
10	5 Y 8/10	Strong Yellow	
11	4.5 G 5/8	Strong green	
12	3 PB 3/11	Strong blue	
13	5 YR 8/4	Light yellowish pink (human complexion)	
14	5 GY 4/4	Moderate olive green (leaf green)	

**Ilustración 40.** Muestras para el cálculo del CRI.

El resultado varía hasta un 10%, dependiendo de la fuente, si el lugar de emplear 8 muestras se emplean las 14.



**Ilustración 41.** Muestras para el cálculo del CRI.

El número de muestras empleadas influye en el valor de CRI, lo que resulta una importante limitación. El procedimiento data de 1974, cuando las capacidades de computación eran muy inferiores a las de hoy. Por tanto, no se justifica que el número de muestras se mantenga reducido, ya que es posible ampliarlo a la totalidad del atlas Munsell o cualquier otro atlas de color.

### 7.2.1 Cálculo del CRI según CIE 13.3-1995

El cálculo final del CRI se basa en las diferencias de color  $\Delta E_i$  según la fórmula CIE 1964. A continuación se explica el procedimiento seguido para alcanzar dicho valor y el valor final del CRI.

Los valores de partida del procedimiento son los valores triestímulo  $X_i, Y_i, Z_i$  correspondientes a cada muestra y al blanco de referencia. Tanto las muestras como el blanco de referencia son iluminados con la fuente test y con la fuente de referencia. Por tanto, se dispone de dos grupos de valores triestímulo, los obtenidos con la fuente test y los obtenidos con la fuente de referencia.

$$X_{i\ TEST}, Y_{i\ TEST}, Z_{i\ TEST}, X_{i\ REF}, Y_{i\ REF}, Z_{i\ REF}$$

A partir de dichos valores, y según las expresiones de la siguiente tabla resumen, se determinan las coordenadas  $(x_i, y_i)$ ,  $(u_i, v_i)$ ,  $(U_i, V_i, W_i)$ , las diferencias de color  $(\Delta U_i, \Delta V_i, \Delta W_i)$ ,  $\Delta E_i$ ,  $R_i$  y finalmente el valor de  $CRI = R_n = \left(\frac{1}{8}\right) \sum_1^8 R_i$ .

VALORES REFERENCIA	VALORES TEST
$x_{i REF} = \frac{X_{i REF}}{X_{i REF} + Y_{i REF} + Z_{i REF}}$	$x_{i TEST} = \frac{X_{i TEST}}{X_{i TEST} + Y_{i TEST} + Z_{i TEST}}$
$y_{i REF} = \frac{Y_{i REF}}{X_{i REF} + Y_{i REF} + Z_{i REF}}$	$y_{i TEST} = \frac{Y_{i TEST}}{X_{i TEST} + Y_{i TEST} + Z_{i TEST}}$
$x_{WHITE REF} = \frac{X_{WHITE REF}}{X_{WHITE REF} + Y_{WHITE REF} + Z_{WHITE REF}}$	$x_{WHITE TEST} = \frac{X_{WHITE TEST}}{X_{WHITE TEST} + Y_{WHITE TEST} + Z_{WHITE TEST}}$
$y_{WHITE REF} = \frac{Y_{WHITE REF}}{X_{WHITE REF} + Y_{WHITE REF} + Z_{WHITE REF}}$	$y_{WHITE TEST} = \frac{Y_{WHITE TEST}}{X_{WHITE TEST} + Y_{WHITE TEST} + Z_{WHITE TEST}}$
$u_{i REF} = \frac{4x_{i REF}}{-2x_{i REF} + 12y_{i REF} + 3}$	$u_{i TEST} = \frac{4x_{i TEST}}{-2x_{i TEST} + 12y_{i TEST} + 3}$
$v_{i REF} = \frac{6y_{i REF}}{-2x_{i REF} + 12y_{i REF} + 3}$	$v_{i TEST} = \frac{6y_{i TEST}}{-2x_{i TEST} + 12y_{i TEST} + 3}$
$u_{WHITE REF} = \frac{4x_{WHITE REF}}{-2x_{WHITE REF} + 12y_{WHITE REF} + 3}$	$u_{WHITE TEST} = \frac{4x_{WHITE TEST}}{-2x_{WHITE TEST} + 12y_{WHITE TEST} + 3}$
$v_{WHITE REF} = \frac{6y_{WHITE REF}}{-2x_{WHITE REF} + 12y_{WHITE REF} + 3}$	$v_{WHITE TEST} = \frac{6y_{WHITE TEST}}{-2x_{WHITE TEST} + 12y_{WHITE TEST} + 3}$
$U_{i REF} = 13 W_{i REF} (u_{i REF} - u_{WHITE REF})$	$U_{i TEST} = 13 W_{i TEST} (u_{i TEST} - u_{WHITE TEST})$
$V_{i REF} = 13 W_{i REF} (v_{i REF} - v_{WHITE REF})$	$V_{i TEST} = 13 W_{i TEST} (v_{i TEST} - v_{WHITE TEST})$
$W_{i REF} = 25 Y_{i REF}^{1/3} - 17$	$W_{i TEST} = 25 Y_{i TEST}^{1/3} - 17$
CÁLCULO DE DIFERENCIAS DE COLOR	
$\Delta U_i = [U_{i TEST} - U_{i REF}]^2$ $\Delta V_i = [V_{i TEST} - V_{i REF}]^2$ $\Delta W_i = [W_{i TEST} - W_{i REF}]^2$ $\Delta E_i = (\Delta U_i + \Delta V_i + \Delta W_i)^{1/2}$	
CÁLCULO DEL CRI	
$R_i = 100 - 4,6 (\Delta E)_i$ $CRI = R_8 = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i$	

**Ilustración 42.** Operaciones para el cálculo del CRI.

En la siguiente figura representa de forma esquemática los valores que se obtienen para el caso de 8 muestras y cómo se obtiene el resultado final.

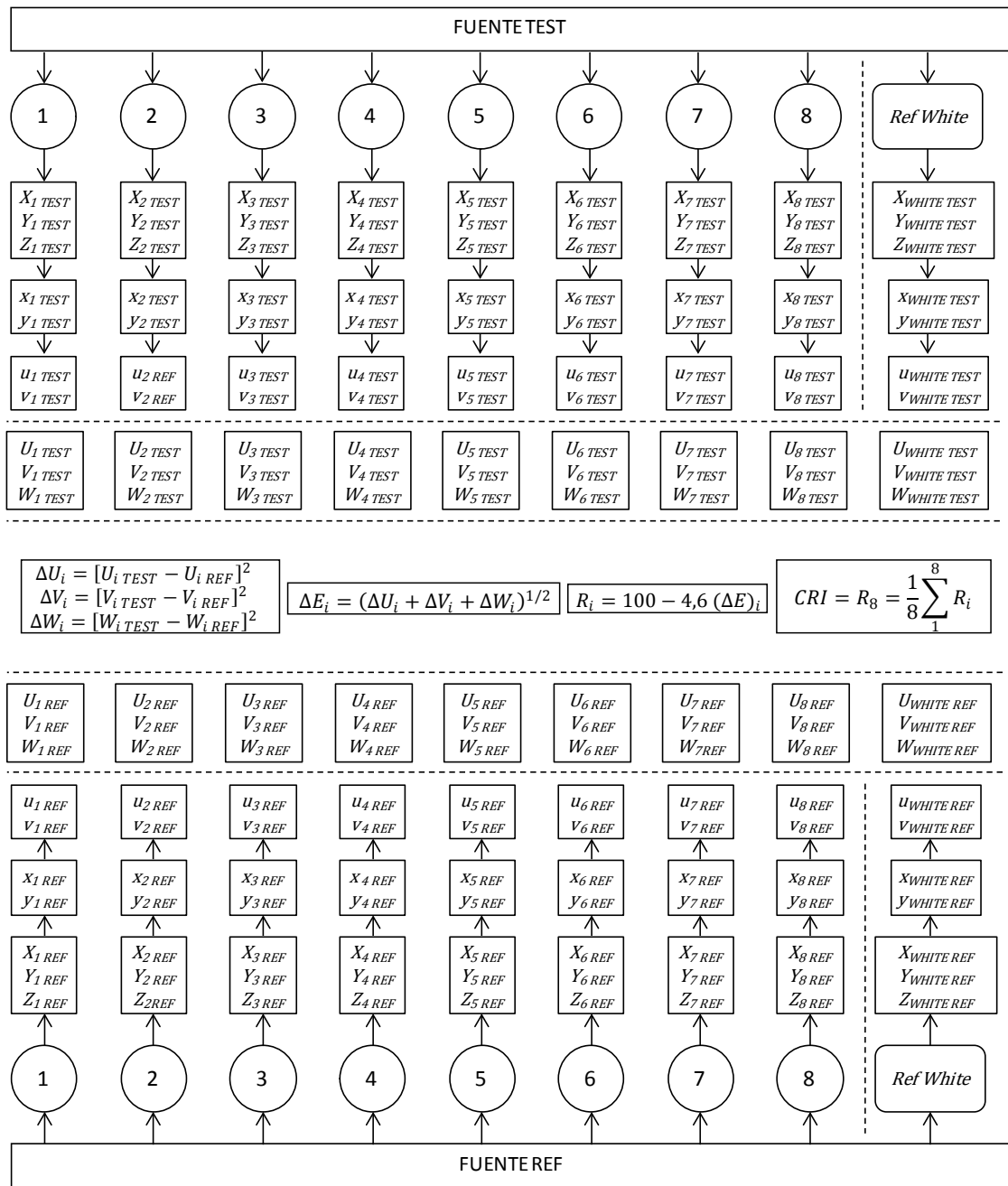


Ilustración 43. Esquema de operaciones para el cálculo del CRI.



## **8 LIMITACIONES DEL PROCEDIMIENTO CIE 13.3 1995 EN LEDS BLANCOS.**

### **8.1 Introducción**

La estrategia del cálculo del CRI se considera correcta y es actualmente un estándar internacional, aunque presenta limitaciones. El procedimiento, con origen en los años 60, se diseñó para que su cálculo fuese lo más sencillo posible dadas las capacidades de computación del momento. El procedimiento se realiza con sólo 8 muestras del atlas Munsell. Actualmente, no tiene sentido emplear un número tan reducido de muestras debido a la potencia de cálculo computacional cuando, precisamente, el empleo de un número reducido de muestras resulta una fuente de errores en el cálculo.

Como el procedimiento del cálculo de CRI se basa en el cálculo de  $R_i$  en cada muestra, se evalúa la fuente test sólo en dichas muestras. La consecuencia inmediata es que la fuente queda sin ser evaluada en otras zonas del plano de color. Si la mayoría de atlas de color tiene más de 1000 muestras diferentes, el número de muestras del procedimiento es, definitivamente, reducido.

### **8.1 La relación entre las muestras y la curva espectral de la fuente test**

Resulta evidente, que el cálculo de CRI es una interacción entre el espectro de la fuente test y las muestras empleadas en el procedimiento.

En esta situación, puede ocurrir que el espectro de la fuente test sea de tal forma que al ser evaluado en un mayor número de muestras dé un resultado similar al procedimiento CIE o no.

La curva espectral de la fuente test tiene, por tanto, una importancia fundamental en la interacción con las muestras. Si se analizan las curvas espectrales de las fuentes blancas se pueden hacer tres grupos, las incandescentes con espectro tipo planckiano, las lámparas de descarga con picos acusados y las tipo LED. En esta últimas, las curvas presentan igualmente picos pero mucho más suaves.

Cuando la curva es de tipo incandescente o planckiano, el resultado del procedimiento obtiene una puntuación equilibrada en todas las muestras, con

valores medios - altos de  $R_i$ . Por esta razón el valor del CRI es 100 o próximo a 100.

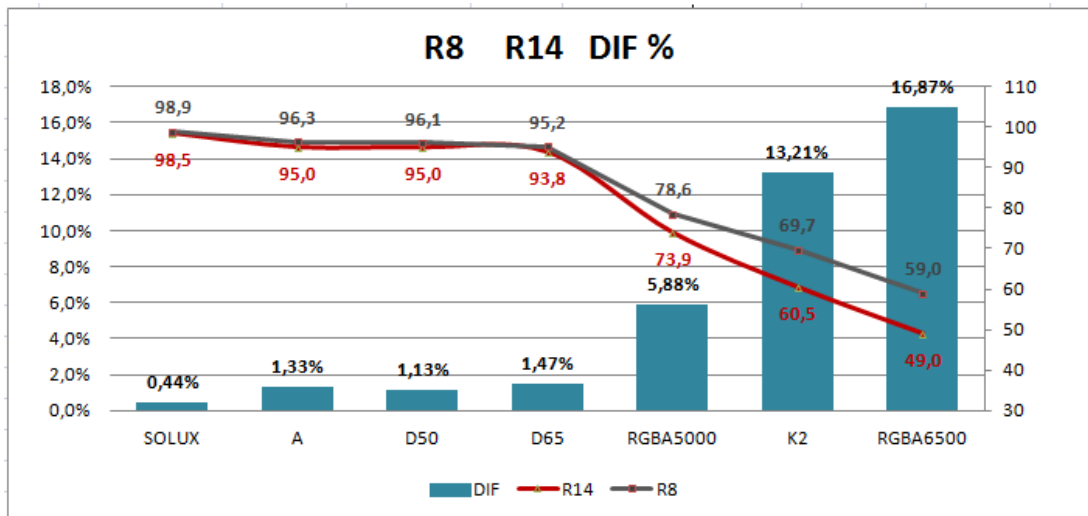
Si la curva presenta picos, en general, pueden ocurrir dos casos. En primer lugar puede ocurrir que la curva consiga reproducir bien la mayoría de las muestras del test y, en consecuencia, la fuente tendrá un buen resultado de CRI. En este caso, la fuente luminosa debería considerarse como una fuente de CRI alto. Esta situación puede ser casual o puede que sea el propio fabricante el que intente conseguir este espectro de emisión de forma intencionada [16]. Hay que tener en cuenta que las 14 muestras del procedimiento se conocen desde los años 60.

El segundo caso, es que la curva espectral con picos no consiga buen resultado en el procedimiento CIE. Esta situación es la que, por ejemplo, ocurre en el caso de la tecnología LED. En este caso, el procedimiento penaliza excesivamente este tipo de fuentes.

Para poder decir que la penalización es excesiva, se han realizado experiencias de discriminación de color y se ha concluido que fuentes LED con un valor de CRI de 70 obtienen una capacidad de discriminación por los observadores similar a otras fuentes, como las de tipo incandescente, con valor de CRI próximo a 100. Es decir, desde el punto de vista de los observadores los valores de CRI de ambas fuentes debería ser similar, aunque difieren un 30%. [7]

Si se atiende sólo al número de muestras empleadas en el procedimiento y calculando el valor de CRI con 8 o con 14 muestras se encuentran las primeras diferencias. La siguiente gráfica muestra los valores obtenidos de CRI para diferentes iluminantes cambiando solamente el número de muestras del procedimiento CIE. Se observa que, en las fuentes LED, con menor CRI que el resto, la diferencia entre  $R_8$  y  $R_{14}$  es superior que en las demás fuentes. Además el resultado  $R_{14}$  siempre es menor.

El efecto es doble, por un lado está el factor número de muestras empleadas que, por sí sólo, introduce una diferencia especialmente significativa en la tecnología LED. Por otro lado y de forma añadida, para los observadores, la capacidad de discriminación obtenida experimentalmente es similar entre fuentes incandescentes con CRI de 100 y de fuentes LED con CRI de 70.



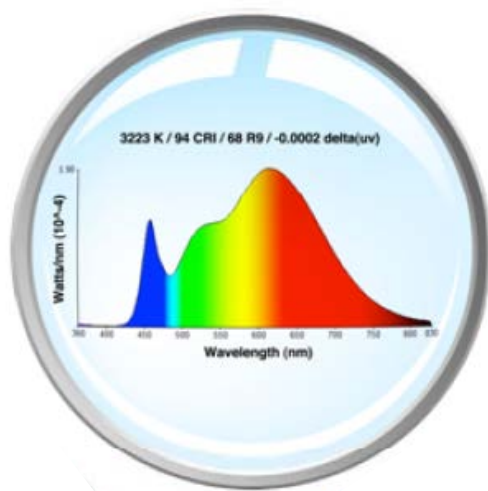
**Ilustración 44.** Valores de CRI para varios iluminantes empleando 8 ó 14 muestras.

Se puede concluir, a la vista de estos resultados, que el cálculo de CRI con 14 muestras es más bajo que con 8. Este resultado parece indicar que si el número de muestras fuese mayor, el valor de CRI sería probablemente aún más bajo.

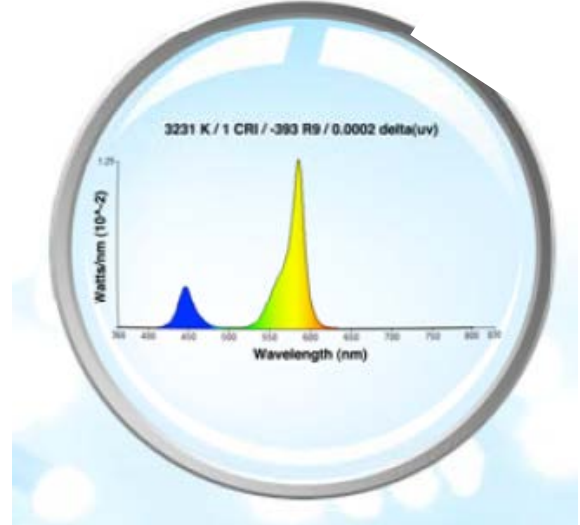
Para completar el análisis es necesario tener en cuenta la curva espectral de la fuente test. Según el método CIE, una curva espectral que tenga muchos picos (valores altos de energía concentrada en ciertas longitudes de onda y bajos valores de energía en el resto), obtiene un CRI más bajo que otras fuentes de similar CCT y espectro más continuo, como las incandescentes. Las experiencias con observadores no justifican dicha diferencia de CRI, por lo que el procedimiento penaliza excesivamente las cruvas espectrales de forma diferente a las incandescentes.

Por otro lado y según se indicó anteriormente, si una fuente presenta picos, pero éstos son capaces de reproducir los colores de las muestras del test, el procedimiento calcularía altos valores de  $R_i$  y por consiguiente de CRI. Este alto valor obtenido no tiene en cuenta el resultado que la fuente test obtenga en otras muestras.

En el siguiente ejemplo, se comparan 2 fuentes con el mismo valor de CCT, que dan valores muy diferentes de CRI. No se puede concluir que el iluminante de la izquierda reproduzca los colores 94 veces mejor que el de la derecha.



- lumens = 31.2
- CCT = 3223
- $x = 0.4217$   $y = 0.3978$
- $D(uv) = -0.0002$
- CRI=94



- lumens = 217
- CCT = 3231
- $x = 0.4217$   $y = 0.3987$
- $D(uv) = 0.0002$
- CRI=1

Otro ejemplo debido a (Nadarajah Narendran [cita] calculó que una fuente LED RGB 2800K con picos en 465, 525 y 640 nm obtuvo un valor de CRI=18. Si en el mismo caso, la longitud de onda del rojo pasa a ser 615 nm, el valor de CRI cambia a CRI=71. Este resultado simple comprueba la debilidad del proceso de cálculo, en el que una ligera variación de la curva espectral puede provocar importantes cambios en el valor de CRI que no se pueden justificar ni de forma analítica ni, como se ha comprobado, de forma experimental.

Como resumen, se puede decir que el procedimiento CIE está basado en un número excesivamente pequeño de muestras. Dicha limitación, influye notablemente en su interacción con la curva espectral de la fuente test. Pueden darse dos casos con alta probabilidad de error:

1. Una pequeña variación en la curva espectral puede ocasionar una variación desproporcionada en el CRI.
2. Una curva espectral puede obtener un buen resultado de CRI sólo porque se comporte bien en la muestras del procedimiento.

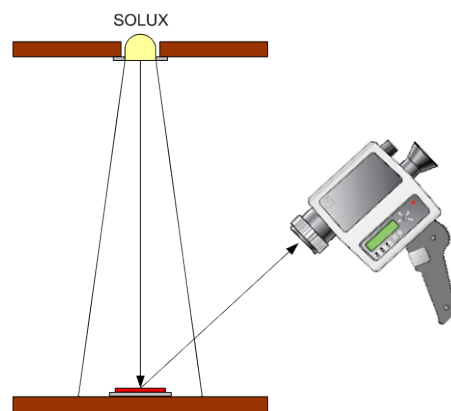
Estas limitaciones son más visibles y pronunciadas con las fuentes LED, que además, no están tan trabajadas con observadores hasta el momento. Más al

contrario, según nuestras experiencias, los resultados de las observaciones no se corresponden con los valores calculados con el procedimiento CIE, especialmente con las fuentes LED. Por todo ello, CIE 2007 expuso correctamente que el procedimiento requiere una revisión.

## 9 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.

### 9.1 Instrumentos de medida

Para realizar todas las medidas de reflectancias se empleó el radiómetro Photo Research 701 en un montaje a 45°.



**Ilustración 45:** Radiómetro PHOTO RESERACH 701

Para la realización de las medidas se empleó el iluminante SOLUX, un blanco de referencia marca LABSPHERE y las muestras del álbum NCS.



**Ilustración 46:** Blanco de referencia marca LABSPHERE

Las características más importantes del fotómetro Photo Research 701 se detallan a continuación.

**Tipos de medidas:**

1. Luminancia ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ).
2. Radiancia. ( $\text{W}/\text{sr}\cdot\text{m}^2$ ).
3. Coordenadas de color x, y según CIE 1931.
4. Coordenadas de color u, v según CIE 1976.
5. Valores triestímulos X, Y, Z según CIE 1931.
6. Temperatura de color correlacionada CCT (K).

**Especificaciones:**

1. Rango de longitud de onda: 380-780 nm.
2. Exactitud espectral:  $\pm 2$  nm.
3. Ancho de banda espectral  $\geq 2.5$  (depende de la altura de la apertura y la dispersión de longitud de onda).
4. Apertura:  $1/2^\circ$ .
5. Área de medición mínima: 0.12 mm.
6. Luminancia de sensibilidad para iluminante A:  $0.03 \text{ cd}/\text{m}^2$ .
7. Exactitud de luminancia:  $\pm 2\%$  at 2856 K.
8. Repetitividad de luminancia: la desviación estándar de mediciones repetidas durante un periodo 30 minutos es menor que 0.1 %.
9. Precisión del color para iluminante A: X:  $\pm 0.0015$ ; Y:  $\pm 0.0010$ .
10. Repetitividad del color para iluminante A:  $\pm 0.0005$  a CCT de 2856 K.
11. Error de polarización:  $\leq$  del 5% en la medición de las fuentes linealmente polarizado en el rango visible.
12. Campo visual de vista:  $8.5^\circ$  con lente MS55.
13. Interfaces: RS 232 e IEEE-488.

14. Resolución digital: 16 bits.
15. Alimentación: 100-240 AC.
16. Peso: 5.44 Kg con lente MS55.
17. Temperaturas de funcionamiento: 1-30 °C.
18. Humedad: 0-90% sin condensación.
19. Sensibilidad: Distancia : 44 mm to  $\infty$  --(0.04-27.4K) Cd/m<sup>2</sup>.
20. Campo de cobertura: Distancia: 44 mm ---0.48 mm.

## 9.2 Cabinas de iluminación

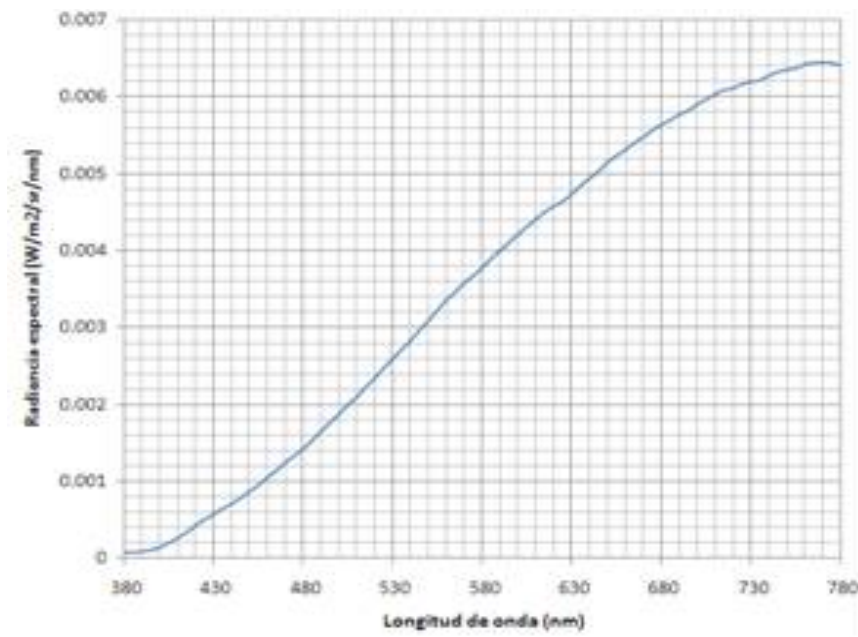
Las distintas fuentes se encuentran instaladas en dos cabinas de iluminación diferentes. Una comercial VERIVIDE CAC 120 (CABINA 1) y otra fabricada en el laboratorio (CABINA 2). Las dimensiones de esta última le permite estar instalada dentro de la cabina comercial ocupando la mitad, aproximadamente, de su anchura.

Las características de las fuentes empleadas en las experiencias, así como la nomenclatura empleada para definirlos y su curva espectral quedan resumidos en las tablas e imágenes siguientes. Cada una de las fuentes se puede regular en intensidad.

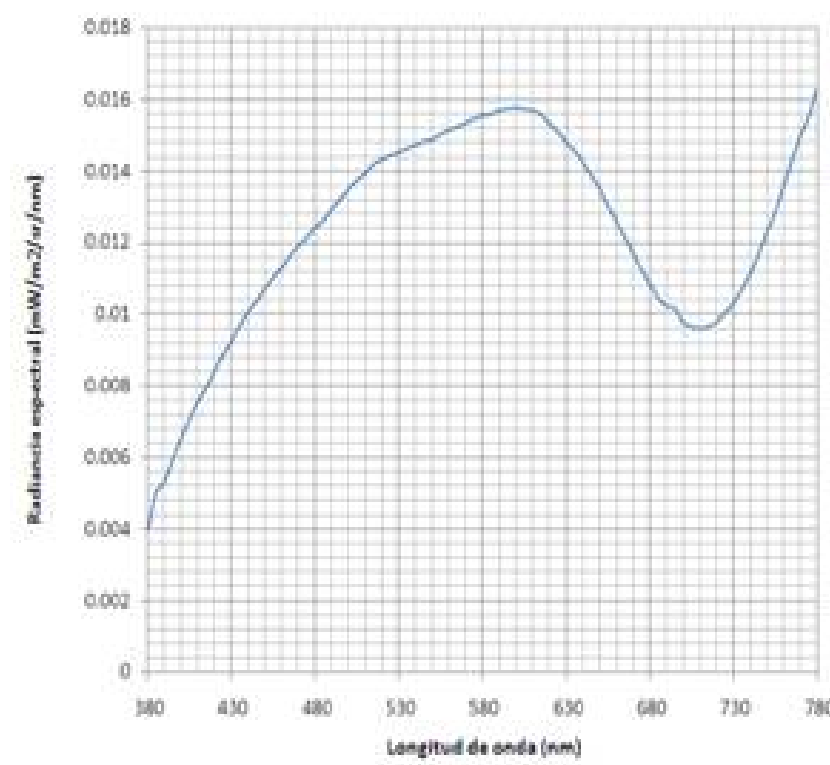
	NOMBRE	TIPO	CARACTERÍSTICAS	CRI	CCT (K)
CABINA 2	RGBA	LED	32 Leds en forma matricial tipo luxeon Rebel con óptica integrada de 12° de apertura. Driver y luminaria del fabricante LUMIDRIVES.	-	-
CABINA 2	K2	LED	4 leds LUXEON K2 montados en serie y sin óptica	90	6100
CABINA 1	A	INCANDESCENTE	Lámpara Halógena de Tungsteno	100	2800
CABINA 2	SOLUX	INCANDESCENTE	Lámpara SOLUX. Halógena convencional con filtro daylight	100	3500
CABINA 1	D50	FLUORESCENTE	T8 5000K	98	5000
CABINA 1	D65	FLUORESCENTE	T12 6500K	98	6500

**Tabla 1:** Iluminantes empleados en las pruebas

Las curvas espectrales de dichas fuentes medidas con el radiómetro Photo Research 701 se muestran en las siguientes gráficas.

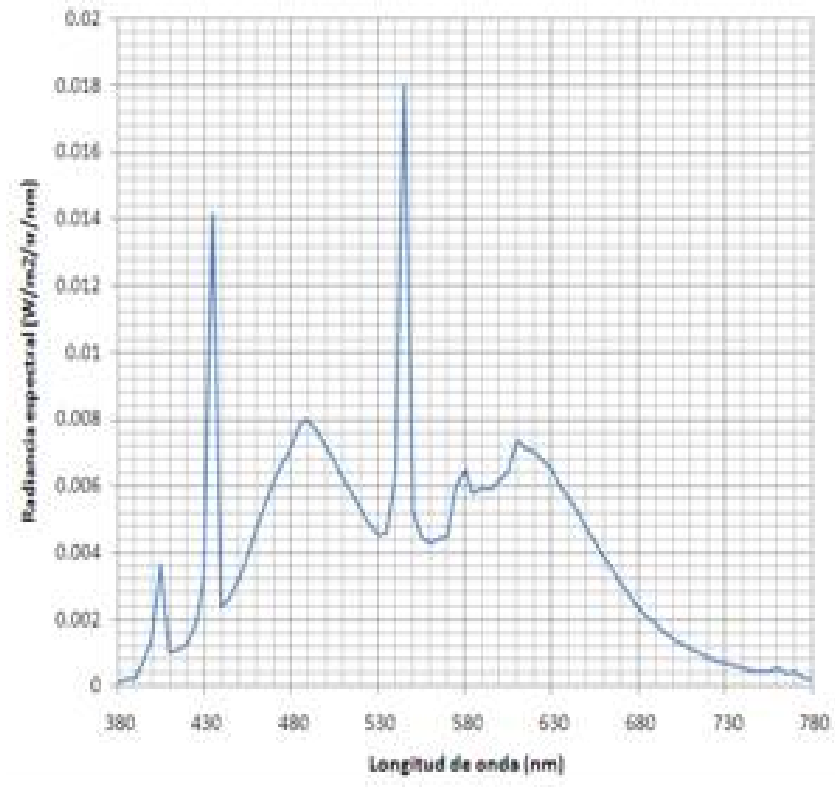
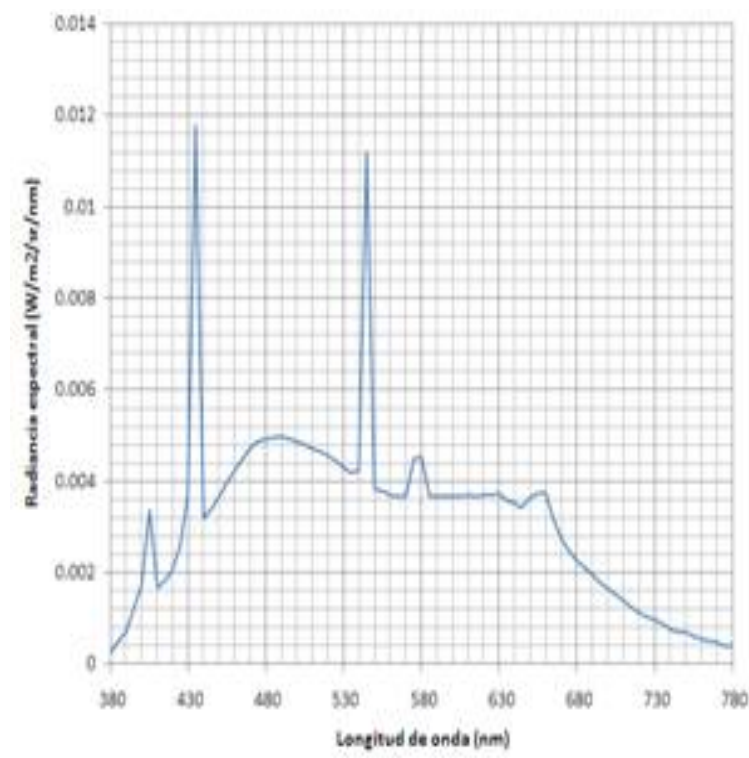


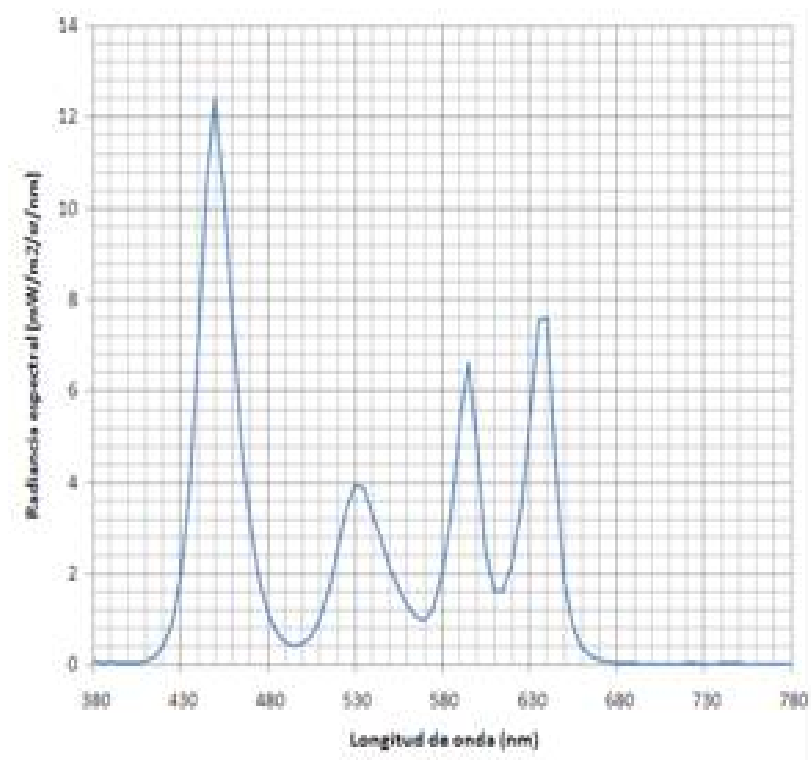
**Ilustración 47:** Iluminante A



**Ilustración 48:** Iluminante SOLUX



**Ilustración 49:** Iluminante D50**Ilustración 50:** Iluminante D65



**Ilustración 51:** Iluminante RGBA



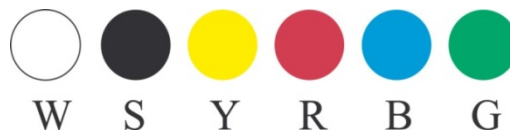
**Ilustración 52:** Cabina VERIVIDE CAC 120

### 9.3 Muestras utilizadas (NCS)

En el desarrollo del trabajo, se han empleado muestras del Album NCS. En este apartado se exponen sus características más importantes.

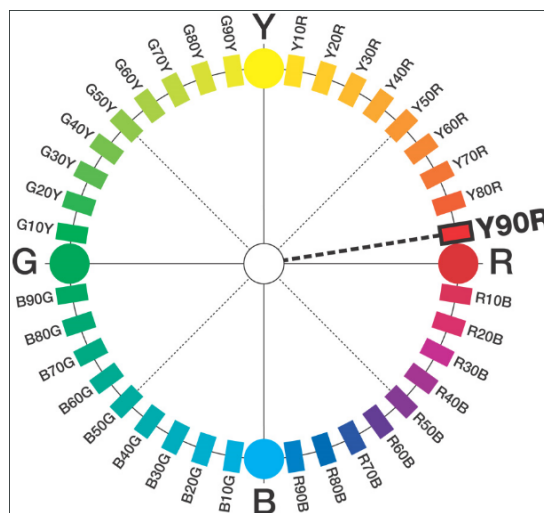
Existen en el mercado diferentes atlas de color, siendo el álbum NCS uno de los más empleados junto con el atlas Munsell.

El álbum NCS es un espacio de color que se basa en 6 tonos básicos: Blanco (W), negro (S), rojo (R), verde (G), azul (B) y amarillo (Y). 4 tonos cromáticos y 2 acromáticos.



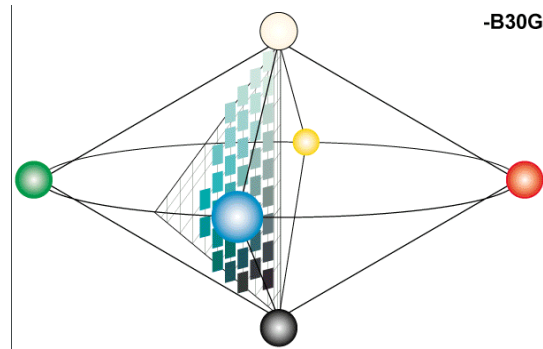
**Ilustración 53.** Tonos básicos del álbum NCS

A partir de los 4 tonos cromáticos Y R B G se construye una ordenación circular como la que aparece en la siguiente ilustración con 36 tonos mezcla. Por ejemplo, Y90R es un tono básico compuesto de un 10% de amarillo y un 90% de rojo.



**Ilustración 54.** Tonos básicos del álbum NCS

A partir de cada uno de los 40 tonos básicos, se generan más tonos añadiendo a éstos el efecto de la oscuridad y claridad, es decir, el porcentaje de blanco o negro añadido. Esto supone la adición de una dimensión más que se representa como un doble cono como se puede apreciar en la siguiente figura. Así, las variantes de cada tono básico según los porcentajes de blanco y negro se agrupan en una matriz triangular según puede verse en la figura siguiente para el caso del tono básico B30G.



**Ilustración 55.** Conjunto de muestras del tono B30G.

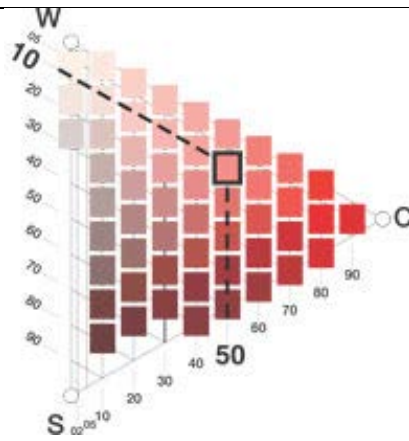
La codificación de cada muestra del álbum NCS tiene en cuenta las proporciones de cada tono añadido según el porcentaje de:

- X% de negro.
- Y% de blanco.
- Z% de color. (de uno de los 40 tonos básicos).

Siendo la suma de X, Y y Z igual a 100%.

Como ejemplo, la muestra denominada S 1050 Y90R, se compone de:

S 1050 Y90R	10% NEGRO
	50% BLANCO
	40% Y90R



**Ilustración 56.** Posición de la muestra S1050 en la hoja Y90R.

El Álbum NCS se edita en varios formatos. En la siguiente figura aparece el formato de álbum con el que se han realizado las pruebas.



**Ilustración 57.** Formato empleado del álbum NCS.

En la anterior figura puede observarse el modelo del álbum abierto, en el que cada 2 hojas de dicho álbum contiene el conjunto de muestras que pertenecen a un tono básico. Cabe destacar que por cada muestra hay 3 copias iguales, lo cual resulta de utilidad para realizar experiencias de discriminación de color.

## **10 COPIA COMPLETA DE TRABAJOS PUBLICADOS**

## Informe de los Directores de tesis

Según el artículo 46.2 de la normativa de Doctorado de la Universidad de Extremadura, el director de tesis debe realizar un informe sobre el impacto de las publicaciones del doctorando cuando se presente la tesis como compendio de artículos. Las publicaciones según el artículo 46.1 e de la normativa de doctorado “*De estas aportaciones al menos dos tendrán que estar publicadas en revistas indexadas en el ISI-JCR o tratarse de alguna contribución relevante en su campo científico según los criterios de la Comisión Nacional Evaluadora de la Actividad Investigadora (CNEAI).*”

Las contribuciones que se presentan son:

### **Publicaciones publicadas/aceptadas en revistas con índice de impacto:**

1. Pardo PJ; **Cordero EM**; Suero MI; Pérez AL. Influence of correlated color temperature of a light source on colour discrimination capability of observers”.Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision. 29, pp. A209 - A215. OSA, 2012.

Tipo de producción: Artículo científico

Fuente de impacto: WOS (JCR) Categoría: Science Edition - OPTICS

Índice de impacto: 1.94 Revista dentro del 25%: Si

Posición de publicación: 18 Num. revistas en cat.: 78

2 **E.M. Cordero**; P. J. Pardo; A. L. Pérez and M. I. Suero. Correlation of various light source quality. Coloration Technology. 127, pp. 136 - 144. Wiley, 2011.

Tipo de producción: Artículo científico Tipo de soporte: Revista

Fuente de impacto: WOS (JCR) Categoría: Science Edition - MATERIALS SCIENCE, TEXTILES

Índice de impacto: 0.97 Revista dentro del 25%: Si

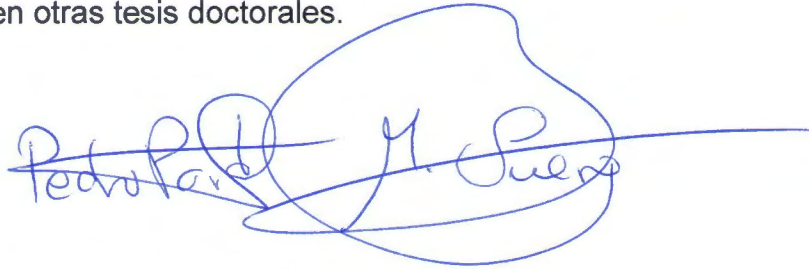
Posición de publicación: 4 Num. revistas en cat.: 21

El autor de la tesis es el que ha llevado el peso principal de todo el trabajo de investigación, análisis de resultados y elaboración de las publicaciones.

Entre las tareas que ha realizado destacan:

- Medidas espectralradiométricas de fuentes luminosas y reflectancia espectral de muestras.
- Elaboración de protocolos y realización de experiencias psicofísicas.
- Implementación de cabina de iluminación "ad hoc".
- Cálculos numéricos mediante excel y matlab.
- Análisis de los datos.
- Obtención de los resultados y elaboración de las conclusiones.

Dado que los autores de los trabajos publicados son todos doctores salvo el autor de esta tesis, no ha lugar a ninguna renuncia expresa de utilización de los trabajos en otras tesis doctorales.



Firmado: Pedro J. Pardo y M<sup>a</sup> Isabel Suero



# Correlation of various light source quality indices with the colour discrimination capacity

Eduardo M Cordero,<sup>a</sup> Pedro J Pardo,<sup>b,\*</sup> Ángel L Pérez<sup>c</sup> and María Suero<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Extremadura, Avda. de Elvas s/n, 06071 Badajoz, Spain

<sup>b</sup>Department of Computer and Networks Systems Engineering, University of Extremadura, C/Santa Teresa de Jornet 38, 06800 Mérida, Spain  
Email: ppardo@unex.es

<sup>c</sup>Department of Physics, University of Extremadura, Avda. de Elvas s/n, 06071 Badajoz, Spain

Received: 13 October 2010; Accepted: 27 January 2011

The quality of a light source can be measured against various criteria – colour rendering, durability, etc. Another criterion is the quality of the colour of the objects it illuminates. Traditionally, this aspect has been associated almost exclusively with that of colour rendering, but the emergence of new light-emitting diode technology light sources has led to its being re-examined. In particular, questions have been raised as to whether colour quality can be calculated by a single measure. Instead, it seems a multidimensional index might better cover such concepts as colour rendering, colour discrimination, harmony, etc. The present work describes a visual colour discrimination experiment whose results corroborate the existence of a multidimensional index, even although some of the parameters commonly used to describe the quality of a light source might be correlated with each other.

## Introduction

The International Commission on Illumination (CIE) defines colour rendering (CR) in its Lighting Vocabulary [1] as an ‘Effect of an illuminant on the colour appearance of objects by conscious or subconscious comparison with their appearance under a reference illuminant’. The currently recommended method of calculating the colour rendering index, CRI, was officially introduced in 1974 and is described in the 1995 publication CIE 13.3 [2]. The objective of this method was to describe with a single number the average of the colour variations presented by eight colour samples when illuminated with the object light source with respect to another reference light source. Faced with modern white light-emitting diode (LED) technology, however, the method was found to have clear failings independently of whether these new types of source were red, green, blue (RGB) – and occasionally yellow or amber – clusters, white phosphorus LEDs (WLED) or organic LEDs (OLED). One problem that arises when assessing RGB-type white LED sources is that, although the CRI value may appear acceptable with the normal test samples, the appearance of very saturated colours can be very poor (e.g. dark reds appear brown and vice versa). Furthermore, European compact fluorescent lights (CFL) were designed by selecting a mixture of three narrow-band-emitting phosphors in order to achieve a reasonably high CRI, but they are not necessarily good at representing visual colour rendering comparisons agreeable to all observers [3]. Recent visual experiments have found that the CRI ranks light source quality differently from the results of tests performed with real observers [4–8]. Also, a computational study [9] comparing the ranking of 34

different illuminants on the basis of nine colour quality (CQ) indices proposed in the literature showed the results to vary greatly. Their conclusions were that a single index could not correctly account for colour rendering and related phenomena. In addition to the concept of colour rendering, there are others, such as the colour quality of a light source [10,11], colour discrimination capability [12–14], colour rendering capacity [15], visual clarity [16], feeling of contrast [17], colour preference [18] and harmony [19], that must be considered.

In its publication (no. 177), the CIE [20] recommended the development of a new colour rendering index or a set of indices that provides supplementary information related to the aforementioned concepts. This supplementary index (or set of supplementary indices) should not be used to replace the current CIE CRI, but replacement of CRI will be considered after successful integration of the new index. Among the individual proposals of members of the CIE technical committee was the need to develop a CQ scale that was four-dimensional, or divided into four sub-scales: colour-difference judgements CDI, colour preference CPI and colour correlated temperature CCT, as well as the CRI [21]. Schanda [22] defined a combined preference-rendering index based on the observation that, when colours are distorted relative to those produced by a reference illuminant, people prefer that this distortion is towards more saturation and more reddish hues.

In 2005, Davis and Ohno [23] developed a simulation program to analyse white LED spectra mainly by multi-chip LEDs in comparison with various conventional sources. To simulate multi-chip LEDs, a mathematical model was used to approximate a single-colour LED



spectrum for any wavelength and spectral width. The program can simulate 3- or 4-chip white LEDs and automatically calculates the power ratios of each LED to bring its chromaticity coordinate exactly onto the Planckian locus at a given correlated colour temperature (CCT). This allows the use of an iterative method to optimise LED spectra for maximising the CRI or luminous efficacy under given conditions. By simulating various combinations of 3-chip white LED spectra, those authors identified several problems with CRI. One was that the rendering of saturated colours can be very poor even though the CRI has a reasonably good value. In general, such discrepancies arise when the chroma of the samples deviates in this direction of increasing saturation, as may occur with certain RGB LED sources. The Colour Quality Scale introduced by Ohno and co-workers at the National Institute of Standards and Technology (NIST) is an attempt to correct this by introducing a saturation factor.

With regard to the capability of observers to make judgements on colour difference, a visual experiment by Viénot *et al.* [24] showed this capability to be poor when RGB LED clusters were used as light sources. The experiment consisted of testing the colour discrimination of observers using the desaturated Lanthony-Panel D15 (DD15) colour discrimination test illuminated with various LED clusters or with a control light. Because of the low saturation of the samples and the subsequent small hue steps between them, errors in ordering the caps are likely to occur in the case of irregularities of the spectral distribution of the source. The results distributed the 57 observers into various classes: 17 observers successfully passed the test under all illuminations. For these observers, the screening power of DD15 is not sensitive enough. Among the observers who failed, four failed with the continuous spectrum light only, producing only one inversion of adjacent caps. Compared with the other classes, this was a small number of subjects. With a continuous spectrum and LED illumination, eight observers failed and 28 observers failed only with LED illumination. All LED illumination impairs discrimination along the yellow axis, with the greatest severity for the RGB cluster. Compared with the errors under continuous spectral illumination, which mainly consisted of inversions of adjacent caps, the errors under LED illuminations often consisted of erroneous choices of caps as far as three or four steps away in hue. These visual experiments showed that the impairment is severe and specifically concentrated around greenish-blue and purple shades. The authors put this down to the RGB LED cluster's lack of spectral emission in certain zones of the spectrum. The study highlighted the need for a complex CQ metric capable of responding to the different phenomena.

A possible candidate to form part of such a complex metric that would facilitate the formation of judgements about colour discrimination is Thornton's Colour Discrimination Index (CDI) [12], also known as the Gamut Index (GI). This index is calculated on the basis of the area enclosed by the polygon formed by the chromaticity coordinates of the eight samples used in the calculation of the CRI in the chromaticity diagram associated with the CIE 1960 space. Rea and Freyssinier-

Nova [25] later proposed the Gamut Area Index (GAI), although they admitted that this index is best suited as a measure of the degree of saturation of the colours provided by a light source. That same research group had earlier proposed a dual CRI-GAI-based metric to express the quality of a light source. As colour discrimination index, they used the Full Spectrum Colour Index (FSCI) – a modification of the Full-Spectrum Index (FSI), a mathematical measure of how far a radiant source deviates from the equal energy spectrum [26]. FSCI has an inverse scale starting at 100 and scaled so that a warm white fluorescent lamp has a value of approximately 50. It is calculated as follows:  $FSCI = 100 - (5.1 \times FSI)$ . Any values less than zero (e.g. monochromatic light) are set to zero.

The objective of the present work was to carry out a visual experiment involving colour discrimination in order to study the possible relationships between the indices commonly used to qualify the goodness of a light source in terms of its various aspects and the discriminatory capacity of a set of observers. It was hoped that the results would help decide whether it is possible to use a single index to identify the colour rendering capacity and colour discrimination of any given light source or whether on the contrary it is necessary to use a multidimensional coefficient.

## Experimental

The visual experiment consisted of a test of colour discrimination in which the observer must indicate whether each of the 20 pairs of chromatic samples is perceived to be different in a pair or not. This test was repeated with each observer for each of the light sources evaluated. The following subsections detail the procedures of the test design and of the performance of the experiment.

### Test design

It was decided to use the colour samples of the Natural Colour System (NCS) 1950 album. To this end, we acquired a copy of the NCS Original Album, produced and controlled by the NCS Quality Centre according to NCS Quality Level 1. There are three levels of quality in NCS: Calibrated Matching Standards, NCS Quality Level 1 and NCS Quality Level 2 (the lowest level). In NCS, all reproduction tolerances are specified in  $\Delta E_{(CMC1:1)}$  units against the primary standard. The Quality Level 1 of the NCS Quality Management System determines that, for 80% of the samples,  $\Delta E_{(CMC 1:1)}$  is  $<0.6$  and for the remaining 20%  $\Delta E_{(CMC 1:1)}$  is  $<1.0$  with respect to the primary standard.

The NCS album consists of 1950 colour samples divided into 40 sheets grouped by hue. Of these 1950 samples, 1240 were selected as samples having a difference of 10 NCS units at least in one of the scales used in this album (i.e. blackness, chroma and hue). Compared with their neighbours, these samples were close enough to be used in a colour discrimination test, yet different enough to be distinguished by the observers. Their spectral reflectance in the visible range was measured spectroradiometrically with a  $0^\circ/45^\circ$  configuration. The instrument employed

was a Photo Research PR-701S tele-spectroradiometer (Photo Research, Inc., USA) with a spectral resolution of 2 nm between 380 and 780 nm, a <2% radiance measurement error and CIE 1931  $x = \pm 0.0015$ ;  $y = \pm 0.0010$  colour error for an illuminant A simulator. Colour differences between each pair of samples for each pair of illuminants were calculated based on the emission spectra of the sources and the reflectance curves of the samples measured by the tele-spectroradiometer. The initial light source was a VeriVide DCAC 120 cabin (VeriVide, UK) equipped with light sources simulating types A, D50 and D65 illuminants and a TL84 fluorescent lamp. The spectral reflectance measurements were performed comparing the spectral radiance reflected in a Spectralon reflectance standard (LabSphere, USA), which was traceable to NIST, with the spectral radiance of the chromatic samples. To minimise the noise in the measurements, we finally used as light source a Solux filter halogen lamp (Tailored Lighting Inc., USA) with a luminance of 1073 cd/m<sup>2</sup> and a CCT of 4680 K.

Additional information was requested from the Scandinavian Colour Institute (SCI) on the spectroradiometric measurements of their product so as to complete our measurements. Those measurements had been carried out with a specially calibrated GretagMacbeth ColourEye 7000 spectrophotometer (X-Rite, USA). The data obtained are traceable to the Zeiss DMC26 NCS reference instrument.

The NCS atlas is a material example of the NCS system recommended to be viewed under an achromatic surround of relative luminance  $Y = 56$  and CIE illuminant C, with the sample of a size so that at a particular viewing distance it corresponds to a 2° viewing field.

To select the pairs of colour samples that would be compared by the observers, we made a study of all the NCS samples using our measured reflectance curves complemented by the data provided by the SCI. An algorithm was implemented to locate the closest colour sample pairs using the CIE D65 as reference illuminant [27] and DE94 as the colour-difference formula [28]. In parallel, the same calculation was performed using the CAM02-SCD [29], which is based on CIECAM02 with the parameters  $L_a = 100.0$ ,  $Y_b = 20$  and average surround conditions [30].

For each of the two formulae, we selected the 50 pairs with the least colour differences, and from these 100 pairs we then selected 60, trying to cover the colour plane as evenly as possible. The reason for using this twofold selection criterion was that we wanted to minimise the possible lack of uniformity of any specific colour difference formula, leaving the ultimate responsibility for the choice of the sample pairs to real observers by means of the following pilot trial.

The pilot study used these first 60 samples to apply the test to real observers in order to check whether or not it was easy to distinguish each of the pairs. It should be borne in mind that the development of the NCS colour system was not based on differential thresholds of colour between each pair of contiguous samples. This pilot study was performed with 30 matching and 30 different pairs selected randomly (the observers were not informed of the proportion of matching and different pairs). For

each item of the test (i.e. pair of colour samples), the Discrimination Index (DI) was calculated. The DI of a test item indicates its ability to differentiate between high-achieving pupils and low-achieving pupils [31], providing, in our case, information on each item's capacity to distinguish between good and poor observers. To this end, it was necessary to determine the subgroup of best observers (the top-scoring third in the test) and the subgroup of poorest observers (the bottom-scoring third). The DI for an individual test item can be computed by subtracting the number of observers in the low group responding to the item correctly from the number in the high group responding to the item correctly. Dividing this figure by the number of observers in one group, one then obtains the DI. The value of a perfectly discriminating item is 1.0, but a value over 0.35 is acceptable, as is shown in the literature [31].

The pilot study was conducted in the VeriVide DCAC120 lighting cabin under a CIE D65 simulator. The results were used to choose the 20 best sample pairs (those with the greatest values of DI) covering the whole colour plane (Figure 1). In the figure, the rhombi indicate that these samples were chosen by means of the maximum similitude criterion given by the CIE-DE94 formula, while the squares indicate that the choice was by means of the CAM02-SCD formula. The final 20 pairs chosen are listed in Tables 1 and 2, together with the colour differences of each pair calculated for each of the light sources used in the present work. The pairs of samples which present a smaller colour difference are those in which the two samples of the pair are equal, as can be seen in their identification in the table.

### Apparatus

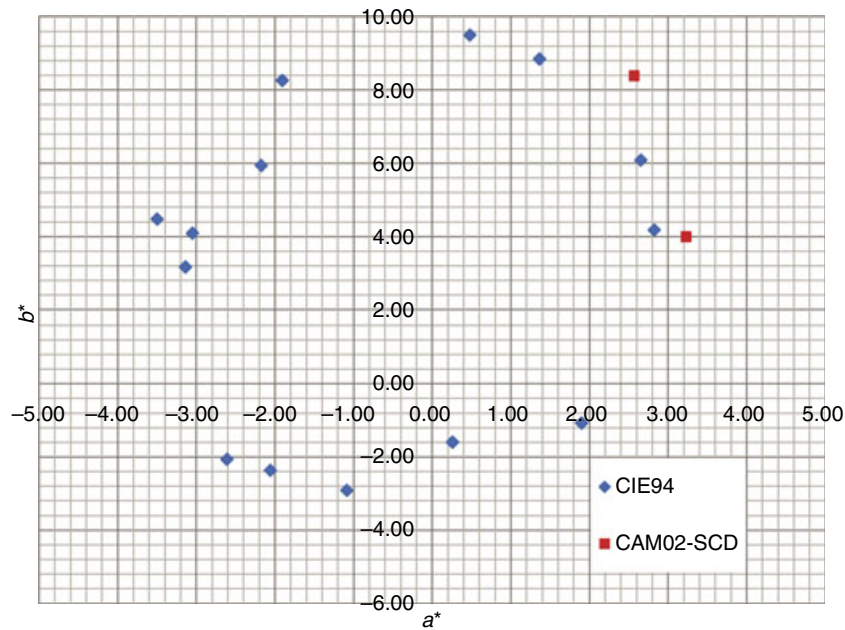
For the visual experiment, a second viewing cabinet was constructed inside the lighting cabinet described above. This secondary cabin was equipped with the following light sources: two RGBA (red, green, blue, amber) LED lamps, model Lumidrives Lumispot 32 K2 (Dialight-LumiDrives, UK), each controlled by a Colordrive XP driver with DMX protocol control (Dialight-LumiDrives, UK); a custom-constructed Lumileds K2 WLED lamp (Luminova, Spain); and two Solux D50 filter halogen lamps from Tailored Lighting Inc.

### Sample

The subjects were chosen randomly from the staff members and students of the Science Faculty and from passers-by who were on the university campus. Initially, 72 people, 40 men and 32 women, were selected. They participated in the test with their vision compensated by glasses or contact lenses when necessary and having previously passed the Ishihara 38 plates edition and Farnsworth D-15 colour vision tests. The visual experiment was carried out by dividing the population sample into two experimental groups of 36 persons each.

### Colour discrimination tests

The first test was performed with 20 colour sample pairs from the NCS Album presented to 36 observers in five consecutive sessions with a different light source in each. The order of variation of the light source and the



**Figure 1** CIE Lab 1976 chromaticity coordinates of the sample pairs chosen for the experiments. The two colour difference formulas used are represented by diamonds (CIE94) and squares (CAM02-SCD). Four samples have chromaticity coordinates lying outside the area shown in the chart

**Table 1** NCS sample pairs which made up the tests, together with the colour differences between the samples of each pair calculated for the five RGBA light sources of test 1

Item no.	Sample	Sample'	$\Delta E_{94}$					$\Delta E_{CAM02-SCD}$				
			2800	5000 Low	5000 Medium	5000 High	6500	2800	5000 Low	5000 Medium	5000 High	6500
1	2005-Y70R	2005-Y70R	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06
2	2570-Y30R	2570-Y30R	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
3	3030-R70B	3030-R70B	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05
4	0603-R60B	0505-R60B	1.24	1.25	1.25	1.24	1.25	0.95	1.53	1.51	1.50	1.43
5	2005-Y90R	2005-Y80R	1.19	1.25	1.25	1.26	1.30	0.84	0.97	0.98	1.01	1.12
6	1005-R90B	1005-R90B	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.14	0.12	0.12	0.12	0.11
7	1005-R30B	1005-R40B	0.89	1.04	1.03	0.99	0.81	0.67	0.97	0.97	0.94	0.85
8	1005-Y40R	1005-Y40R	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
9	1505-Y20R	1505-Y20R	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.18	0.20	0.19	0.18	0.18
10	0505-R90B	0505-R80B	1.44	1.46	1.47	1.49	1.66	2.10	2.02	2.02	2.15	2.30
11	2005-G60Y	2005-G60Y	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04
12	2005-G40Y	2005-G30Y	0.72	0.64	0.63	0.64	0.61	0.54	0.56	0.56	0.58	0.62
13	0505-G20Y	0505-G30Y	2.00	1.75	1.73	1.73	1.58	1.59	1.59	1.58	1.62	1.68
14	1505-G90Y	1505-G90Y	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.30	0.34	0.31	0.30	0.30
15	1005-R80B	1005-R80B	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08
16	0505-G10Y	0505-G10Y	0.25	0.26	0.26	0.26	0.26	0.17	0.19	0.18	0.17	0.17
17	2005-Y20R	2005-Y30R	1.32	1.22	1.22	1.23	1.23	1.29	1.09	1.10	1.15	1.22
18	0510-G90Y	0510-G80Y	1.44	1.46	1.45	1.43	1.40	1.29	1.27	1.24	1.24	1.27
19	5540-G60Y	5540-G60Y	0.66	0.65	0.65	0.65	0.64	0.61	0.60	0.60	0.61	0.61
20	1505-Y80R	1505-Y90R	1.04	1.05	1.05	1.06	1.06	0.72	0.82	0.82	0.84	0.89

presentation of the samples was randomised. Sessions were separated by an adaptation time in the dark and restarted under a new light source.

The first five light sources were physically the same – two RGBA LED lamps configured in the following five different proportions: three of equal 178 cd/m<sup>2</sup> luminance, but different correlated colour temperatures, CCT, one low 2800 K, one medium 5000 K, and one medium–high 6500 K; and two of the same medium CCT of 5000 K, but different luminances (50 and 100 cd/m<sup>2</sup>). The precise luminance and colour temperature values of each configuration are listed in Table 3.

The aim of the first test was to determine whether the different colour temperatures and luminances influenced (in all cases within the photopic level) the observers' colour discrimination capacity for a light source of the same spectral characteristics. For this reason, the light source chosen consisted of two RGBA LED lamps with the same spectral peaks in all cases, but in different proportions, allowing us to minimise, although not eliminate, spectral variations between the configurations (Figure 2).

In the second test, five distinct light sources were used: the VeriVide cabin D50 and D65 illuminant simulators; a

**Table 2** NCS sample pairs which made up the tests, together with the colour differences between the samples of each pair calculated for the five light sources of test 2

Item no.	Sample	Sample'	$\Delta E_{94}$					$\Delta E_{CAM02-SCD}$				
			D50	D65	RGBA5000	Solux	WLED	D50	D65	RGBA5000	Solux	WLED
1	2005-Y70R	2005-Y70R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.05	0.05	0.05	0.04	0.06
2	2570-Y30R	2570-Y30R	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
3	3030-R70B	3030-R70B	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
4	0603-R60B	0505-R60B	1.10	1.15	1.27	1.16	1.38	1.44	1.36	1.63	0.97	1.64
5	2005-Y90R	2005-Y80R	1.09	1.22	1.27	1.09	1.50	0.87	1.01	1.05	0.81	1.28
6	1005-R90B	1005-R90B	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.12	0.12	0.12
7	1005-R30B	1005-R40B	1.27	1.19	1.17	1.26	1.37	1.21	1.44	1.19	0.98	1.76
8	1005-Y40R	1005-Y40R	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05
9	1505-Y20R	1505-Y20R	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.17	0.17	0.17	0.18	0.17
10	0505-R90B	0505-R80B	1.20	1.38	1.42	1.15	1.66	1.58	1.70	1.98	1.93	2.19
11	2005-G60Y	2005-G60Y	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
12	2005-G40Y	2005-G30Y	0.61	0.58	0.63	0.66	0.63	0.54	0.56	0.58	0.51	0.57
13	0505-G20Y	0505-G30Y	1.44	1.30	1.74	1.61	1.41	1.33	1.30	1.64	1.32	1.33
14	1505-G90Y	1505-G90Y	0.42	0.42	0.43	0.42	0.42	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28
15	1005-R80B	1005-R80B	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.08	0.08	0.09	0.08
16	0505-G10Y	0505-G10Y	0.25	0.26	0.26	0.25	0.26	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
17	2005-Y20R	2005-Y30R	1.04	0.99	1.12	0.99	0.77	0.94	0.90	1.06	0.92	0.77
18	0510-G90Y	0510-G80Y	1.34	1.30	1.42	1.20	1.08	1.10	1.08	1.23	1.00	0.92
19	5540-G60Y	5540-G60Y	0.66	0.66	0.65	0.67	0.66	0.60	0.60	0.61	0.60	0.61
20	1505-Y80R	1505-Y90R	1.05	1.09	1.07	1.10	1.29	0.84	0.91	0.87	0.81	1.09

**Table 3** The first test: luminance and colour temperature values of the five light source configurations and the corresponding percentages of correct responses given by the full sample of observers and by the subgroup of best observers

Name	RGBA2800	RGBA5000 low	RGBA5000 medium	RGBA5000 high	RGBA6500
Light sources					
CCT	2826.4	4907.2	4983.2	4931.4	6495.5
Luminance (cd/m <sup>2</sup> )	171.95	55.61	98.91	172.11	165.01
CRI	53.22	71.55	71.24	68.97	58.97
GAI	66.59	108.38	109.91	113.38	133.71
FSCI	8.9	47.86	49.58	50.24	57.39
Entire sample					
% correct responses	61.39	61.25	63.47	61.53	62.92
$\sigma$	10.2	10.1	11.0	10.7	9.9
Best observers					
% correct responses	66.15	67.69	71.54	69.62	70.38
$\sigma$	6.1	6.0	6.5	6.3	5.9

white phosphor LED lamp pumped in the blue; a Solux filtered halogen lamp; and again the two RGBA LED lamps with a colour temperature setting of 5000 K (Figure 3).

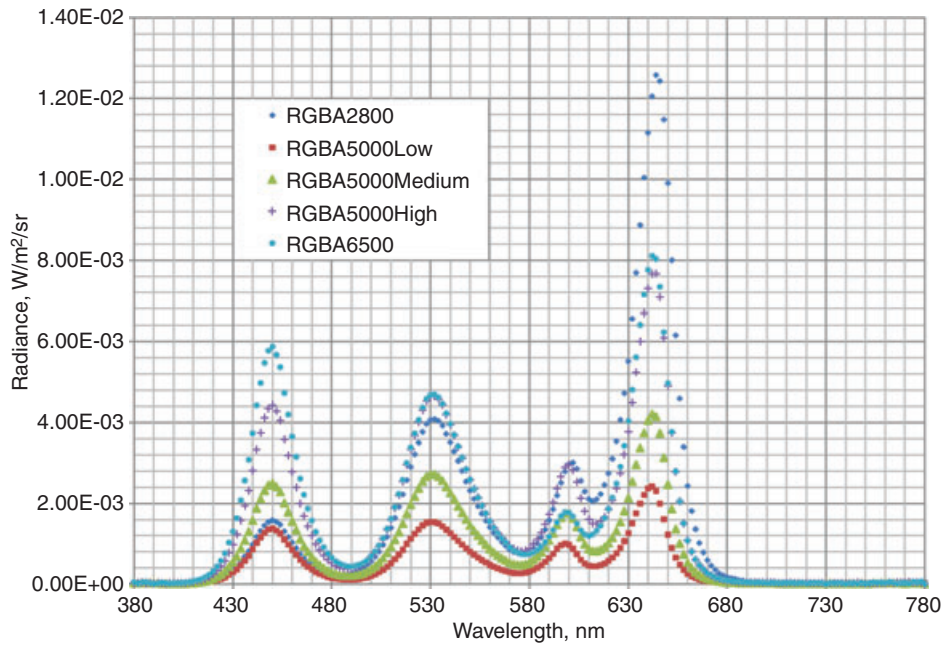
The aim of the second test was to examine the influence of the spectral component of each light source on the observers' colour discrimination. To this end, two indices commonly used in the literature were calculated – the gamut area and the full spectrum colour indices (GAI and FSCI; see Introduction).

## Results and Discussion

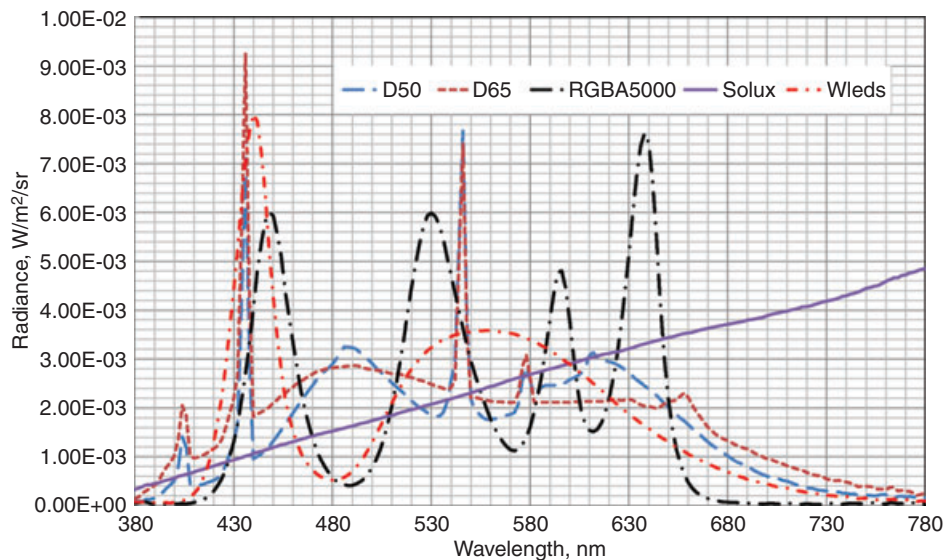
The results of the first test are summarised in Table 3. It can be seen in the table that there were small differences in the mean percentages of correct answers given by the overall group of 36 observers and the subgroup of the 12 best observers for each of the five configurations of the light source. However, these differences in the mean percentages of correct responses among each of the five

configurations of the light source were not statistically significant according to parametric (ANOVA) and non-parametric (Kruskal–Wallis) tests, and hence the null hypothesis that the correlated colour temperature or the photopic luminance level do not influence colour discrimination capacity cannot be rejected. These statistical tests are commonly used to determine the existence of two distinct populations by comparing the inter-group and within-group variances. In this case, the variables determining the possible different populations for statistical purposes are continuous, so that the differences between the various cases may not be sufficient despite the selection of three clearly separated CCTs and luminance levels.

The statistical analysis of this first test was performed without distinguishing between the two types of item which made up the test: those in which the two samples are equal and those in which they are different. From the standpoint of the objectives pursued in the present



**Figure 2** Spectral power distributions of the five RGBA LED light sources

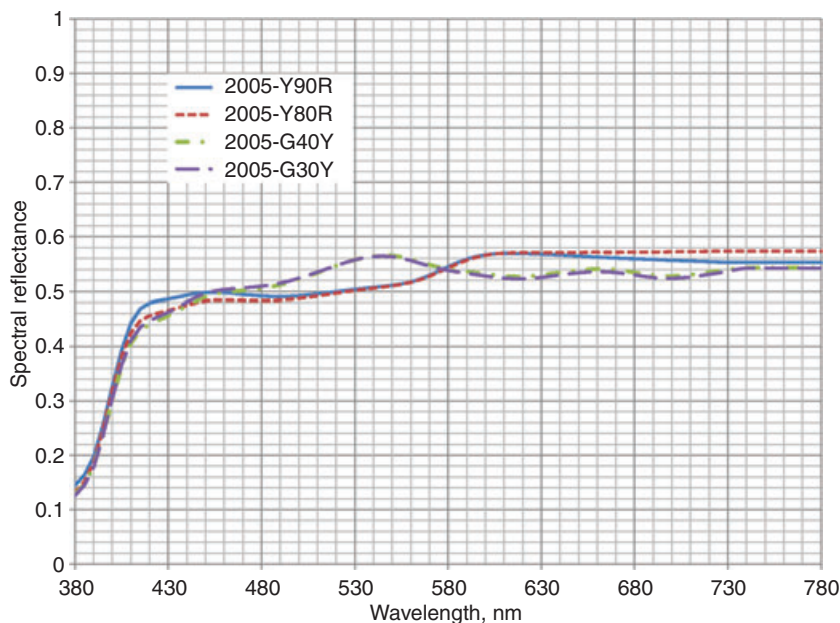


**Figure 3** Spectral power distribution of the five luminous sources employed in the second test

work, however, the two types of item are distinct. The colour difference of each pair may vary with a change of light source if the samples have different spectral reflectances. The items of equal samples, however, have identical reflectance curves, so that they do not present this source of variability in the responses because of the change either of reflectance or of illuminant. Repeating the above statistical analysis but separating the pairs that are equal from those that are different, we found that, in the former case, nearly 90% of the observers identify them correctly for all five light-source configurations. This high level of correct responses is attributable to the small, if not null, colour difference between each pair of samples, which facilitates obtaining the correct response.

The case is not the same for the different sample pairs. The difference in the reflectance curves of each sample

pair means that the colour differences can vary with a change in light source. To minimise this effect, the sample pairs chosen were of very similar spectral reflectance as they were all based on the samples of the NCS album prepared with a limited number of pigments. Figure 4 shows the reflectance curves of the most different pair [goodness-of-fit coefficient (GFC) = 0.9997] and of the least different pair (GFC = 0.9999). GFC is defined as the cosine of the angle between two signals and it is a commonly used measure of spectral similarity (for a detailed description see Imai *et al.* [32]). When, furthermore, one uses a light source, such as that employed in this first test, whose spectrum consists of four peaks that are regulated with different intensities to achieve different colour temperatures and luminances, one can minimise the effect of different light source spectra. The analysis of the data for the pairs of different



**Figure 4** Spectral reflectance curve of the most different pair sample and the most similar (but not equal) pair

**Table 4** Statistical analysis of the first test results divided by correlated colour temperature (CCT) and luminance and distinguishing between equal and different sample pairs

Division criteria: CCT	% correct responses Best observers group		Division criteria: luminance	% correct responses Best observers group	
Source	Matching pairs	Different pairs	Source	Matching pairs	Different pairs
RGBA2800	90.1	61.1	RGBA5000 Low	90.1	71.3
RGBA5000	86.4	69.5	RGBA5000 Medium	90.1	70.4
High					
RGBA6500	89.4	79.6	RGBA5000 High	86.4	68.5
ANOVA ( <i>P</i> -value)	0.59	0.02 <sup>a</sup>	ANOVA ( <i>P</i> -value)	0.46	0.88

<sup>a</sup>Statistically significant at a confidence level of 95%.

samples showed no significant differences for the case of three distinct values of the luminance, but appreciable and statistically significant (ANOVA  $P < 0.05$ ) differences for the case of different correlated colour temperatures (Table 4).

In the second test, the small differences observed in the mean correct response percentages obtained with each of the light sources (Table 5) were again not statistically significant. Likewise, the analysis separating the equal and different sample pairs showed no statistically significant differences between the various light sources. Table 6 lists the total correct response percentages for each sample pair and each light source. It can be seen that the percentage of correct responses for each pair of samples illuminated with a different light source depends on both the light source and the particular pair of samples, with the latter dependency being the stronger. However, no coherent criteria of variation for such dependencies can be deduced. In view of the inconclusive results of this second test, we decided to examine the possible correlations between the mean correct response percentages and the parameters normally used to describe the qualities of light sources (CRI, GAI, FSCI, CCT; see Introduction) together with the

**Table 5** The second test: luminance and colour temperature values of the five light sources and the corresponding percentages of correct responses given by the full sample of observers and by the subgroup of best observers

Name	D50	D65	RGBA 5000	Solux	White LEDs
Light sources					
CCT	4976.3	6553.3	5224.2	3350.1	6022.5
Luminance (cd/m <sup>2</sup> )	181.8	182.9	218.4	177.8	212.5
CRI	94.32	95.62	78.57	98.91	69.71
GAI	85.33	93.01	106.11	67.21	89.80
FSCI	65.79	78.68	46.12	83.93	59.37
Entire sample					
% correct responses	68.61	69.58	67.36	65.14	71.29
$\sigma$	10.25	10.6	11.4	11.7	10.5
Best observers					
% correct responses	73.85	77.31	72.3	75.77	76.54
$\sigma$	5.9	6.3	6.0	5.8	6.5

luminance. The values of these parameters for each light source are given in Tables 3 and 5 and the corresponding calculated Pearson correlation coefficients are given in

**Table 6** Correct response percentages obtained for each of the samples with the different light sources in tests 1 and 2

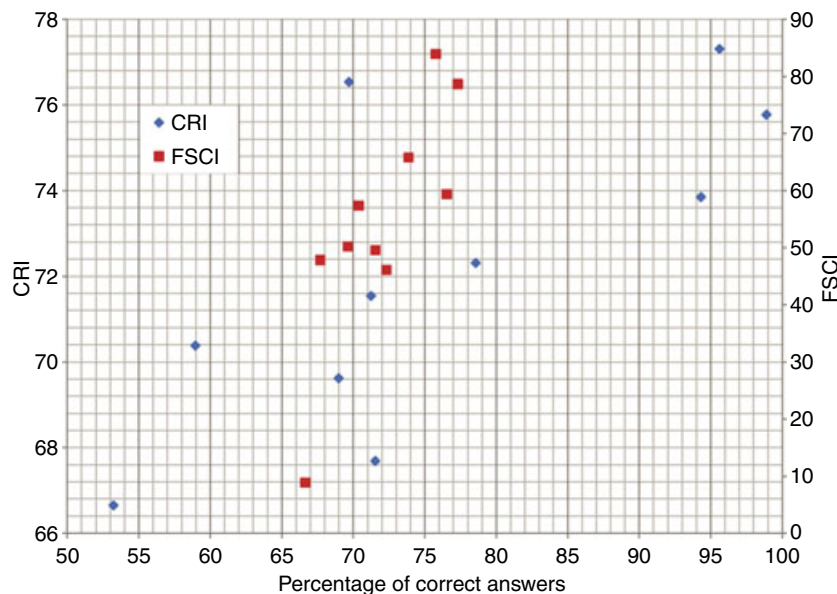
Item no.	Sample	Sample'	The first test % of correct responses				The second test % of correct responses					
			2800	5000 low	5000 medium	5000 high	6500	D50	D65	RGBA5000	Solux	WLED
1	2005-Y70R	2005-Y70R	83.3	75.0	63.9	83.3	77.8	69.4	86.1	69.4	80.6	86.1
2	2570-Y30R	2570-Y30R	72.2	58.3	63.9	61.1	63.9	69.4	77.8	75.0	80.6	72.2
3	3030-R70B	3030-R70B	50.0	41.7	36.1	50.0	41.7	44.4	58.3	50.0	41.7	72.2
4	0603-R60B	0505-R60B	25.0	38.9	30.6	36.1	33.3	44.4	33.3	30.6	25.0	22.2
5	2005-Y90R	2005-Y80R	16.7	33.3	11.1	30.6	16.7	63.9	41.7	30.6	33.3	69.4
6	1005-R90B	1005-R90B	61.1	77.8	83.3	83.3	66.7	77.8	61.1	72.2	69.4	75.0
7	1005-R30B	1005-R40B	27.8	41.7	33.3	27.8	47.2	86.1	80.6	66.7	52.8	80.6
8	1005-Y40R	1005-Y40R	75.0	75.0	75.0	80.6	83.3	83.3	77.8	77.8	75.0	83.3
9	1505-Y20R	1505-Y20R	72.2	77.8	75.0	63.9	66.7	75.0	77.8	63.9	61.1	88.9
10	0505-R90B	0505-R80B	69.4	50.0	75.0	61.1	80.6	72.2	80.6	66.7	77.8	69.4
11	2005-G60Y	2005-G60Y	80.6	75.0	75.0	77.8	77.8	72.2	91.7	63.9	75.0	77.8
12	2005-G40Y	2005-G30Y	25.0	30.6	38.9	30.6	47.2	55.6	55.6	50.0	61.1	55.6
13	0505-G20Y	0505-G30Y	77.8	88.9	91.7	83.3	88.9	80.6	86.1	97.2	86.1	91.7
14	1505-G90Y	1505-G90Y	86.1	61.1	88.9	66.7	80.6	69.4	75.0	69.4	72.2	80.6
15	1005-R80B	1005-R80B	83.3	72.2	58.3	75.0	61.1	61.1	66.7	86.1	75.0	69.4
16	0505-G10Y	0505-G10Y	83.3	75.0	86.1	77.8	75.0	80.6	75.0	86.1	72.2	86.1
17	2005-Y20R	2005-Y30R	83.3	77.8	83.3	58.3	75.0	80.6	86.1	88.9	75.0	72.2
18	0510-G90Y	0510-G80Y	47.2	80.6	86.1	75.0	80.6	75.0	69.4	91.7	66.7	58.3
19	5540-G60Y	5540-G60Y	72.2	63.9	72.2	77.8	58.3	61.1	66.7	72.2	77.8	75.0
20	1505-Y80R	1505-Y90R	36.1	30.6	41.7	30.6	36.1	50.0	44.4	38.9	44.4	47.2

**Table 7** Pearson correlation coefficients between the percentages of correct responses of the group of best observers for the different light sources and the quality indices studied

CCT	CRI	GAI	FSCI	Luminance
0.410	0.743	-0.252	0.817	0.519

Table 7. In Table 7, the strong correlation (Pearson correlation coefficient = 0.82) of FSCI with the percentages of correct responses stands out, with this

being the index that best reflects the facility with which colour samples can be distinguished under a given light source. There were also high correlation coefficients for CRI (correlation coefficient = 0.74) and to a lesser extent the luminance (correlation coefficient = 0.50). In contrast, GAI was very poorly correlated with the percentage of correct responses, even although this index was originally defined for the classification of the colour discriminating capacity of different light sources. Figure 5 shows the relationship between the correct response percentages of the group of best observers obtained with each light source and the CRI and FSCI values of those sources.

**Figure 5** Graphical representation of the relation between the mean percentage of correct responses with 10 luminous sources and the indices CRI and FSCI



## Conclusions

Taking into consideration the above results, one can conclude that, of the indices commonly used to describe the qualities of light sources, FSCI showed the best performance in describing the colour discrimination capability. Nevertheless, the correlation with the fraction of correct responses obtained for each light source studied was not high enough to allow it to be used as the only index, which again seems to point to the need for a multidimensional index based on CRI and FSCI. For future work, a possible investigation area will be the study of the CIECAM02-based formula, such as CAM02-UCS, to fit the colour discrimination data.

## Acknowledgements

Thanks are due to the Optics Department of the University of Granada and, in particular, to Professor E Hita for his constant support. This work was supported by grant number PDT 909A045 from the Regional Government of the Junta de Extremadura and partially financed by the European Regional Development Fund.

## References

1. CIE, *International Lighting Vocabulary*, Publication no. 17.4 (Vienna: Central Bureau of the CIE, 1987).
2. CIE, *Method for Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources*, Publication no. 13.3 (Vienna: Central Bureau of the CIE, 1995).
3. T L Dawson, *Color. Technol.*, **126** (2010) 1.
4. N Sandor, P Csuti, P Bodrogi and J Schanda, *Proc. CIE Expert Symposium on LED Light Sources: Physical Measurement and Visual and Photobiological Assessment*, Tokyo, Japan (2004) 16.
5. N Sandor and J Schanda, *Proc. AIC Colour '05*, Granada, Spain (2005) 511.
6. N Sandor, P Bodrogi, P Csuti, B Kranicz and J Schanda, *Proc. 25th CIE Session*, San Diego, USA (2003) 42.
7. F Szabo, N Sandor, P Bodrogi and J Schanda, *Proc. CIE Midterm Meeting – International Lighting Congress*, León, Spain (2005).
8. P Bodrogi, P Csuti, F Szabo and J Schanda, *Proc. CIE Expert Symposium on LED Light Sources: Physical Measurement and Visual and Photobiological Assessment*, Tokyo, Japan (2004) 24.
9. X Guo and K W Houser, *Lighting Res. Technol.*, **36** (2004) 183.
10. M B Halstead, *Proc. AIC 77*, New York, USA (1977) 97.
11. A Valverg, T Seim and P Sallstrom, *Proc. CIE 19th Session*, Kyoto, Japan (1980) 216.
12. W A Thornton, *J. Opt. Soc. Am.*, **62** (1972) 2.
13. W A Thornton, *J. Illum. Eng. Soc.*, **3** (1973) 61.
14. J Schanda and G Czibula, *Acta Chromatica*, **3** (1980) 209.
15. H Xu, *Color Res. Appl.*, **18** (1993) 267.
16. K Hashimoto and Y Nayatani, *Color Res. Appl.*, **19** (1994) 171.
17. K Hashimoto, T Yano, M Shimizu and Y Nayatani, *Color Res. Appl.*, **32** (2007) 361.
18. D B Judd, *Illum. Eng.*, **62** (1967) 593.
19. F Szabó, P Bodrogi and J Schanda, *Lighting Res. Technol.*, **41** (2009) 165.
20. CIE, *Colour Rendering of White Light Sources*, Publication no. 177 (Vienna: Central Bureau of the CIE, 2007).
21. E Radkov, *Proc. EPRI Int. Lighting Research Symp. 2006*, Florida, USA (2006) S16–1.
22. J A Schanda, *Lighting Res. Technol.*, **17** (1985) 31.
23. W Davis and Y Ohno, *Proc. SPIE*, 5941, San Diego, USA (2005) 59411G.
24. F Viénot, E Mahler, L Serreault, M Harrar, J J Ezrati, P Pérignon and A Bricoune, *Proc. AIC Colour '05*, Granada, Spain (2005) 33.
25. M S Rea and J P Freyssinier-Nova, *Color Res. Appl.*, **33** (2008) 192.
26. M S Rea, L Deng and R Wolsey, *NLPIP Lighting Answers: Full-Spectrum Light Sources* (Troy, NY: Rensselaer Polytechnic Institute; National Lighting Product Information Program, 2003) (revised March 2005).
27. CIE, *Colorimetry*, 3rd Edn, Publication no. 15 (Vienna: Central Bureau of the CIE, 2004).
28. R McDonald and K J Smith, *J. S. D. C.*, **111** (1995) 376.
29. M R Luo, G Cui and C Li, *Col. Res. Appl.*, **31** (2006) 320.
30. CIE, *A Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIECAM02*, Publication no. 159 (Vienna: Central Bureau of the CIE, 2004).
31. R R Deblasse, *Measuring and Evaluating Pupil Progress* (New York: MSS Information Corp, 1974).
32. F H Imai, M R Rosen and R S Berns. *Proc. First European Conference Color Graphics, Imaging and Vision*, Poitiers, France (2002) 492.

# Influence of the correlated color temperature of a light source on the color discrimination capacity of the observer

Pedro J. Pardo,<sup>1,\*</sup> Eduardo M. Cordero,<sup>2</sup> María Isabel Suero,<sup>3</sup> and Ángel L. Pérez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Computer and Network Systems Engineering, University of Extremadura, Centro Universitario de Mérida, C/Santa Teresa de Jornet 38, Mérida E06800, Spain

<sup>2</sup>Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Extremadura, Escuela de Ingenierías Industriales, Avda. de Elvas s/n, Badajoz E06071, Spain

<sup>3</sup>Department of Physics, University of Extremadura, Facultad de Ciencias, Avda. de Elvas s/n, Badajoz E06071, Spain

\*Corresponding author: [pjardo@unex.es](mailto:pjardo@unex.es)

Received September 1, 2011; revised November 8, 2011; accepted December 2, 2011;  
posted December 6, 2011 (Doc. ID 153461); published January 26, 2012

It is well known that there are different preferences in correlated color temperature of light sources for daily living activities or for viewing artistic paintings. There are also data relating the capacity of observers to make judgments on color differences with the spectral power distribution of the light source used. The present work describes a visual color discrimination experiment whose results confirm the existence of a relationship between the correlated color temperature of a light source and the color discrimination capacities of the observers. © 2012 Optical Society of America

OCIS codes: 330.1720, 330.1715.

## 1. INTRODUCTION

The quality of a light source can be measured against various criteria: energy efficiency, durability, color rendering, etc. Traditionally, the quality of the color of the objects it illuminates has been associated almost exclusively with that of color rendering, but the emergence of new LED-technology light sources has led to its being reexamined [1–3]. In particular, questions have been raised as to whether color quality can be represented by a single measure. Instead, it seems that a multi-dimensional index might better cover such concepts as color rendering, harmony, and color discrimination [4].

A possible candidate to form part of such a complex metric that would facilitate the formation of judgments about color discrimination is Thornton's Color Discrimination Index (CDI) [5], also known as the Gamut Index. This index is calculated on the basis of the area enclosed by the polygon formed by the chromaticity coordinates of the eight samples used in the calculation of the color rendering index (CRI) in the chromaticity diagram associated with the CIE 1960 space. Rea and Freyssinier-Nova later proposed the Gamut Area Index (GAI) [6], although they admitted that this index is best suited as a measure of the degree of saturation of the colors provided by a light source. That same research group had earlier proposed a dual CRI-GAI based metric to express the quality of a light source. With this they sought to quantify the color rendering of a light source and the influence of its color on discrimination capacities.

Except in the cases mentioned above, the study of color discrimination capacities under different light sources has been separated from such concepts as color rendering, and the industry has yet to incorporate any index measuring this capacity for each light source on the market.

An individual's color discrimination capacity undoubtedly depends (i) on the individual him or herself because of the different spectral sensitivities and types of cones present in the retina [7–9] and optical densities of the pre-receptor filters [10,11], (ii) on the zone of color space in which the samples being evaluated are located [12,13], and (iii), in the case of colors by reflection, on the spectral properties of the light source illuminating the scene [14].

It is clear that the influence of the light source on the color perceived by an observer of any sample illuminated by that source is the result of the interaction of the spectral power distribution (SPD) of the source with the spectral reflectance of the sample. Thus, the capacity of humans to make judgments about color differences between pairs of color samples depends on whether one or another light source is used. Viénot *et al.* [15] showed that this capacity was poor when RGB LED clusters were used as light sources. Their experiment consisted of testing the color discrimination of observers using the Lanthony desaturated D15 panel color discrimination test illuminated with various LED clusters or with a control light. Because of the low saturation of the samples and the subsequent small hue steps between them, errors in ordering the caps are likely to occur in the case of irregularities of the spectral distribution of the source. These visual experiments showed that the impairment is severe and specifically concentrated around greenish-blue and purple shades. The authors put this down to the RGB LED cluster's lack of spectral emission in certain zones of the spectrum. These results again confirm the influence of the light source's SPD on the color presented by the objects it illuminates.

Another parameter used to characterize white light sources is the correlated color temperature (CCT), although the CCT value of a light source has no connection to any of

the aforementioned quality indices (CRI, GAI, or CDI). Rather, one value or another is recommended depending on the illuminance level [16] or on the activity intended to be carried out under that lighting: high performance color rendering in specific workplaces [17], observation of paintings in museums [18], etc. Nonetheless, it is perfectly possible to obtain different SPD's for light sources with the same CCT thanks to metamerism [19–20].

The objective of the present work was to carry out a visual experiment involving color discrimination in order to study the possible relationships between the CCT or the illuminance level with the discriminatory capacity of a set of observers. The intention was to minimize the influence of the SPD on the color difference of two similar chromatic samples by changing the profile of the SPD. For this, a single red, green, blue, amber (RGBA) LED light source (5 cm × 3.5 cm) will be used. The initial hypothesis is that there is no relationship between the CCT or the illuminance level of a light source within the photopic range and observers' color discrimination capacity under that source.

## 2. METHODS

The visual experiment consisted of a test of color discrimination in which the observer must indicate whether the two colors in each of 20 pairs of chromatic samples are perceived to be different or not. This test was repeated with each observer for each of the light sources evaluated. The following subsections detail the procedures of the test design and of the performance of the experiment.

### A. Test Design

It was decided to use the color samples of the Natural Colour System (NCS) 1950 album. To this end, we acquired a copy of the NCS Original Album, produced and controlled by the NCS Quality Center according to NCS Quality Level 1. Quality Level 1 of the NCS Quality Management System determines that for 80% of the samples  $\Delta E_{(CMC\ 1:1)} < 0.6$ , and for 20%  $\Delta E_{(CMC\ 1:1)} < 1.0$ , with respect to the primary standard. The NCS atlas is a material example of the NCS system recommended to be viewed under an achromatic surround of relative luminance  $Y = 56$  and CIE illuminant  $C$ , with the sample of a size (5 cm × 3.5 cm) so that at a particular viewing distance it corresponds to a 2° viewing field.

The NCS album consists of 1950 color samples divided into 40 sheets grouped by hue. Their spectral reflectance in the visible was measured spectroradiometrically with a +++0°/45° configuration. The instrument employed was a PhotoResearch PR-701 S telespectroradiometer with a spectral resolution of 2 nm between 380 nm and 780 nm, a <2% radiance measurement error, and CIE 1931  $x = \pm 0.0015$ ;  $y = \pm 0.0010$  color error for an illuminant A simulator. Color differences between each sample pair for each illuminant were calculated based on the emission spectra of the sources and the reflectance curves of the samples measured by the telespectroradiometer. The initial light source was a VeriVide DCAC 120 cabin (VeriVide Ltd., Leicester, UK) equipped with light sources simulating types A, D50, and D65 illuminants and a TL84 fluorescent lamp. The spectral reflectance measurements were performed comparing the spectral radiance reflected in a Spectralon reflectance standard (LabSphere, North Sutton, USA), which was traceable to NIST, with the spectral radiance of the chromatic sam-

ples. To minimize the noise in the measurements, we finally used as light source a SOLUX filter halogen lamp (Tailored Lighting Inc., Rochester, USA) with a luminance of 1073 cd/m<sup>2</sup> and a CCT of 4680 K.

Of these 1950 samples, 50 pairs were selected as being close enough to be used in a color discrimination test, yet different enough to be distinguished by the observers. To select these pairs of color samples, we made a study of all the NCS samples using our measured reflectance curves. An algorithm was implemented to locate the closest color sample pairs using the CIE D65 as reference illuminant [21] and CIEDE2000 as the color-difference formula [22]. Many of these 50 pairs of samples presented differences in color that were the same or very similar in the same zones of color space, so that we needed an additional criterion to choose fewer samples trying to cover the color plane as evenly as possible. This new added criterion was to conduct a pilot trial in which we left the ultimate responsibility for the choice of the sample pairs to real observers. In this way, our aim was also to minimize the possible lack of uniformity of any color-difference formula or space.

The pilot study used these first 50 samples to apply the test to real observers in order to check whether or not it was easy to distinguish each of the pairs. It should be borne in mind that the development of the NCS color system was not based on differential thresholds of color between each pair of contiguous samples. For each item of the test (i.e., pair of color samples), the discrimination index (DI) was calculated. The DI of a test item indicates its ability to differentiate between high achieving pupils and low achieving pupils [23], providing in our case information on each item's capacity to distinguish between good and poor observers. To this end, it was necessary to determine the subgroup of best observers (the top-scoring third in the test) and the subgroup of poorest observers (the bottom-scoring third). The DI for an individual test item can be computed by subtracting the number of observers in the low group responding to the item correctly from the number in the high group responding to the item correctly. Dividing this figure by the number of observers in one group, one then obtains the DI. The value of a perfectly discriminating item is 1.0, but a value over 0.35 is acceptable as has been shown in the literature [23].

This pilot study was conducted in the VeriVide DCAC120 lighting cabin under a CIE D65 simulator whose SPD is shown in Fig. 1. The results were used to choose the 20 best sample pairs (those with the greatest values of DI) covering the whole color plane. The final 20 pairs chosen are listed in Table 1, together with the color differences of each pair calculated for each of the light sources used in the present work. The sample pairs which present the smaller color differences are those in which the two samples of the pair are equal, as can be seen in their identification in the table. Figure 2 is a chromaticity plot in the  $a^*b^*$  plane of the 20 color sample pairs under our CIE D65 simulator. This figure represents one element of each pair of samples by a cross and the other by a disc. The two symbols are connected by a line to better appreciate their color difference in the  $a^*b^*$  plane.

### B. Apparatus

For the visual experiment, a second viewing cabinet was constructed inside the lighting cabinet described above. This

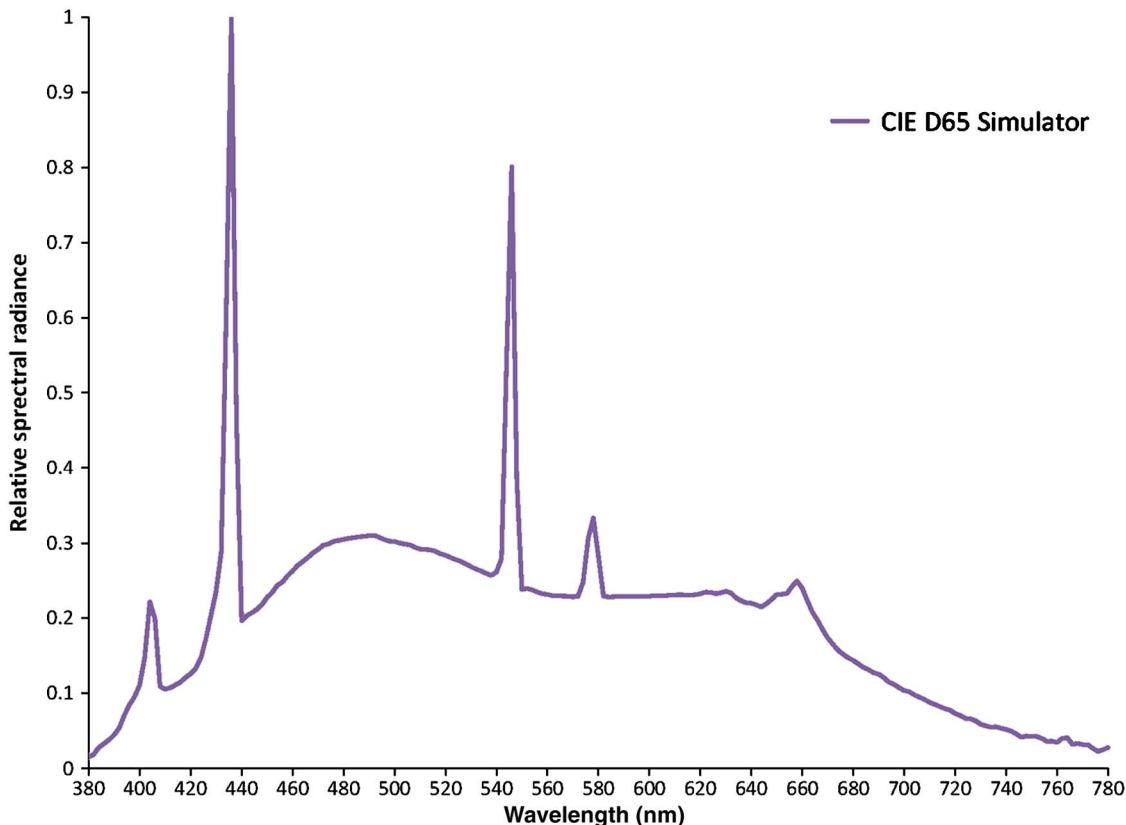


Fig. 1. (Color online) SPD of the CIE D65 simulator light source used in the present work.

secondary cabin was equipped with the following light sources: two RGBA LED lamps, model LUMIDRIVES Lumispot 32 K2 (Dialight Corp., Farmingdale, USA), each controlled by a COLORDRIVER XP driver with DMX protocol control (Dialight Corp., Farmingdale, USA); a custom-constructed LUMILEDS K2 WLED lamp; and two SOLUX D50 filter halogen lamps of the brand Tailored Lighting, Inc.

**C. Sample**

The subjects were chosen randomly from the staff members and students of the Science Faculty and from passers-by who were on the university campus. Initially, 36 people, 18 men and 18 women, were selected. They participated in the test with their vision compensated by glasses or contact lenses when necessary, and having previously passed the Ishihara

**Table 1. NCS Sample Pairs Conforming the Tests, Together with the Color Differences between the Samples of Each Pair Calculated for the Five RGBA Light Sources**

Item $n^\circ$	Sample	Sample'	$\Delta E_{00}^*$				6500
			2800	5000 Low	5000 Medium	5000 High	
1	2005-Y70R	2005-Y70R	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07
2	2570-Y30R	2570-Y30R	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
3	3030-R70B	3030-R70B	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
4	0603-R60B	0505-R60B	1.10	1.12	1.12	1.12	1.15
5	2005-Y90R	2005-Y80R	1.20	1.26	1.27	1.27	1.35
6	1005-R90B	1005-R90B	0.10	0.08	0.08	0.08	0.08
7	1005-R30B	1005-R40B	0.97	1.21	1.20	1.14	0.86
8	1005-Y40R	1005-Y40R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
9	1505-Y20R	1505-Y20R	0.18	0.18	0.17	0.18	0.17
10	0505-R90B	0505-R80B	1.95	1.90	1.91	1.95	2.24
11	2005-G60Y	2005-G60Y	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
12	2005-G40Y	2005-G30Y	0.77	0.63	0.63	0.63	0.59
13	0505-G20Y	0505-G30Y	2.30	1.86	1.83	1.82	1.58
14	1505-G90Y	1505-G90Y	0.29	0.28	0.28	0.29	0.29
15	1005-R80B	1005-R80B	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
16	0505-G10Y	0505-G10Y	0.16	0.17	0.17	0.17	0.17
17	2005-Y20R	2005-Y30R	1.96	1.88	1.88	1.89	1.90
18	0510-G90Y	0510-G80Y	1.85	1.68	1.66	1.64	1.47
19	5540-G60Y	5540-G60Y	0.57	0.57	0.56	0.56	0.55
20	1505-Y80R	1505-Y90R	1.02	1.04	1.04	1.05	1.07

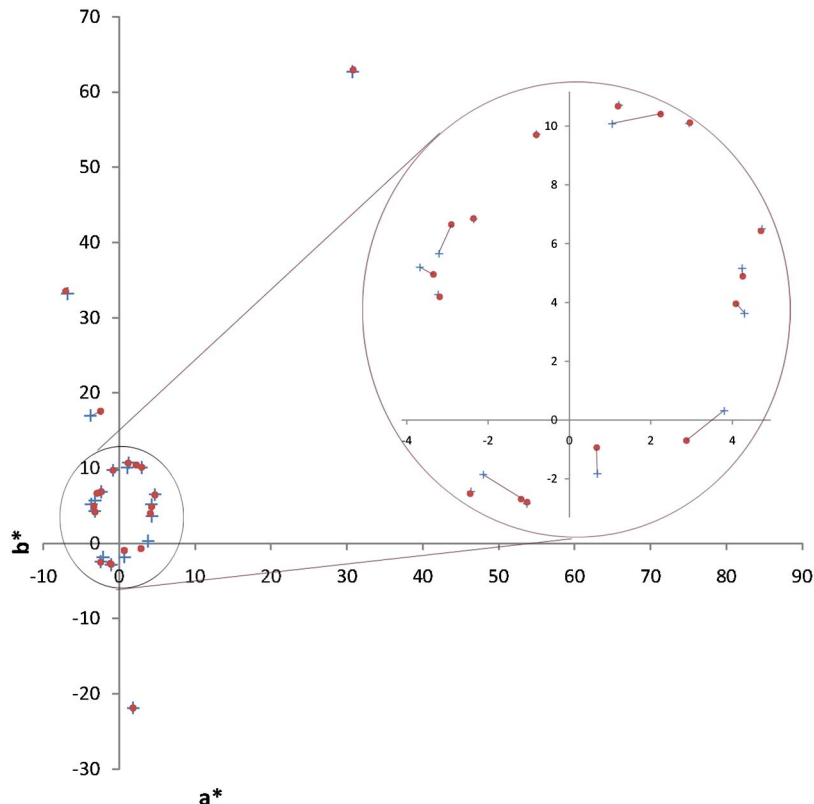


Fig. 2. (Color online) Chromaticity coordinates in the  $a^*b^*$  plane of the 20 sample pairs illuminated with the CIE D65 simulator. Corresponding elements of each pair of samples are represented by a cross and by a disc. The inset is an enlargement of the central zone of the plane that includes the greatest number of samples.

38 plates edition and Farnsworth D-15 color vision tests. The results of each observer were analyzed individually, excluding a person who answered in the same way for all pairs of samples and under all lighting configurations.

#### D. Color Discrimination Tests

The test was performed with 20 color sample pairs from the NCS Album presented to 36 observers in five consecutive sessions with a different light source in each. The order of variation of the light source and the presentation of the samples was randomized. Sessions were separated by an adaptation time of five minutes in the dark, and restarted under a new light source after an adaptation time of 1 min. The 20 sample pairs of  $2^\circ$  of field view each sample were presented to the observers side by side with a buffer zone between them of one centimeter on a neutral background of relative lightness of 20%. The task of observers was answer whether the color of each pair was the same or different.

The five light sources were physically the same two RGBA LED lamps configured in the following five different proportions: three of approximately equal  $172 \text{ cd/m}^2$  luminance but different CCTs, one low 2800 K, one medium 5000 K, and one medium-high 6500 K; and two of the same medium CCT of 5000 K but different luminances (approximately  $56 \text{ cd/m}^2$  and  $99 \text{ cd/m}^2$ ). The luminance of the different configurations was measured with a PhotoResearch PR-701 S telespectroradiometer over a Spectralon reflectance standard (LabSphere, North Sutton, USA) placed on the floor of the secondary viewing cabinet. The precise luminance and color temperature values of each configuration are listed in Table 2.

The aim of the test was to determine whether the different color temperatures and luminances influenced (in all cases within the photopic range) the observers' color discrimination capacity for a light source of the same spectral characteristics. The ideal situation would be to have light sources with the same relative SPD and different color temperatures. This is impossible, however, because a change in color temperature would necessarily imply a change in the SPD. For this reason, the light source chosen consisted of two RGBA LED lamps with the same spectral peaks in all cases, but in different proportions, allowing us to minimize spectral variations between the configurations [Figs. 3 and 4].

### 3. RESULTS

The results of the test are summarized in Table 2. It can be seen in this table that there were small differences in the mean percentages of correct answers given by the overall group of 36 observers and the subgroup of the 12 best observers for each of the five configurations of the light source. However, these differences in the mean percentages of correct responses among each of the five configurations of the light source were not statistically significant according to parametric (ANOVA) tests, and hence the null hypothesis that the CCT or the photopic luminance level do not influence color discrimination capacity cannot be rejected. The statistical analysis of this first test was performed without distinguishing between the two types of item conforming the test: those in which the two samples are equal and those in which they are different. From the standpoint of the objectives pursued in the

**Table 2. Luminance and Color Temperature Values of the Five Light Source Configurations Plus CIE D65 Simulator, and the Corresponding Percentages of Correct Responses Given by the Full Sample of Observers and by the Subgroup of Best Observers**

	Name	RGBA2800	RGBA5000Low	RGBA5000Medium	RGBA5000High	RGBA6500	CIE D65 Simulator
Light sources	CCT	2826.4	4907.2	4983.2	4931.4	6495.5	6553.3
	Luminance (cd/m <sup>2</sup> )	171.95	55.61	98.91	172.11	165.01	182.9
	CRI	53.22	71.55	71.24	68.97	58.97	95.62
	GAI	66.59	108.38	109.91	113.38	133.71	93.01
Entire sample	% correct responses	61.39	61.25	63.47	61.53	62.92	69.58
	$\sigma$	10.2	10.1	11.0	10.7	9.9	10.6
Best observers	% correct responses	66.15	67.69	71.54	69.62	70.38	77.31
	$\sigma$	6.1	6.0	6.5	6.3	5.9	6.3

present work, however, the two types of item are distinct. The color difference of each pair may vary with a change of light source if the samples have different spectral reflectances. The items of equal samples, however, have quasi-identical reflectance curves, so that they do not present this source of variability in the responses due to the change either of reflectance or of illuminant. Repeating the above statistical analysis but separating the pairs that are equal from those that are different, we found that in the former case nearly 90% of the observers identified them correctly for all five light-source configurations. This high level of correct responses is due to the small, if not null, color difference between each sample pair, which facilitates providing the correct response.

The case is not the same for the unequal sample pairs. The difference in the reflectance curves of each sample pair means that the color differences can vary with a change in light source. To minimize this effect, the sample pairs chosen were

of very similar spectral reflectances since they were all based on the samples of the NCS album prepared with a limited number of pigments. When, furthermore, one uses a light source such as that employed in this test whose spectrum consists of four peaks that are regulated with different intensities to achieve different color temperatures and luminances, one can minimize the effect of different light-source spectra. The analysis of the data for the pairs of different samples showed no significant differences for the case of three distinct values of the luminance, but appreciable and statistically significant (ANOVA  $P < 0.05$ ) differences for the case of different CCTs (Table 3).

#### 4. DISCUSSION

The results indicate the existence of a statistically significant difference in the color discrimination of unequal sample pairs

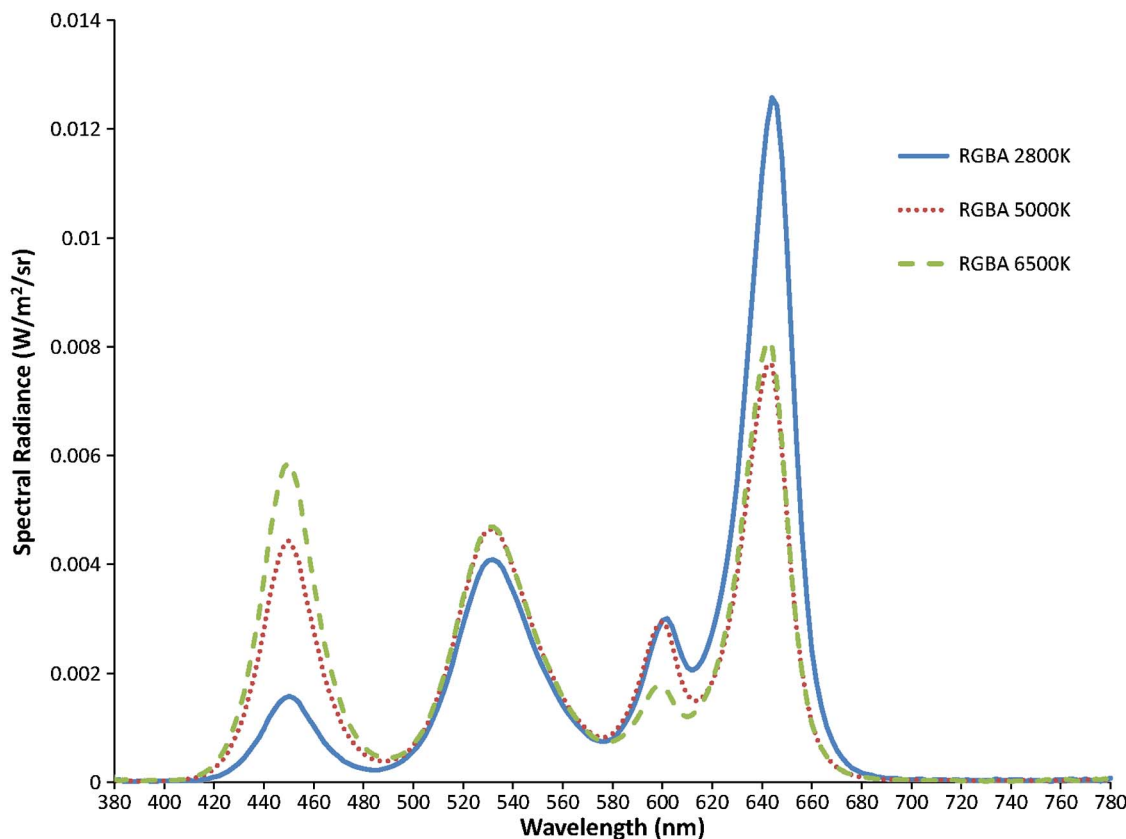


Fig. 3. (Color online) SPD of the three configurations of the RGBA LED light source used in the present work: 2800 K, 5000 K, 6500 K.

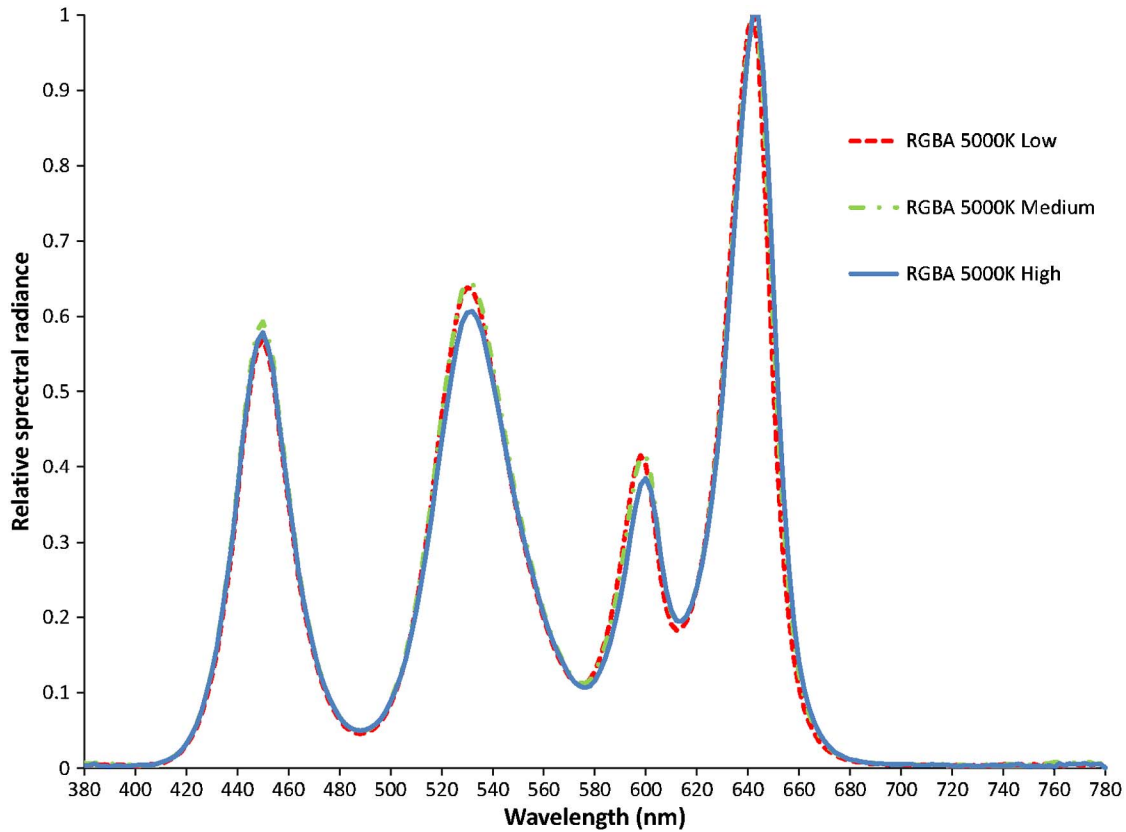


Fig. 4. (Color online) Relative SPD of the three configurations of the RGBA LED 5000 K light source used in the present work with different luminances: 55.61, 98.91, and 182.11  $\text{cd/m}^2$ .

**Table 3. Statistical Analysis of the Results Divided by Correlated Color Temperature and Luminance and Distinguishing between Equal and Different Sample Pairs**

Division Criteria: <i>CCT</i>	% Correct Responses Best Observers Group		Division Criteria: <i>Luminance</i>	% Correct Responses Best Observers Group	
	Matching pairs	Different pairs		Source	Matching pairs
Source			Source		
RGBA2800	90.1	61.1	RGBA5000 Low	90.1	71.3
RGBA5000 High	86.4	69.5	RGBA5000 Medium	90.1	70.4
RGBA6500	89.4	79.6	RGBA5000 High	86.4	68.5
ANOVA (P-value)	0.59	0.02*	ANOVA (P-value)	0.46	0.88

\*Statistically significant at a confidence level of 95%.

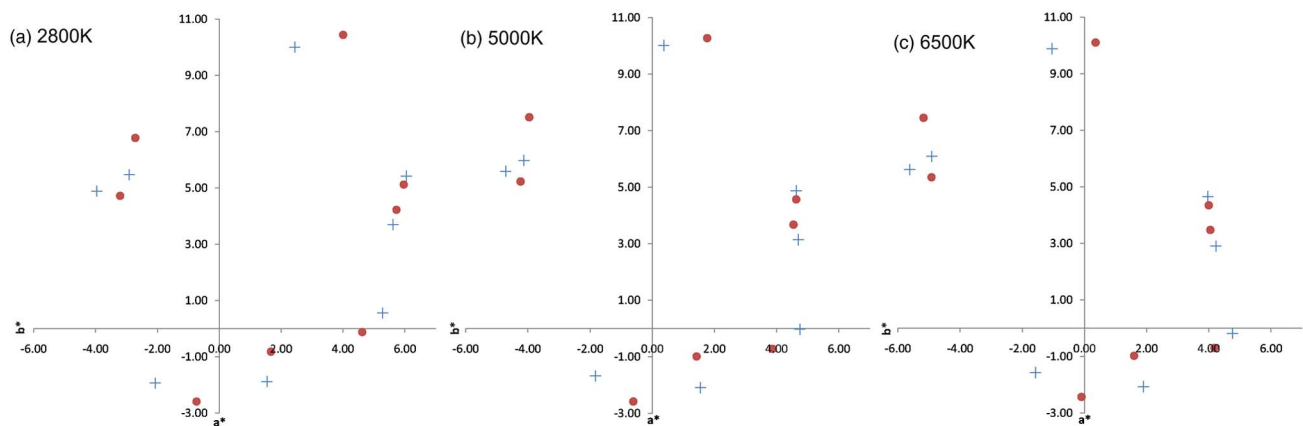


Fig. 5. (Color online) Evolution of the chromaticity coordinates of the unequal sample pairs in the  $a^*b^*$  plane with changes in the light source: (a) 2800 K; (b) 5000 K; (c) 6500 K. Corresponding elements of each pair of samples are represented by a cross and by a disc.

when using light sources of different color temperatures, with the discrimination capacity being greater the higher the light source's color temperature. To check whether this is only due to the color temperature of the sources and not to the different SPD's used, one needs to study the evolution of the color differences of each sample pair as the light source is changed. It must be borne in mind that the light source used (RGBA LED) is that which provides a SPD that changes least for the different color temperatures, the intention having been to minimize the effect of different SPDs in each configuration.

Considering the test items corresponding to the unequal sample pairs (items 4, 5, 7, 10, 12, 13, 17, 18, 20), one appreciates no systematic increase in color differences with increasing CCT of the light source (Table 1). Indeed, the evolution with the change of illuminant is different for each sample pair, with the mean color differences for each illuminant being  $\overline{\Delta E_{00}^{2800}} = 1.46$ ,  $\overline{\Delta E_{00}^{5000}} = 1.39$ , and  $\overline{\Delta E_{00}^{6500}} = 1.36$ . These values are very similar to each other, with the slight variation being in the opposite sense to what was to be expected in view of the experimental results.

If one analyzes the color differences in the  $a^*b^*$  plane and their evolution with changing color temperature of the light source [Fig. 3], one observes that the chromaticity of the samples changes when the illuminant is changed, but also that the differences between unequal sample pairs remain the same.

Given the above, there is not a clear explanation for the higher success rate on these samples as the CCT of the illuminant was raised other than the increase itself in the color temperature of the sources. The question that now arises is why increasing the color temperature facilitates greater discrimination on the part of the observers. An RGBA LED light source with a higher color temperature but the same total luminance will have a different distribution of intensities of the spectral peaks [Fig. 4]. This will affect the level of relative excitation of each type of cone. In particular, if the highest color temperature light source has a spectral peak in the zone of more intense blues than the lower temperature sources, the absolute level of excitation of the  $S$  cones will be greater under that source. So the question is: Does a greater level of excitation of  $S$  cones facilitate a greater color discrimination capacity? There are various studies in the literature that relate different levels of excitation of  $S$  cones with variations in the color discrimination thresholds of different neural mechanisms [24–28]. Clearly, however, we are very far from being able to state categorically that a higher color temperature favors color discrimination given the limited range of color temperatures used in the present work.

## ACKNOWLEDGMENTS

Thanks are due to the Optics Department of the University of Granada, and in particular to professor E. Hita for his constant support. This work was supported by the grant GRU10102 of the Regional Government of the Junta de Extremadura and partially financed by the European Regional Development Fund.

## REFERENCES

1. C. van Trigt, "Color rendering, a reassessment," *Color Res. Appl.* **24**, 197–206 (1999).
2. W. Davis and Y. Ohno, "Toward an improved color rendering metric," *Proc. SPIE* **5941**, 59411G1 (2005).
3. CIE, "Colour rendering of white light sources," CIE 177:2007 (CIE, 2007).
4. E. M. Cordero, P. J. Pardo, A. L. Pérez, and M. I. Suero, "Correlation of various light source quality indices with the colour discrimination capacity," *Color Technol.* **127**, 136–144 (2011).
5. W. A. Thornton, "Color-discrimination index," *J. Opt. Soc. Am.* **62**, 191–194 (1972).
6. M. S. Rea and J. P. Freyssonier-Nova, "Color rendering: A tale of two metrics," *Color Res. Appl.* **33**, 192–202 (2008).
7. H. J. A. Dartnall, J. K. Bowmaker, and J. D. Mollon, "Human visual pigments: microspectrophotometric results from the eyes of seven persons," *Proc. R. Soc. Lond. B* **220**, 115–130 (1983).
8. A. Stockman and L. T. Sharpe, "Spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype," *Vision Res.* **40**, 1711–1737 (2000).
9. A. Stockman, L. T. Sharpe, and C. C. Fach, "The spectral sensitivity of the human short-wavelength cones," *Vision Res.* **39**, 2901–2927 (1999).
10. M. A. Webster, E. Miyahara, G. Malkoc, and V. E. Raker, "Variations in normal color vision. II. Unique hues," *J. Opt. Soc. Am. A* **17**, 1545–1555 (2000).
11. R. A. Bone, J. T. Landrum, and A. Cains, "Optical density spectra of the macular pigment in vivo and in vitro," *Vision Res.* **32**, 105–110 (1992).
12. D. L. MacAdam, "Rautian on color discrimination," *J. Opt. Soc. Am.* **45**, 1065–1070 (1955).
13. R. L. De Valois, I. Abramov, and W. R. Mead, "Single cell analysis of wavelength discrimination at the lateral geniculate nucleus in the macaque," *J. Neurophysiol.* **30**, 415–33 (1967).
14. E. Mahler, J. J. Ezrati, and F. Vienot, "Testing LED lighting for colour discrimination and colour rendering," *Color Res. Appl.* **34**, 8–17 (2009).
15. F. Vienot, E. Mahler, L. Serreault, M. Harrar, J. J. Ezrati, P. Pérignon, and A. Bricoune, "Discriminating colours under LED illumination," in *Proceedings of AIC Colour* (AIC, 2005), pp. 33–36.
16. R. G. Davis and D. N. Ginthner, "Correlated color temperature, illuminance level, and the Kruithof curve," *J. Illum. Eng. Soc.* **19**, 27–38 (1990).
17. N. Oi and H. Takahashi, "Preferred combinations between illuminance and color temperature in several settings for daily living activities," in *Proceedings of the 26th Session of the CIE* (CIE, 2007), pp. D3–178.
18. P. D. Pinto, J. M. M. Linhares, and S. M. C. Nascimento, "Correlated color temperature preferred by observers for illumination of artistic paintings," *J. Opt. Soc. Am. A* **25**, 623–630 (2008).
19. P. D. Pinto, P. E. R. Felgueiras, J. M. M. Linhares, and S. M. C. Nascimento, "Chromatic effects of metamers of D65 on art paintings," *Ophthalmic Physiol. Opt.* **30**, 632–637 (2010).
20. J. M. M. Linhares, P. E. R. Felgueiras, P. D. Pinto, and S. M. C. Nascimento, "Colour rendering of indoor lighting with CIE illuminants and white LEDs for normal and colour deficient observers," *Ophthalm. Physiol. Opt.* **30**, 618–625 (2010).
21. CIE, "Colorimetry," 3rd ed., CIE 15:2004 (CIE, 2004).
22. M. R. Luo, G. Cui, and B. Rigg, "The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000," *Color Res. Appl.* **26**, 340–350 (2001).
23. R. R. Deblasse, *Measuring and Evaluating Pupil Progress* (MSS Information Corp., 1974).
24. Y. Le Grand, "Les seuils différentiels de couleurs dans la théorie de Young," *Rev. Opt. Theor. Instrum.* **28**, 261–278 (1949).
25. R. M. Boynton and N. Kambe, "Chromatic difference steps of moderate size measured along theoretically critical axes," *Color Res. Appl.* **5**, 13–23 (1980).
26. H. Yaguchi, N. Watanabe, and S. Shioiri, "Effects of S-cone excitation on color discrimination threshold," presented at Interim Meeting of the International Color Association AIC: Color and Paints, Porto-Alegre, Brasil (2004).
27. J. Krauskopf and K. R. Gegenfurtner, "Color discrimination and adaptation," *Vision Res.* **32**, 2165–2175 (1992).
28. J. D. Mollon and M. V. Danilova, "Conditions under which an increase in S-cones excitation enhances discrimination on the  $L/M$  axis," *Proceedings of the International Colour Vision Society*, ICVS, 2011.





IX  
CONGRESO NACIONAL  
DEL COLOR  
ALICANTE 2010

ALICANTE, 29 Y 30 DE JUNIO,  
1 Y 2 DE JULIO DE 2010  
UNIVERSIDAD DE ALICANTE



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante



**SEDOPTICA**  
SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ÓPTICA  
COMITÉ ESPAÑOL DE COLOR

PUBLICACIONES  
UNIVERSIDAD DE ALICANTE

Este libro ha sido debidamente examinado y valorado por evaluadores ajenos a la Universidad de Alicante,  
con el fin de garantizar la calidad científica del mismo.

Publicaciones de la Universidad de Alicante  
Campus de San Vicente s/n  
03690 San Vicente del Raspeig  
Publicaciones@ua.es  
<http://publicaciones.ua.es>  
Teléfono: 965903480  
Fax: 965909445

© Varios autores, 2010  
© de la presente edición: Universidad de Alicante

ISBN: 978-84-9717-144-1

Diseño de portada: candelaInk

Reservados todos los derechos. Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra sólo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, [www.cedro.org](http://www.cedro.org)) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

## ÍNDICE

### CONFERENCIAS INVITADAS

Dynamic colour of chromogenic materials, <i>Marta Klanjšek Gunde</i> .....	2
Historia de los sistemas de ordenamiento del color desarrollados en relación con la arquitectura, <i>José Luís Caivano</i> .....	6
Red wine color - relating color to composition in young wines and predicting the color of aged wines, <i>Roger Boulton</i> .....	12
Status quo and future of anti-counterfeit technologies - the role of colour, <i>Long Lin</i> .....	16

### CIENCIA DEL COLOR

"Utilización de LEDs en sistemas multiespectrales: Influencia del ángulo y del tiempo en la emisión espectral", <i>Óscar Martínez, Meritxell Vilaseca, Carles Pizarro, Montserrat Arjona, Jaume Pujol</i> .....	18
"Monitorización del color: aplicación a problemas medioambientales", <i>Beatriz Prieto, Noelia Aira, Patricia Sanmartín, Cristina Silva, Benita Silva</i> .....	22
"Resultados previos de la función de distribución de dispersión bidireccional de un patrón colorimétrico", <i>A. M. Rabal, A. Ferrero, J. L. Fontecha, A. Pons, J. Campos, A. Corróns</i> .....	26
"Evaluación colorimétrica de colores goniocromáticos a partir de los colores óptimos", <i>Esther Perales, Elisabet Chorro, Werner Rudolf Cramer, Francisco Miguel Martínez-Verdú</i> .....	30
"How the spectral structure of the light source determines colour rendering", <i>Sérgio Miguel Cardoso Nascimento, Paulo Eduardo Reis Felgueiras, João Manuel Maciel Linhares</i> .....	34
"Optimización de fuentes de luz para la iluminación del patrimonio artístico. Aplicación a las pinturas rupestres de la cueva de "El Castillo", <i>Jesús Zoido, Daniel Vázquez, Antonio Álvarez, Juan Antonio Herraiz, Marian del Egido, Roberto Ontañón</i> .....	38
"Obtención de espectros metámeros que se cortan en longitudes de onda elegidas arbitrariamente", <i>J. Federico Echávarri, A. Ignacio Negueruela, Fernando Ayala</i> .....	42
"Obtención de espectros metámeros con varios iluminantes para una muestra dada", <i>Fernando Ayala, J. Federico Echávarri, A. Ignacio Negueruela</i> .....	46
"Construcción de una cabina de luz para la evaluación crítica del color", <i>Aarón A Muñoz, Lisbeth Giesurin y Maria F Martinez</i> .....	50
"Alteraciones cromáticas en diversos tipos de guías de luz", <i>Berta García-Fernandez, Daniel Vazquez-Moliní, Antonio Alvarez Fernandez-Balbuena, Jesús Zoido</i> .....	54
"Estudio de la variabilidad de color de muestras cromáticas del atlas NCS ante cambios de iluminante", <i>E. Cordero, M.I. Suero, P.J. Pardo, A.L. Pérez</i> .....	58
"Representación formal para la interpretación preliminar de medidas pentadimensionales de BSDF", <i>Alejandro Ferrero, Ana M. Rabal, José Luis Fontecha, Alicia Pons, Joaquín Campos y Antonio Corróns</i> .....	61
"Determinación del color del suelo mediante un sistema de aprendizaje automático", <i>Ángel Marqués, Sara Ibáñez, Héctor Moreno, Juan M. Gisbert</i> .....	65

## ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DE COLOR DE MUESTRAS CROMÁTICAS DEL ATLAS NCS ANTE CAMBIOS DE ILUMINANTE

E. Cordero<sup>1</sup>, M.I. Suero<sup>2</sup>, P.J. Pardo<sup>3</sup>, A.L. Pérez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Ing. Eléctrica, Electrónica y Automática, Universidad de Extremadura, Badajoz.

<sup>2</sup> Dpto. de Física, Universidad de Extremadura, Badajoz.

<sup>3</sup> Dpto. de Ing. de Sistemas Informáticos y Telemáticos, Universidad de Extremadura, Mérida  
grupoorion.unex.es, educorde@unex.es

### Resumen:

El álbum NCS 1950 es uno de los atlas cromáticos de mayor difusión en el mundo. Dejando a un lado las características propias de este álbum, sus muestras son utilizadas habitualmente en experiencias de laboratorio relacionadas con la investigación en visión del color. Para conocer la fortaleza de dichas muestras ante cambios de iluminante se presentan los resultados experimentales obtenidos primero, al medir las curvas de reflectancia de todas las muestras y segundo, al calcular qué muestras presentan una mayor variabilidad en coordenadas de color ante cambios de iluminante y qué muestras la menor variabilidad.

**Palabras clave:** Espacios de ordenación, Apariencia del color, diferencias de color.

### INTRODUCCIÓN

El estudio de la percepción del color en el ser humano presenta dos paradigmas diferenciados claramente: el estudio de la percepción de luces en un entorno de oscuridad, (colores luz) y el estudio de la percepción del color sobre muestras sólidas iluminadas por reflexión en una cabina de iluminación (color objeto o color materia). Para este segundo caso se hace imprescindible contar con un conjunto de muestras cromáticas de calidad para poder desarrollar con garantía las pruebas experimentales. El álbum *Natural Color System* (NCS) 1950 pretende ser una referencia internacional en cuanto a sistemas de ordenación de color junto con el *Munsell Book of Color*, cada uno con sus características propias diferenciadoras.

Este es el caso de los trabajos desarrollados en el laboratorio de investigación del grupo de autores relacionados con las características cromáticas de distintos tipos de luminarias LED. Para desarrollar estos trabajos de investigación, empleando estas muestras, se hace necesario conocer qué muestras NCS son más sensibles a cambio de iluminante y cuales menos. El trabajo que se presenta trata de resolver esta incógnita.

### MATERIALES Y MÉTODOS

Se han medido experimentalmente las curvas de reflectancia de las 1950 muestras del álbum NCS 1950 empleando para ello como instrumento de medida un espectrorradiómetro Photo Research PR-701S con una resolución espectral de 2 nm y como fuente luminosa una lámpara SOLUX Daylight Simulator de 5000K con una geometría de medida 0°/45°. También se han medido los espectros de las fuentes luminosas con las que está equipada la cabina de iluminación Verivide DCAC120 (D65, D50, F11, A) y los espectros de dos luminarias LED, una de ellas RGBA y otra Blanca de bombeo en el azul.

Empleando el programa de cálculo matemático MATLAB se ha implementado un algoritmo que calcula las variaciones de color en el espacio de apariencia de color CIECAM02 de las 1950 muestras NCS para todas las fuentes luminosas, comparando de dos en dos las fuentes, y haciendo el promedio de las diferencias para cada muestra.

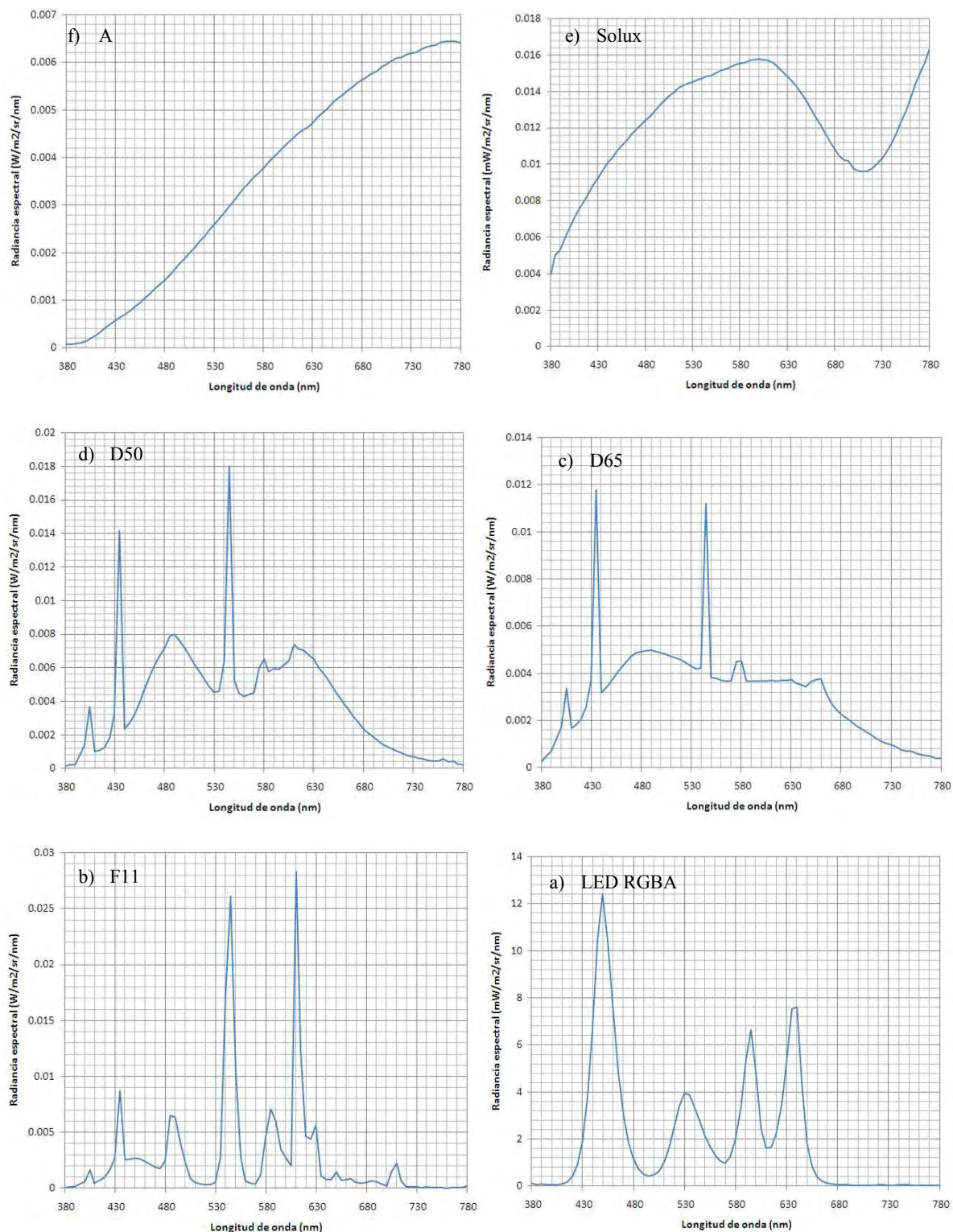


Figura 1. Curvas de distribución espectral de potencia varios de las fuentes luminosas empleadas en el cálculo.

Como fórmula de diferencia de color se ha empleado para CIECAM02 la fórmula propuesta por Luo et al. [1]. Este punto es muy delicado ya que la variedad de fórmulas y de versiones de fórmula de diferencias de color es amplia pero parece que ésta puede ser una buena candidata [2].

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos aparecen en la tabla 1. En ella se puede apreciar cómo las muestras que aparentemente son más estables ante cambios de iluminante son las que presentan un valor de claridad (*whiteness* en la notación original NCS) más bajo. La diferencia en estabilidad de las diez mejores respecto a las diez peores es del doble.

**Tabla 1.** Muestras NCS seleccionadas como las más estables (tres primeras columnas) y las menos estables (tres últimas columnas) según la fórmula CIECAM02-UCS ante el cambio de iluminante

Nº Orden	Nombre NCS	Diferencia CIECAM02UCS	Nº Orden	Nombre NCS	Diferencia CIECAM02UCS
19	S 9000-N	17.91	79	S 0580-Y	42.01
539	S 8505-R80B	19.43	707	S 0575-G90Y	41.39
559	S 8505-B20G	19.43	1949	S 0575-G70Y	41.22
1572	S 8502-G	19.77	1899	S 0575-G60Y	41.05
18	S 8500-N	19.80	134	S 0580-Y10R	40.94
1102	S 8502-R	19.85	651	S 0570-G80Y	40.92
496	S 8505-Y80R	19.90	1946	S 0570-G70Y	40.87
1358	S 8502-B	19.94	704	S 0570-G90Y	40.66
573	S 8505-B80G	20.03	80	S 1080-Y	40.61
516	S 8505-R20B	20.03	1950	S 1075-G70Y	40.46

## CONCLUSIONES

Los resultados muestran una diferencia en estabilidad ante cambios de iluminante atendiendo a un criterio de claridad de la muestras, permaneciendo prácticamente invariantes ante cambios de cromaticidad. Esto indicaría la bondad de elección de los pigmentos para la fabricación de las muestras del álbum NCS. Todo esto si el comportamiento de la fórmula de diferencia de color empleada para el espacio de apariencia CIECAM02 es uniforme. Este punto podría ser verificado experimentalmente con observadores reales.

## AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Ciencia e Innovación por su ayuda FIS2006-06110. A la Junta de Extremadura por su ayuda GRU09018 financiada parcialmente por fondos FEDER de la Unión Europea.

## REFERENCIAS

- [1] M.R. Luo, G.Cui, C. Li, Uniform colour spaces based on CIECAM02 colour appearance model, *Color Res. App* 31(4), 320-330, 2006.
- [2] J. Schanda (Ed.), *Colorimetry: Understanding the CIE system*, (Wiley, NJ, 2007).

---

# ICVS 2011

JULY 1-5, 2011

BUSKERUD UNIVERSITY COLLEGE  
KONGSBERG, NORWAY



---

THE 21ST SYMPOSIUM OF THE  
INTERNATIONAL COLOUR VISION SOCIETY

ABSTRACT BOOK

JULY 1-5, 2011  
KONGSBERG, NORWAY

---



---

Rapporter i Høgskolen i Buskerud Nr. 85  
The 21st Symposium of the International Colour Vision Society  
Abstract Book  
Editor: Rigmor C. Baraas

ISBN 978-82-8261-009-4  
ISSN 0807-4488

Typesetting: Stuart J. Gilson

Høgskolen in Buskerud's publications may be freely copied and passed on to other interested parties without charge. A prerequisite is that the names of the publisher and the author(s) are indicated and specified correctly. The document may not be altered in any way.

Cover images:

Norwegian Mining Museum, Kongsberg (front cover, © Christian Berg/Norsk Bergverksmuseum).  
Native wire silver from Kongsberg (back cover, © T. Ås Haug/Norsk Bergverksmuseum).

Buskerud University College  
Department of Optometry and Visual Science  
Frogs vei 41  
3611 Kongsberg  
Norway  
e-mail: [rigmor.baraas@hibu.no](mailto:rigmor.baraas@hibu.no)  
<http://cvri.hibu.no>

<b><i>Chromatic and achromatic VEP responses in pre-school children</i></b>	82
M. Tekavcic, B. Stirn Kranjc, J. Brecelj	
<b><i>Hue-selective mechanisms in human visual cortex</i></b>	83
I. Kuriki	
<b><i>Domain of metamers exciting melanopsin</i></b>	84
F. Viénot, T. Dang, J. Le Rohellec, F. Robert-Inacio, M. Perrin, S. Favier, H. Brettel	
<b><i>Pseudo-isochromatic plates for measuring the ability to discriminate colours</i></b>	85
K. Wenzel, K. Ladunga, K. Samu, I. Langer, F. Szoke	
<b><i>Sex colored the world of ancient insects: What the spectral sensitivities of damselfly photoreceptors tell us!</i></b>	86
M. J. Henze, A. Kelber	
<b><i>Investigating colour vision in a marine mammal, the harbour seal – a cognitive approach</i></b>	87
C. Scholtyssek, A. Kelber, G. Dehnhardt	
<b><i>Weighing quality attributes</i></b>	88
K. Falkenstern, N. Bonnier, H. Brettel, M. Pedersen, F. Viénot	
<b><i>Relative frequency of metamerism correlates negatively with entropy of colours in natural scenes</i></b>	89
G. Feng, D. H. Foster	
<b><i>Influence of correlated color temperature of a light source on colour discrimination capability of observers</i></b>	90
P. J. Pardo, E. M. Cordero, M. I. Suero, A. L. Pérez	
<b><i>Foveal colour discrimination is enhanced in the vicinity of the caerulean line</i></b>	91
M. V. Danilova, J. D. Mollon	
<b><i>Colour in cartography for colour-blindness people</i></b>	92
D. Francis	
<b><i>Hypoxia, color vision deficiencies and saturated blood oxygen</i></b>	93
J. Hovis, N. Milburn, T. Nesthus	
<b><i>Scaling suprathreshold stimulus in chromatic threshold units: is it an appropriate metric?</i></b>	94
E. M. Colombo, B. M. O'Donell	
<b><i>Is there rod intrusion in male marmosets?</i></b>	95
D. Pessoa, F. Freitag	
<b><i>Brightness contrast and brightness assimilation in photopic and mesopic adaptations</i></b>	96
P. A. Barrionuevo, E. M. Colombo, L. Issolio	
<b><i>The role of specular reflections present in labial teeth and gingiva images as visual cue for texture and sharpness perception</i></b>	97
T. Eckhard, E. M. Valero, J. L. Nieves	
<b><i>Chromatic opponency as an unsharpening mechanism</i></b>	98
L. Wilkins	
<b><i>Psychophysical and physiological responses to gratings with luminance and chromatic components of different spatial frequencies</i></b>	99
B. Cooper, H. Sun, B. B. Lee	

Abstract N°: 9

Saturday and Monday: 15:00 – 17:00

## Influence of correlated color temperature of a light source on colour discrimination capability of observers

Pedro J. Pardo,<sup>1\*</sup> Eduardo M. Cordero,<sup>2</sup> María Isabel Suero,<sup>3</sup> Angel Luis Pérez<sup>3</sup>

1 Department of Computer and Network Systems Engineering, University of Extremadura, Centro Universitario de Mérida, C/ Santa Teresa de Jornet, 38, Mérida, E06800, Spain

2 Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Extremadura, Badajoz, Spain

3 Department of Physics, University of Extremadura, Badajoz, Spain

\* corresponding author: [pjpardo@unex.es](mailto:pjpardo@unex.es)

Experimental evidence indicates a preference in correlated colour temperature of light sources for daily living activities (Oi et al. Proc. 26th session of CIE, 2, 2007) or viewing artistic paintings (Pinto et al., J. Opt. Soc. Am. A, 25, 2008). There are also data relating the capability of observers to make judgments on colour difference with the spectral power distribution of light source used (Viénot et al., Proc. AIC colour'05, 2005). The present work describes a visual colour discrimination experiment whose results corroborate the existence of a relation between the correlated colour temperature of a light source and the colour discrimination capabilities of the observers. The visual experiment consisted of a test of colour discrimination in which the observer must indicate whether each of the 20 pairs of chromatic samples is perceived to be different in a pair or not. There are two types of items; those of equal samples that have identical reflectance curves, so that they do not present this source of variability in the responses due to the change either of reflectance or of illuminant, and those of different reflectance curves, in which the colour differences can vary with a change in light source. To minimize this effect, the sample pairs chosen were of very similar spectral reflectance since they were all based on the samples of the NCS album prepared with a limited number of pigments. When, furthermore, one uses a RGBA LED-light source whose spectrum consists of four peaks that are regulated with different intensities to achieve different colour temperatures and luminances, one can minimize the effect of different light source spectra. The analysis of the data for the pairs of different samples showed no significant differences for the case of three distinct values of the luminance, but appreciable and statistically significant (ANOVA  $p < 0.05$ ) differences for the case of different correlated colour temperatures.

**Acknowledgements:** This work was supported by grant number PDT09A045 from the Regional Government of the Junta de Extremadura and partially financed by the European Regional Development Fund



# X RNO

X Reunión Nacional de Óptica  
Zaragoza, 4 - 7 de septiembre 2012



**Universidad**  
Zaragoza

# Índice

· Comités .....	07
1 -Physiological Optics of Accommodation .....	08
2 -Espectrómetro de transformada de Fourier implementado mediante guías de onda en espiral con base de silicio .....	09
3 -Medida de probabilidades de transición del Argon ionizado en la región del ultravioleta .....	13
4 -Pulsos ultracortos focalizados con elementos difractivos: caracterización y aplicaciones a la óptica no lineal .....	17
5 -Temporal structure of ultra high-order harmonic generation in the keV regime driven by mid-infrared lasers .....	21
6 -Caracterización dinámica de upconversión en fibras de cristal fotónico con alta concentración de Erblio .....	25
7 -Propiedades de guiado de una fibra de cuasicristal fotónico .....	29
8 -Diseño y realización de un nuevo sistema de caracterización de lentes intraoculares multifocales .....	33
9 -El origen histológico de las aberraciones del cristalino .....	36
10 -Implementation of an Image Based Focusing Algorithm for Retinal Imaging .....	40
11 -Microscopía confocal de barrido con muestreo espacial en el plano del detector .....	44
12 -Control de pulsos láser ultracortos mediante Óptica Difractiva .....	48
13 -Efecto Lau con un biprisma de Fresnel .....	52
14 -Captura de la información espacio-angular de escenas 3D .....	56
15 -Caracterización experimental de lentes difractivas aperiódicas con un modulador espacial de luz .....	60
16 -Mejora del nivel de seguridad y de la calidad de la imagen descriptada en un sistema de encriptación basado en un correlador de transformadas conjuntas .....	62
17 -Optical 3D-Sensors: Limits, Potentials, Applications .....	66
18 -Microscopía holográfica digital aplicada a medidas de formas .....	68
19 -Microtopographic inspection by optical triangulation .....	72
20 -Perfilometría de superficies ópticas por absorción en líquidos (OPAL) .....	76
21 -Multiplexing structured illumination in Spatial Light Modulators to achieve superresolution .....	79
22 -Análisis y cuantificación de imágenes 3D de OCT del segmento anterior del ojo: Técnicas y aplicaciones .....	83
23 -Forma y propiedades ópticas de la córnea humana en función de la edad .....	87
24 -Propiedades biomecánicas de la cornea determinadas por extensimetría bidimensional a partir de trazado de rayos .....	91
25 -Medida de la deformación producida por un pulso de aire en corneas normales y en corneas tratadas con cross-linking mediante imagen OCT .....	95
26 -Fotomultiplicador de Silicio para Aplicaciones de Lidar Atmosférico .....	99
27 -Simulación de la absorción en fotodiodos de InGaAs .....	103
28 -Sorteando la difracción en nanoestructuras no autocolimantes .....	107
29 -Diseño de un dispositivo H-PDLC y evaluación de sus características electro-ópticas dinámicas .....	111
30 -Caracterización espaciotemporal de pulsos láser ultracortos .....	117
31 -Holografía digital endoscópica para el estudio combinado de flujos y deformaciones de conductos opacos .....	121
32 -Interferometría Autorrealimentada para la Medición de Deformación en Materiales Estructurales Sometidos a Cargas Dinámicas .....	125
33 -Metodología de termografía infrarroja para la caracterización térmica de materiales aislantes mediante la adaptación del método flash clásico .....	129

34 -Relación señal-ruido y estadística de aberraciones oculares: ¿cuántos modos debemos estimar? .....	133
35 -Evaluación de las curvaturas locales de un frente de onda mediante interferometría de difracción por múltiples puntos .....	137
36 -Evaluación de diferentes algoritmos de ablación multifocales diseñados para corregir presbicia mediante cirugía refractiva .....	141
37 -Calidad óptica ocular en pacientes con alteraciones oculares o sometidos a cirugía refractiva .....	145
38 -Demultiplexado y multiplexado mediante refracción cónica para comunicaciones ópticas en espacio libre .....	149
39 -Ingeniería de modos en fibras ópticas mediante redes de Bragg y de periodo largo: fabricación de un filtro multicanal en transmisión .....	153
40 -Sensor Distribuido de Temperatura de 100 km con Resolución Sub-Métrica Basado en Tecnología de Fibra .....	157
41 -Últimos desarrollos en sensores plasmónicos .....	161
42 -Fibras de cristal fotónico no lineales dopadas con Er: generación de supercontinuo y de pares de fotones .....	165
43 -Ensemble based Quantum Memories for Light .....	169
44 -El Museo de Óptica de la Universidad Complutense como herramienta para la docencia y la investigación .....	172
45 -Práctica de laboratorio sobre láseres de neodimio pulsados mediante Q-switching .....	176
46 -La Tienda de las Curiosidades sobre el Color .....	180
47 -Desarrollo de herramientas interactivas adaptadas a la resolución gráfica de problemas de Óptica .....	184
48 -SO/PHI: Un espectro-polarímetro para la misión espacial Solar Orbiter de la ESA .....	188
49 -Óptica de rayos X en las líneas de luz del sincrotrón ALBA .....	191
50 -Diseño de una cámara holográfica y de una cámara polarimétrica con un detector sin resolución espacial .....	195
51 -Implementación de un interferómetro de difracción puntual con un monopíxel de cristal líquido .....	199
52 -Calibración de medidores de longitud de onda usando peines de frecuencias filtrados por amplificación Brillouin .....	203
53 -Demostración experimental del guiado en el rango espectral de las comunicaciones ópticas de Cristales Fotónicos suspendidos con red honeycomb .....	207
54 -Diseño y caracterización óptica de guías de onda basadas en puntos cuánticos de GaN/AlN para conmutación óptica ultrarrápida a 1.5 $\mu\text{m}$ .....	211
55 -Estructuras disipativas en cavidades optomecánicas .....	215
56 -Plasmónica de metales en el UV: Indio, Titanio, Cromo, Rodio, Rutenio y Wolframio .....	219
57 -Modelado de materiales heterogéneos nanoestructurados .....	222
58 -Contribuciones incoherentes a la despolarización en sistemas de nanopartículas .....	225
59 -Nanoestructuras plasmónicas producidas mediante depósito por laser pulsado .....	229
60 -Estructura y propiedades ópticas de vidrios de fluoroteluritos dopados con Er para aplicaciones fotónicas .....	233
61 -Intrusión de bastones en los fenómenos de adaptación temprana para distintas excentricidades y luminancias .....	237
62 -Medida de la agudeza estereoscópica mediante el sistema binocular de óptica adaptativa en la corrección de la presbicia .....	241
63 -Refracción ocular: un estudio comparativo entre autorrefractómetro, aberrómetro y test subjetivo .....	245
64 -Medida de la respuesta acomodativa con un sistema de doble paso .....	249
65 -Técnicas de estimación espectral aplicadas a las respuestas de sensores TFD .....	253
66 -Respuestas Emocionales al Color del Aceite de Oliva Virgen .....	257

67 -Sistema multispectral basado en LEDs en los rangos ultravioleta, visible e infrarrojo. Aplicación al estudio y conservación de obras de arte .....	261
68 -Influencia de la posición del centro de rotación del ojo en el diseño de lentes esféricas para dirección oblicua de mirada .....	265
69 -¿Es necesario incluir correcciones relativistas para describir el pasaje adiabático de ondas de materia? .....	269
70 -Manipulación individual de átomos neutros en redes ópticas mediante pasaje adiabático .....	273
71 -Memorias cuánticas para fotones individuales en medios de tres niveles .....	277
72 -Polarización, coherencia y resolución Alfredo Luis Aina Un interferómetro de Michelson con solitones atómicos .....	281
73 -Un interferómetro de Michelson con solitones atómicos .....	285
74 -Fluorescencia intensificada por nanopartículas de plata (SEF) del fármaco antitumoral emodina en una matriz de silicio poroso .....	289
75 -Optical studies of functional dynamics of the sensor proteins CooA and DNR .....	293
76 -Biosensor basado en resonancias plasmónicas localizadas para la detección precoz del cáncer .....	297
77 -De un nuevo método para la medida de fuerzas con pinzas ópticas a la creación de la spin-off "Impetux" .....	301
78 -Fuerzas ópticas, el salto al interior celular .....	305
79 -Mejora por óptica adaptativa de la localización 3D en técnicas de microscopía PALM, STORM y de seguimiento de partícula individual .....	309
80 -Microscopía multifotónica: análisis de la influencia de las aberraciones y la polarización .....	313
81 -Generación de arrays de haces Bessel con redes Damman .....	317
82 -Resolución 3D en imagen integral de campo lejano .....	321
83 -Numerical implementation of generalized Coddington equations for ophthalmic lens design .....	325
84 -Estrategias de obtención de condiciones iniciales de diseño para luminarias reflectoras freeform .....	329
85 -Simulación e implementación de un polarímetro de Stokes basado en una lámina de cristal líquido Twisted Nematic .....	333
86 -Tailoring attosecond pulses with quantum path interferences .....	337
87 -Dinámica de singularidades de fase generadas por ruptura de la simetría rotacional de un vórtice óptico .....	340
88 -Oscilador láser de titanio:zafiro de 2 ciclos ópticos .....	343
89 -Medidas de la respuesta no lineal de materiales de nueva síntesis con Z-scan mediante el uso de láseres de alta tasa de repetición .....	347
90 -Spatial and temporal nonlinear photonics in dielectric and plasmonic systems .....	351
91 -Generation, measurement and compression of few-cycle laser pulses .....	355
92 -¿Es necesario el análisis de ambos ojos en un estudio de la visión del color en diabéticos? .....	356
93 -Análisis comparativo de medidas de anisotropía de scattering en tejidos y biomateriales dentales .....	360
94 -Análisis de un sistema de doble elemento óptico difractivo parcialmente binario .....	365
95 -Aplicación de la Interferometría de moteado al análisis de los procesos de corrosión en metales .....	369
96 -Calibración de radiómetros de filtro con sistema óptico de enfoque para medida de alta temperatura de cuerpos negros .....	373
97 -Caracterización óptica de la superficie frontal de pantallas planas mediante patrones de moteado láser .....	377
98 -Caracterización y corrección de la PSF en cámaras para radiometría de baja incertidumbre .....	381
99 -Correlación de índices objetivos de calidad de vídeo con la percepción humana .....	385
100 -Criba rectangular de fotones fractal .....	389

101 -Efecto del desenfoque en el registro y en la reconstrucción de información en memorias holográficas basadas en el correlador convergente .....	393
102 -Encriptación óptica usando máscaras m-Fibonacci: aplicación al multiplexado .....	397
103 -Estabilidad refractométrica y piezoeléctrica en la medida de bloques patrón longitudinales con interferometría de desplazamiento de fase .....	401
104 -Estudio de la iluminancia en función de la distancia de LEDs de alta luminosidad .....	405
105 -Evaluación perceptiva de la calidad de codecs de compresión de vídeo para web-streaming .....	409
106 -Halo size in multifocal intraocular lenses .....	413
107 -Influencia del ACPA en la resolución y estabilidad de redes holográficas almacenadas en fotopolímeros basados en PVA/Acrilamida .....	417
108 -Láser de diodo rojo estabilizado mediante una técnica de anclaje en frecuencia para Metrología Dimensional .....	421
109 -Líneas de investigación del Grup de Recerca en Òptica de Castelló (GROC·UJI) .....	425
110 -Líneas de investigación del grupo LICEO – Diseño, realización y aplicaciones de elementos de óptica reconfigurable basada en moduladores de cristal líquido .....	429
111 -Líneas de Investigación del Laboratorio de Optica Visual y Biofotónica (Instituto de Óptica, CSIC) Líneas de Trabajo del Grupo de Ingeniería de Frentes de Onda de la Universitat de Barcelona .....	433
112 -Líneas de Trabajo del Grupo de Ingeniería de Frentes de Onda de la Universitat de Barcelona .....	437
113 -Medida de la calidad de imagen en versiones guardadas con diferente formato de archivo y relación de compresión .....	441
114 -Medida de la difusión intraocular mediante el análisis de imágenes de doble-paso en el dominio de las frecuencias .....	445
115 -Medida del índice de modulación de tejidos transparentes a partir de la MTF .....	449
116 -Metrología de gran precisión para espejos de rayos X en Alba .....	453
117 -Nuevas evidencias de la anisotropía del espacio visual en el juicio de distancias en profundidad .....	457
118 -Nuevas líneas de trabajo en metrología óptica en el CD6 de la UPC .....	461
119 -Ojo de Pavo: Elemento Óptico Difractivo con profundidad de campo extendida. Representación en un modulador LCoS Lenny .....	465
120 -Percepción visual de una secuencia rectangular vista a través de una red rectangular acromática de contraste unidad .....	469
121 -Redes de difracción sobre superficies metálicas cilíndricas mediante ablación láser .....	472
122 -Rendimiento visual en condiciones de visión nocturna y calidad óptica ocular .....	476
123 -Sensor regulador de sistemas de iluminación urbana mediante tecnología de sensor CMOS .....	480
124 -Técnicas de codificación de frente de onda con iluminación policromática utilizando moduladores espaciales de luz .....	484
125 -Trabajos de Investigación en Óptica Visual y Tecnología del Color en el CD6 .....	488
126 -Uso de Python para docencia en asignaturas de Grado en Óptica .....	492
127 -Valoración de la agudeza visual y sensibilidad al contraste en roedores mediante un sistema optomotor .....	496
128 -Adquisición, procesado y síntesis de imágenes en color e hiperespectrales .....	500
129 -BRDF de Patrones de Reflectancia Difusa en condiciones de Retro-Reflexión .....	504
130 -Buscando la correlación instrumental y visual óptima para colores goniocromáticos mediante cabinas de iluminación y multi-gonio-espectrofotómetros .....	508
131 -Cabezales Blu-Ray como fuentes de luz versátiles: uso en fotolitografía de grabación directa .....	512
132 -Caracterización de la polarización de haces de luz a la salida de prismas despolarizadores .....	516



133 -Caracterización espectroscópica de los fármacos indometacina y ketorolac en disolución acuosa .....	519
134 -Caracterización para una mejor comprensión del cambio de color de recubrimientos gonioaparentes .....	522
135 -Componentes especiales de fibra óptica .....	526
136 -Comportamiento electromagnético de partículas metálicas en haces de luz fuertemente focalizados ....	530
137 -Conmutación óptica usando acopladores plasmónicos no lineales con guías de tipo taper .....	534
138 -Dependencia del Índice de Rendimiento de Color en función de las muestras cromáticas seleccionadas para obtenerlo .....	538
139 -Design of a flexible imaging system for a modified DLP projector .....	542
140 -Determinación de la influencia del tiempo de estimulación en el efecto fotoluminiscente de recubrimientos ....	546
141 -Efecto del tamaño de partícula en las propiedades ópticas de pigmentos goniocromáticos .....	549
142 -Elementos ópticos holográficos para láseres de pulsos ultracortos y ultraintensos .....	553
143 -Emisión fosforescente en pigmentos de alta eficiencia y la ley de reciprocidad .....	557
144 -Estabilización de la fase absoluta de pulsos de femtosegundos en la región focal para interacciones luz-materia altamente no-lineales y sensibles a la fase .....	561
145 -Estudio comparativo de la condición de transformación de haces Gaussianos en haces uniformes con materiales GRIN activos con perfiles de índice secante hiperbólico y parabólico .....	563
146 -Estudio experimental de la influencia de la temperatura de color de una fuente luminosa sobre la capacidad de discriminación del color de los observadores .....	567
147 -Estudio preliminar de índices de blanqueamiento en materiales de uso industrial .....	571
148 -Experimental study of the spiking activity of semiconductor lasers with time-delayed optical feedback ..	575
149 -Fabricación de microlentes por ablación láser: aplicación en microestructurado de superficies .....	577
150 -Fuente de luz espectral sintonizable basada en diodos emisores de luz (LEDs) .....	581
151 -Grupo de investigación en Biofotónica de la Universitat de Barcelona: pinzas ópticas holográficas para estudios en el interior celular .....	585
152 -Interacción Acusto-Óptica en Fibras Ópticas Estrechadas .....	589
153 -Líneas de investigación del grupo de Óptica Cuántica y Óptica No Lineal de la Universitat de València .....	592
154 -Mejora del ensanchamiento espectral en nanoguías de silicio mediante pulsos asimétricos: fundamentos físicos .....	596
155 -Microestructurado de superficies mediante efecto Talbot .....	599
156 -Nanopartículas plasmónicas de altas prestaciones para la detección molecular mediante Surface-enhanced Raman Scattering .....	603
157 -Obtención de la luz polarizada circular con altos grados de circularidad y estabilidad .....	605
158 -Predicción de firmeza en melocotón "cv Calrico" mediante espectroscopia de infrarrojo cercano .....	609
159 -Procedo láser de fibras ópticas para el desarrollo de sensores de campo evanescente .....	613
160 -Radiometric characterization procedure of cameras for low-uncertainty radiance measurements .....	617
161 -Reconstrucción de imágenes hiperespectrales a partir de un número limitado de canales .....	621
162 -Sensores de temperatura basados en láseres con FCF dopadas con Er <sup>3+</sup> .....	625
163 -Sistema dual de pinzas ópticas basado en tecnología holográfica con medida precisa de fuerza .....	629
164 -Validación y calibración de un sistema hiperespectral .....	633
165 -VIRTUD: Construcción de un telescopio robotico con optica adaptativa sin sensor .....	637
· Patrocinadores y Colaboradores .....	641

# Dependencia del Índice de Rendimiento de Color en función de las muestras cromáticas seleccionadas para obtenerlo

María Isabel Suero, Eduardo M. Cordero, Pedro J. Pardo, Ángel L. Pérez

*Grupo de Investigación Orión, Universidad de Extremadura, Avda. de Elvas s/n, 06071 Badajoz*

[suero@unex.es](mailto:suero@unex.es)

**Resumen:** El método de cálculo del índice de rendimiento de color CRI de fuentes luminosas blancas está en revisión desde hace varios años debido a las discrepancias aparecidas entre los valores obtenidos por el método oficial aprobado por la CIE y las valoraciones subjetivas realizadas con observadores reales, en especial, en el caso de las fuentes luminosas LED blancas. Uno de los puntos que se están revisando es el conjunto de muestras cromáticas sobre las que se realiza el cálculo. En este trabajo se estudia la influencia de la selección de las muestras utilizadas sobre el valor final del CRI obtenido.

## 1. Introducción

La Comisión Internacional de Iluminación (CIE) define el Rendimiento de Color (CR) en su Vocabulario de Iluminación [1] como el “efecto de un iluminante sobre la apariencia del color de objetos por comparación consciente o inconsciente respecto a la apariencia bajo un iluminante de referencia”. El método de cálculo del índice del rendimiento de color (CRI) actualmente recomendado por la CIE fue introducido en 1974 y se encuentra descrito en la publicación CIE 13.3 de 1995 [2]. Mediante este método se pretendía describir con un único número el promedio de las variaciones de color que presentan ocho muestras cromáticas al ser iluminadas con una fuente luminosa respecto al que presentan con otra fuente luminosa. Este método ha sido puesto en entredicho por la aparición de las nuevas fuentes luminosas LED blancas, tanto los cluster Red, Green, Blue (RGB) (y ocasionalmente amarillos o ámbar) como LED de fosforo blanco WLED y LED orgánicos OLED [3]. Las experiencias visuales realizadas en los últimos años muestran que el CRI establece un orden de calidad de las fuentes luminosas que no se corresponde con los resultados obtenidos en dichas pruebas experimentales realizadas con observadores reales [4-8]. También se ha comprobado en un estudio computacional realizado sobre 34 iluminantes diferentes, que los resultados que proporcionan nueve diferentes índices de Calidad de Color (color quality CQ) propuestos por varios autores [9] son significativamente diferentes entre sí. La posición que ocupa en el ranking cada uno de los 34 iluminantes calculada mediante los distintos índices fue muy diferente, por lo que se concluyó que un único índice no podía contabilizar correctamente el rendimiento del color y los fenómenos relacionados. Además del concepto de rendimiento de color existen otros conceptos parecidos tales como la calidad de color de una fuente luminosa [10,11], la capacidad de discriminación [12-14], la claridad visual [15] o la preferencia del color [16].

La CIE en su publicación 177:2007 [17] recomendó el desarrollo de un nuevo índice que proporcione información complementaria relacionada con los conceptos anteriormente citados. Dentro de las propuestas de alguno de los miembros del comité técnico de la CIE aparecía la necesidad de desarrollar un índice CQ de cuatro dimensiones o dividido en cuatro subíndices: CRI, evaluación de diferencias de color ( Colour-Difference Judgements CDI), preferencia de color (Colour Preference CPI) y temperatura de color correlacionada (CCT). Además de todo lo anteriormente citado, existe constancia de la importancia de la selección del conjunto de muestras cromáticas sobre las que se calcula el índice de rendimiento de color [18,19], pudiéndose apreciar diferencias sustanciales en los resultados del cálculo del CRI obtenido en función del conjunto de muestras empleadas para ello. El objetivo de este trabajo es cuantificar esa influencia.

## 2. Metodología

Se ha realizado el cálculo del CRI de un conjunto de fuentes luminosas que pretenden ser representativas de las habitualmente empleadas en iluminación de interior y exterior (Halógeno (A), Halógeno filtrado (Solux), LED RGBA, LED Blanco (WLED), Fluorescente

(TL84), Fluorescente compacta (CF), Halogenuro Metálico (HID)) junto con alguna de las habitualmente utilizadas en los laboratorios en este tipo de trabajos (Simulador D65 y D50). Este cálculo se ha realizado mediante un programa informático basado en MATLAB implementado a tal efecto y siguiendo varios métodos en su cálculo: el método oficial CIE [2], al que hemos designado como UVW, las variaciones propuestas por la propia CIE en 2007 [17] tomando como espacio cromático el CIELAB y el método propuesto por Luo et al. [20] basado en el modelo de apariencia del color CIECAM02 y su fórmula de diferencia de color CAM02-UCS. Sobre estos cálculos, se han modificado las muestras seleccionadas partiendo de las originales del método propuesto por la CIE (CRI8 y CRI14), las muestras alternativas propuestas por la CIE en 2007 basadas en el ColorChecker (CRI10) y un conjunto de muestras metámeras con cada uno de los conjuntos anteriores para el iluminante D65 obtenido de entre las 1950 muestras del atlas NCS.

### 3. Resultados

Los resultados obtenidos se pueden apreciar en la tabla 1.

<i>Método</i>	<i>Fuente luminosa</i>									
<i>CRI 8 Original</i>	<i>D50</i>	<i>A</i>	<i>TL84</i>	<i>D65</i>	<i>Solux</i>	<i>RGBA</i>	<i>WLED</i>	<i>HID</i>	<i>CFL</i>	
<i>UVW</i>	96.44	96.32	85.22	94.67	95.90	56.80	69.92	79.59	81.11	
<i>LAB</i>	96.65	97.95	93.48	98.03	98.32	83.22	82.09	90.54	89.10	
<i>CAM</i>	96.78	97.32	91.96	97.96	97.83	70.24	79.86	88.82	87.65	
<i>Varianza normalizada</i>	0.00	0.01	0.05	0.02	0.01	0.19	0.08	0.07	0.05	
<i>CRI 8 Metámeros</i>										
<i>UVW</i>	97.05	97.14	83.27	95.10	97.10	64.57	74.60	88.28	81.14	
<i>LAB</i>	96.55	98.25	92.27	98.35	98.25	84.40	82.56	94.10	90.05	
<i>CAM</i>	96.88	97.93	90.95	97.95	98.28	71.00	81.34	92.80	88.05	
<i>Varianza normalizada</i>	0.00	0.01	0.05	0.02	0.01	0.14	0.05	0.03	0.05	
<i>CRI 10 Color Checker</i>										
<i>UVW</i>	94.33	91.19	57.40	87.27	89.04	1.87	31.65	43.33	44.88	
<i>LAB</i>	95.34	96.66	89.54	97.01	97.70	67.56	68.86	85.53	85.86	
<i>CAM</i>	96.22	96.88	86.90	97.25	97.23	62.59	70.53	82.73	82.73	
<i>Varianza normalizada</i>	0.01	0.03	0.23	0.06	0.05	0.83	0.39	0.33	0.32	
<i>CRI 10 Metámeros</i>										
<i>UVW m</i>	95.74	94.52	71.35	91.13	93.44	39.39	53.78	68.98	65.06	
<i>LAB m</i>	95.79	97.65	90.11	97.05	97.96	69.16	74.20	90.45	88.92	
<i>CAM m</i>	96.51	97.52	87.62	97.48	97.90	64.61	73.24	87.22	85.46	
<i>Varianza normalizada</i>	0.00	0.02	0.12	0.04	0.03	0.28	0.17	0.14	0.16	

<i>CRI 14 Original</i>									
<i>UVW</i>	95.34	95.07	74.94	93.11	94.43	48.44	60.83	70.27	69.21
<i>LAB</i>	95.85	97.54	90.89	97.51	98.10	76.45	78.36	89.81	87.86
<i>CAM</i>	96.33	97.31	88.56	97.82	97.91	67.17	76.71	86.90	84.78
<i>Varianza normalizada</i>	0.01	0.01	0.10	0.03	0.02	0.22	0.13	0.13	0.12
<i>CRI 14 Metámeros</i>									
<i>UVW m</i>	97.01	96.09	76.75	93.58	95.87	60.04	66.82	80.19	73.17
<i>LAB m</i>	96.31	97.92	90.25	98.10	98.10	78.77	79.20	92.20	88.41
<i>CAM m</i>	97.01	97.90	88.37	97.83	98.28	69.42	78.17	90.15	85.59
<i>Varianza normalizada</i>	0.00	0.01	0.09	0.03	0.01	0.13	0.09	0.07	0.10

Tabla 1. Resultados del cálculo del índice de rendimiento de color para el conjunto de fuentes objeto de estudio mediante los métodos antes aludidos.

Si para cada fuente luminosa comparamos los valores de CRI calculados por los tres métodos distintos empleados, se aprecian distintos valores para una misma fuente, haciéndose especialmente manifiestas estas diferencias para las fuentes luminosas que presentan en su distribución espectral de potencia picos espectrales más marcados como es el caso de los LED RGBA. La varianza promedio de los valores del CRI, obtenidos al utilizar estos tres distintos métodos, normalizada mediante el valor promedio del CRI calculado para cada fuente luminosa, es del 5% para el caso del cálculo del CRI sobre 8 muestras y del 9% para el caso de 14 muestras. En estos casos, la sustitución de las muestras originales por las muestras metámeras del atlas NCS supone una mejoría en los resultados pasando a ser del 4% y del 6% respectivamente. Sin embargo, en el caso de utilizar las muestras del ColorChecker se obtienen unas varianzas normalizadas promedio del 25% con el ColorChecker Original de 1995 y del 11% para el caso de las muestras metámeras NCS. Estos valores tan elevados se deben fundamentalmente a las dos fuentes LED, en especial a la fuente LED RGBA.

A la vista de estos resultados, cabe concluir que con los métodos actuales de cálculo del rendimiento de color en fuentes luminosas, los resultados obtenidos son altamente dependientes de las muestras cromáticas utilizadas. La dependencia del valor de CRI debida al cambio del conjunto de muestras sobre el que se calcula es mayor que la dependencia al cambio de método, por lo que una primera cuestión a resolver sería qué conjunto de muestras son las más apropiadas para el cálculo.

### Agradecimientos

A la Vicepresidencia Segunda y Consejería de Economía, Comercio e Innovación de la Junta de Extremadura y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional por la ayuda GR10102.

### Bibliografía

- [1] CIE 17.4-1987. International Lighting Vocabulary (1987).
- [2] CIE 13.3-1995. Method for measuring and specifying colour rendering properties of light sources (1995).
- [3] Development of efficient and durable sources of white light, Timothy L Dawson, Coloration Technology Volume 126, Issue 1, 1–10 (2010).

- [4] SANDOR, N., CSUTI, P., BOOROGI, P. and SCHANOVA, J., 2004. Visual observation of colour rendering. In Proc. CIE Expert Symposium on LED Light Sources: Physical Measurement and Visual and Photobiological Assessment. CIE x026:2004, 16-19 (2004).
- [5] SANOOR, N. and SCHANDA, J. CIE visual colour-rendering experiments. In Proc. AIC Colour '05, 511-514 (2005).
- [6] SÁNDOR, N., BOOROGI, P., CSUTI, P., KRANICZ, B. and SCHANDA, J. Direct visual assessment of colour rendering. In Proc. 2f1' CIE Session. CIE 152, 01-42-01-45 (2003).
- [7] SZABÓ, F., SANOOR, N., BODROGI, P. and SCHANOVA, J. Colour rendering of white LED light sources: Visual experiment with colour samples simulated on a colour monitor. CIE León '05: CIE Midtenn Meeting -International Lighting Congress (2005).
- [8] BODROGI, P., CSUTI, P., SZABÓ, F. and SCHANDA, J. Why does the CIE colour rendering index fail for white RGB LED light sources? In Proc. CIE Expert Symposium on LED Light Sources: Physical Measurement and Visual and Photobiological Assessment. CIE x026:2004, 24-27 (2004).
- [9] GUO, X. and HOUSER, K.W. A review of colour rendering indices and their application to commercial light sources. *Lighting Res. & Technol.* • 36, 183-199 (2004).
- [10] Halstead, M.B. Color rendering: Past, present and future. In Proc. AIC 77 97-127 (1977).
- [11] Valverg, A., Seim, T., Sallstrom, P. Color rendering and the three-band fluorescent lamp. In Proc. CIE 19th Session CIE50-1980, 216-223 (1980).
- [12] W. A. THORNTON Color-Discrimination Index, *JOSA* 62, 2 (1972).
- [13] THORNTON, W.A. Fluorescent lamps with high color-discrimination capability. *J. Illum. Eng. Soc.*, 3, 61-64 (1973).
- [14] SCHANDA, J. and CZIBULA, G. New description of color discrimination properties of light sources. *Acta Chromatica*, 3, 209-211 (1980).
- [15] HASHIMOTO, K. and NAYATANI, Y. Visual clarity and feeling of contrast. *Color Res. & Appl.* • 19, 171-185 (1994).
- [16] JUDD, D.B. A flatness index for artificial illuminants. *Illuminating Engineering*, 62, 593-598 (1967).
- [17] CIE 177. Colour Rendering of White LED Light Sources (2007).
- [18] Y. F. Chou, Z. Kosztyan, F. Szabó, G. Sarvari, J. Schanda and M. R. Luo A Dataset for Evaluating Colour Rendering Property of Lamps, the 27th session of the CIE, Sun City, SA (2011).
- [19] Zs. Kosztyan, F. Szabó, G. Sarvari, J. Schanda, Sample selection for a colour fidelity index. the 27th session of the CIE, Sun City, SA (2011).
- [20] C. Li, M. R. Luo, G. H. Cui and C. J. Li, Evaluation of the CIE colour rendering index, *Coloration Technology* 127, 129-135 (2011).

# Estudio experimental de la influencia de la temperatura de color de una fuente luminosa sobre la capacidad de discriminación del color de los observadores

Guadalupe Martínez, Eduardo M. Cordero, Pedro J. Pardo, María Isabel Suero

*Grupo de Investigación Orión, Universidad de Extremadura, Avda. de Elvas s/n, 06071Badajoz*

[mmarbor@unex.es](mailto:mmarbor@unex.es)

**Resumen:** Se presenta un estudio experimental que trata de determinar si existe una temperatura de color óptima para una fuente luminosa blanca que propicie una mejor discriminación del color de los observadores. Para llevar a cabo este experimento se ha utilizado una fuente de luz LED RGBA (rojo, verde azul y ámbar) configurada para obtener luz blanca en un rango de temperaturas de color entre 2800 y 9800 Kelvin. Los resultados obtenidos han mostrado que existe una diferencia estadísticamente significativa ( $p$ -valor  $< 0.05$ ) para diferentes temperaturas de color.

## 1. Introducción

La capacidad de discriminación del color de un individuo depende de muchos factores comenzando por el propio individuo en sí mismo, debido a la sensibilidad espectral y a los distintos tipos de conos presentes en su retina [1-3], a la densidad óptica de los filtros prerreceptoriales [4,5], de la zona del espacio cromático en la que se encuentren las muestras que se están evaluando [6,7] y, en el caso de colores percibidos por reflexión, de las características espectrales de la fuente luminosa que ilumina la escena que hagan que un par de muestras cromáticas sean muy distintas o no [8].

Es bien conocida la influencia del espectro energético de una fuente luminosa sobre los colores percibidos en una escena cromática frente a los percibidos si se utiliza una fuente luminosa de referencia, hecho que trata de ser cuantificado mediante el Índice de Rendimiento del Color (CRI) y la influencia también de dicho espectro sobre la gama de colores observables en una escena, cuantificado mediante el Índice de Área de Gamut (GAI). Otro de los parámetros que se utiliza para caracterizar a las fuentes luminosas blancas es la Temperatura de Color Correlacionada (CCT), aunque el presentar un valor u otro de CCT no está ligado con ninguna de las propiedades que indican la calidad de las fuentes luminosas antes citadas (CRI,GAI). Únicamente se recomienda un valor u otro en función del nivel de luminancia [9] o de la actividad que se pretenda llevar bajo esta iluminación: alto rendimiento en el trabajo [10], observación de pinturas en museos [11], etc.

Sin embargo, existen precedentes [12] de la influencia de la CCT en la capacidad de discriminación del color de observadores al utilizar fuentes luminosas de distinta CCT y espectro muy similar. Estos precedentes corresponden a una experiencia realizada por este grupo de autores empleando como fuente luminosa una fuente con tecnología LED RGBA y configurada para proporcionar luz con una temperatura de color en el rango de 2800-6500K. Los resultados de esta experiencia previa mostraban una mayor capacidad de discriminación del color en los observadores a medida que aumentaba la CCT. El objetivo de este trabajo es completar esa experiencia previa aumentando el rango de temperaturas de color hasta los 9800K y comprobar si esa tendencia se mantiene o si posee un máximo para alguna temperatura de color dentro de ese rango.

## 2. Métodos

### A. Diseño experimental

El estudio experimental visual se ha llevado a cabo con 36 observadores, 17 mujeres y 19 hombres, que fueron elegidos aleatoriamente entre los alumnos de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Extremadura. El test de discriminación de color elegido para realizar

la experiencia estaba constituido por láminas del álbum NCS. Concretamente, se ha seleccionado un grupo de 20 pares de muestras, 11 pares iguales y 9 diferentes, de modo que el observador debe indicar si cada uno de los pares de muestras los percibe del mismo color o de distinto. Los 20 pares de muestras fueron presentados a los observadores de uno en uno sobre un fondo neutro. Esta prueba de discriminación de color se ha realizado con una fuente luminosa LED RGBA configurada para distintas temperaturas de color correlacionadas: una baja de 2800K, una mediana de 5000K, una media alta de 6500K y una alta de 9800K. En la tabla 1 se presenta los pares de muestra NCS que constituyen el test.

Item nº	Muestra	Muestra'	$\Delta E_{00}^*$			
			2800K	5000K	6500K	9800K
1	2005-Y70R	2005-Y70R	0.08	0.07	0.07	0.08
2	2570-Y30R	2570-Y30R	0.09	0.09	0.09	0.09
3	3030-R70B	3030-R70B	0.06	0.06	0.06	0.06
4	0603-R60B	0505-R60B	1.10	1.12	1.15	1.13
5	2005-Y90R	2005-Y80R	1.20	1.27	1.35	1.30
6	1005-R90B	1005-R90B	0.10	0.08	0.08	0.09
7	1005-R30B	1005-R40B	0.97	1.14	0.86	0.90
8	1005-Y40R	1005-Y40R	0.06	0.06	0.06	0.07
9	1505-Y20R	1505-Y20R	0.18	0.18	0.17	0.15
10	0505-R90B	0505-R80B	1.95	1.95	2.24	2.28
11	2005-G60Y	2005-G60Y	0.04	0.04	0.04	0.03
12	2005-G40Y	2005-G30Y	0.77	0.63	0.59	0.57
13	0505-G20Y	0505-G30Y	2.30	1.82	1.58	1.54
14	1505-G90Y	1505-G90Y	0.29	0.29	0.29	0.28
15	1005-R80B	1005-R80B	0.07	0.07	0.07	0.08
16	0505-G10Y	0505-G10Y	0.16	0.17	0.17	0.16
17	2005-Y20R	2005-Y30R	1.96	1.89	1.90	1.88
18	0510-G90Y	0510-G80Y	1.85	1.64	1.47	1.49
19	5540-G60Y	5540-G60Y	0.57	0.56	0.55	0.54
20	1505-Y80R	1505-Y90R	1.02	1.05	1.07	1.04

Tabla 1: Pares de muestras NCS que conforman el test con las diferencias de color calculadas para cada fuente luminosa empleada.

### B. Secuencia de observación

En primer lugar, el observador entra en la sala en la que sólo está encendida la cabina de la prueba. Se da un periodo de adaptación de unos 5 minutos mientras se le explica el procedimiento de la prueba y se toman sus datos personales. A continuación, el observador se coloca sentado frente a la cabina de iluminación y va diciendo si los pares de muestra los percibe iguales o diferentes, en un tiempo aproximado de unos 6 segundos. Posteriormente, se cambia la configuración de la fuente luminosa para otra CCT, se espera durante un minuto a la adaptación a las nuevas condiciones de iluminación y se repite la prueba. El orden de realización de la prueba es distinto para cada observador para evitar así la influencia en los resultados de un posible efecto de aprendizaje.

## 3. Resultados

En el análisis de los resultados se han empleado los resultados obtenidos por el grupo de los mejores observadores en cuanto al número de aciertos. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2. Se puede observar que existen pequeñas diferencias en el porcentaje medio de respuestas correctas obtenidas en el subgrupo de los 12 mejores

observadores para cada una de las diferentes temperaturas de color seleccionadas en el caso de los pares de muestras iguales pero estas diferencias no son estadísticamente significativas. Sin embargo, las diferencias encontradas en los porcentajes medios de respuestas acertadas en el caso de pares de muestras diferentes son estadísticamente significativas, tras la realización del ANOVA, con un p-valor de 0.03.

<i>Fuente, CCT</i>	<i>% de Respuestas Correctas</i>	
	Parejas de muestras Iguales	Parejas de muestras Diferentes
RGBA 2800K	90.21	60.68
RGBA 5000K	86.81	69.23
RGBA 6500K	88.81	78.63
RGBA 9800K	81.12	65.81
ANOVA (p-valor)	0.5	0.03

Tabla 2: Análisis Estadístico de los resultados a distintas temperaturas de color. Distinción entre parejas de muestras iguales y diferentes.

#### 4. Conclusiones

Estos resultados nos permiten afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas en la discriminación del color de los pares de muestras que no son iguales al emplear fuentes luminosas de distinta temperatura de color, siendo mayor la capacidad de discriminación a mayor temperatura de color de la fuente luminosa hasta los 6500K, donde se produce el máximo de discriminación, y bajando a temperaturas de color de 9800K.

Por tanto, desde el punto de vista de las fuentes luminosas, parece que la configuración más favorable al observador para discriminar muestras diferentes es la que tiene una temperatura de color de 6500K, seguido por el de 5000K, es decir, el observador discrimina mejor a temperaturas de color correlacionadas medias. Sin embargo, en valores extremos como a 2800K o a 9800K, la capacidad de discriminación disminuye.

Para comprobar si este resultado se debe solamente a la diferente temperatura de color de la fuente debemos estudiar la evolución de las diferencias de color de cada par de muestras que conforman el test al cambiar la fuente luminosa. Debemos considerar que la fuente luminosa empleada (LED RGBA) es la que proporciona una distribución espectral de potencia (SPD) más parecida para las diferentes temperaturas de color, intentando minimizar así el efecto de la diferente SPD en cada configuración.

Si analizamos los ítems del test correspondientes a los pares de muestras diferentes (ítems 4,5,7,10,12,13,17,18,20) no se aprecia una variación sistemática en las diferencias de color al cambiar la CCT, en el sentido de aumentar dichas diferencias al aumentar la temperatura de color de la fuente luminosa. En cuanto al porqué del cambio en la temperatura de color facilita una mayor discriminación por parte de los observadores, podríamos resaltar que una fuente luminosa con una temperatura de color mayor o menor manteniendo la misma luminancia total supone un distinto reparto en la intensidad de los picos espectrales de la fuente LED RGBA. Este hecho afectará al nivel de estimulación relativa de cada tipo de cono, es decir, si la fuente luminosa de temperatura de color más alta posee un pico espectral en la zona de los azules más intenso que para temperaturas de color más bajas, el nivel absoluto de estimulación de los conos S será mayor bajo esta fuente luminosa. Al contrario, si la temperatura de color es baja se estimularán más los conos L.



Teniendo en cuenta esto, una posible hipótesis sería que un reparto equilibrado en la excitación de los tres tipos de conos existentes habitualmente en la retina humana ayuda a discriminar diferencias de color.

### **Agradecimientos**

A la Vicepresidencia Segunda y Consejería de Economía, Comercio e Innovación de la Junta de Extremadura y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional por la ayuda GR10102.

### **Bibliografía**

- [1] Dartnall, H.J.A, Bowmaker, J.K, Mollon, J.D. "Human visual pigments: microspectrophotometric results from the eyes of seven persons". *Proceedings of the Royal Society of London*; B220:115-130 (1983).
- [2] Stockman A, Sharpe LT. "Spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype". *Vision Res*;40: 1711-1737 (2000).
- [3] Stockman A, Sharpe LT, Fach CC. "The spectral sensitivity of the human short-wavelength cones". *Vision Res*;39:2901-2927 (1999).
- [4] Webster MA, Miyahara E, Malkoc G, Raker VE, "Variations in normal color vision. II. Unique hues", *J. Opt. Soc. Am. A*;17:1545-1555 (2000).
- [5] Bone RA, Landrum J T, Cains A. "Optical density spectra of the macular pigment in vivo and in vitro". *Vision Res*;32:105-110 (1992).
- [6] D. L. MACADAM, "Rautian on Color Discrimination," *J. Opt. Soc. Am.* 45, 1065-1070 (1955).
- [7] De Valois, R.L., I. Abramov and W.R. Mead. "Single Cell Analysis of Wavelength Discrimination at the Lateral Geniculate Nucleus in the Macaque." *Journal of Neurophysiology* 30: 415-33 (1967).
- [8] Mahler, E., Ezrati, J. J. and Vienot, F. "Testing LED lighting for colour discrimination and colour rendering". *Color Res. Appl.* 34, 8–17 (2009).
- [9] Davis, R. G. and Ginthner, D. N. "Correlated color temperature, illuminance level, and the Kruithof curve". *J. Illum. Eng. Soc.* 19, 27–38 (1990).
- [10] Oi N., Takahashi H., "Preferred combinations between illuminance and color temperature in several settings for daily living activities", *Proceedings Vol.2, 26th Session of the CIE-Beijing 2007*, D3-178,(2007)
- [11] Pinto P.D., Linhares J.M.M., Nascimento S.M.C, "Correlated color temperature preferred by observers for illumination of artistic paintings," *J. Opt. Soc. Am. A*, 25 (2008).
- [12] Pardo, P.J., Cordero, E.M., Suero, M.I. and Pérez, A.L. "Influence of the correlated color temperature of a light source on the color discrimination capacity of the observer". *JOSA* 29, A209-A215 (2012).



# X CONGRESO NACIONAL DEL COLOR

Valencia, 26-27-28 Junio 2013

# **X Congreso Nacional de Color Valencia, 26, 27 y 28 de Junio**

Organiza

Universitat Politècnica de València  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño  
Escola Tècnica Superior d'Arquitectura  
Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica  
Instituto de Restauración del Patrimonio  
Sociedad Española de Óptica

Este libro ha sido debidamente examinado y valorado por evaluadores ajenos a la Universitat Politècnica de València, con el fin de garantizar la calidad científica del mismo.

Editora: Ángela García Codoñer

Diseño de Portada: *Carlos Sandía Paredes,*  
*Marta Ballester Collado*

Maquetación: *Marta Ballester Collado*

© de los textos: **sus autores**

© de las imágenes: **sus autores**

© de la presente edición: Universitat Politècnica de València

ISBN: 978-84-9048-058-8

Queda prohibida la reproducción, distribución, comercialización, transformación, y en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de todo o parte de los contenidos de esta obra sin autorización expresa y por escrito de sus autores.

Impreso en España

El X Congreso Nacional de Color cuenta con el apoyo de las siguientes entidades:



UNIVERSITAT  
POLITÀCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño



ESCOLA TÈCNICA  
SUPERIOR  
D'ARQUITECTURA



EGE expresión gráfica arquitectónica



IRP INSTITUTO DE  
RESTAURACIÓN DEL  
PATRIMONIO  
INSTITUTO UNIVERSITARIO DE INVESTIGACIÓN



SEDOPTICA  
SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ÓPTICA



forum UNESCO  
UNIVERSIDAD Y PATRIMONIO

Empresas colaboradoras:



KONICA MINOLTA



See in Truth

## MIEMBROS DEL COMITÉ ORGANIZADOR

---

### DIRECCIÓN

Ángela García Codoñer

### SECRETARIOS

Ana Torres Barchino

Juan Serra Lluch

### COMITÉ ORGANIZADOR

Ignacio Tortajada Montañana

José Luis Higón Calvet

Begoña Saiz Mauleón

Esther González Aurignach

Hugo A. Barros da Rocha e Costa

Irene de la Torre Fornés

Pedro Molina Siles

Jorge Montalvá Colomer

Salvador Gilabert Sanz

Juan Carlos Piquer Cases

Alfredo Santonja Llabata

Mónica Val Fiel

Lola Merino Sanjuán

## MIEMBROS DEL COMITÉ CIENTÍFICO

---

Mariano Aguilar - *Universitat Politècnica de València*

Natividad Alcón Gallardo - *AIDO, Valencia*

Ruperto Bermejo Román - *Universidad de Jaén*

Isabel Braz de Oliveira – *Universidade Lusitana de Lisboa*

Joaquín Campos Acosta - *Instituto de Óptica, CSIC*

Pascual Capilla Perea - *Universitat de València*

Ellen Carter - *Editor-in-chief, Color Research and Application, USA*

Changjun Li - *Liaoning Technical University, China*

Teresa Doménech Carbó - *Universitat Politècnica de València*

José Federico Echavarrí Granados - *Universidad de La Rioja*

Ángela García Codoñer - *Universitat Politècnica de València*

Eduardo Gilabert Pérez - *Universitat Politècnica de València*

José M<sup>º</sup> González Cuasante - *Universidad Complutense de Madrid*

María Lourdes González-Miret Martín - *Universidad de Sevilla*

Francisco J. Heredia Mira - *Universidad de Sevilla*

Javier Hernández Andrés - *Universidad de Granada*

Begoña Hernández Salueña - *Universidad Pública de Navarra*

Enrique Hita Villaverde - *Universidad de Granada*

Francisco Imai - *Canon, USA*

Julio Lillo Jover - *Universidad Complutense de Madrid*

Jorge Llopis Verdú - *Universitat Politècnica de València*  
Francisco M. Martínez Verdú - *Universidad de Alicante*  
Víctor Medina Flores - *Universidad de Granada*  
Manuel Melgosa Latorre - *Universidad de Granada*  
Ignacio Negueruela Suberviola - *Universidad de Zaragoza*  
Claudio Oleari - *Università degli Studi di Parma*  
Susana Otero Belmar - *AIDO, Valencia*  
Pedro J. Pardo Fernández - *Universidad de Extremadura*  
Esther Perales Romero - *Universidad de Alicante*  
Alicia Pons Aglio - *Instituto de Óptica, CSIC*  
Jaume Pujol Ramo - *Universidad Politécnica de Cataluña*  
Marina Puyuelo Cazorla - *Universitat Politècnica de València*  
Javier Romero Mora - *Universidad de Granada*  
Ronnie Luo - *Director CIE Division 1*  
María Sagrario Millán - *Universidad Politécnica de Cataluña*  
Juan Serra Lluch - *Universitat Politècnica de València*  
María Isabel Suero - *Universidad de Extremadura*  
Lucia Toniolo - *Politecnico di Milano*  
Ana M. Torres Barchino - *Universitat Politècnica de València*  
Isabel Tort Ausina - Forum Unesco – *Universitat Politècnica de València*  
Ignacio Tortajada Montañana - *Universitat Politècnica de València*  
Daniel Vázquez Molini - *Universidad Complutense de Madrid*  
Isabel María Vicaria Romero - *Universidad de Sevilla*  
Meritxel Vilaseca Ricart - *Universidad Politécnica de Cataluña*

# ÍNDICE

## RESÚMENES CONFERENCIAS INVITADAS / *ABSTRACTS INVITED CONFERENCES*

**Fairchild, Mark D.**

01 125 COLOR SCALES

**Schindler, Verena M.**

02 133 ENVIRONMENTAL COLOUR DESIGN

## RESÚMENES COMUNICACIONES / *ABSTRACTS COMMUNICATIONS* (Por orden alfabético de primer autor)

**Agustín Hernández, Luís; Fernández Morales, Angélica; Peinado Checa, Zaira Joanna**

05 143 COLOR EN LA VIVIENDA SOCIAL. EL CASO DE ZARAGOZA

**Alamán Garcerá, Jorge**

07 153 DINÁMICAS PREVIAS; TEST CROMÁTICO, PALETA INTERACTIVA

**Alcón Gargallo, Natividad; Moreno Llombart, Consuelo**

08 162 EVALUACIÓN DE LA VISIÓN DEL COLOR COMO HERRAMIENTA DE DIAGNÓSTICO Y SEGUIMIENTO DE PATOLOGÍAS OCULARES

**Alda, Javier; Vázquez, Daniel; González, Javier; Turegano, Fernando; Andueza, Juan Antonio**

09 166 APLICACIÓN DE TÉCNICAS COLORIMÉTRICAS PARA LA DIFERENCIACIÓN DE TEJIDOS "IN VIVO"

**Álvarez Fernández-Balbuena, Antonio; García-Botella, Ángel; Vázquez-Moliní, Daniel; Galán-Cañestro, Teresa;**

10 174 Ibáñez Martínez, Manuel  
DISEÑO Y CALIBRACIÓN ESPECTRAL DE LUMINARIAS LED CON CONTROL DE TEMPERATURA DE COLOR Y MEJORA DE CRI

**Álvaro Llorente, Leticia; Lillo Jover, Julio; Moreira Villegas, Humberto**

11 182 EVALUACIÓN DE LA VISIÓN DICRÓMATA MEDIANTE DOS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN (COBLIS Y VISCHECK): COMPARACIÓN CON DALTÓNICOS REALES MEDIANTE SIMULCHECK

**Araujo Fuster, Fernando**

13 189 COLOR: EFECTOS ESPECIALES EN ARQUITECTURA, EFECTOS ESPACIALES EN EL CINE. (UN RECORRIDO POR APOCALYPSE NOW Y LA FACULTAD DE ARQUITECTURA DE OPORTO)

**Avizcuri Inac, José Miguel; Sáenz Navajas, María-Pilar; González Hernández, Marivel; Echávarri Granado, J.**

14 202 Federico; Ferreira González, Vicente; Fernández Zurbano, Purificación  
EVALUACIÓN DEL COLOR DEL VINO TINTO MEDIANTE ANÁLISIS SENSORIAL.  
CORRELACIÓN DE LAS MEDIDAS FÍSICOQUÍMICAS CON LOS ATRIBUTOS SENSORIALES

**Ayala Zurbano, Fernando; Echávarri Granado, J. Federico; Sanz Cervera, Susana; Olarte Martínez, Carmen;**

16 207 San Miguel Bozalongo, Raúl; Anguiano Alesanco, Eduardo  
EFECTO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE HUMEDAD SOBRE LA EVOLUCIÓN DEL COLOR EN FRUTAS

**Ayala Zurbano, Fernando; Echávarri Granado, J. Federico; Sanz Cervera, Susana; Olarte Martínez, Carmen;**

18 213 San Miguel Bozalongo, Raúl; Anguiano Alesanco, Eduardo  
EFECTO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE HUMEDAD SOBRE LA EVOLUCIÓN DEL COLOR DE VERDURAS FRESCAS

**Baena-Murillo, Ernesto; Micó-Vicent, Bárbara; Gómez, Omar; Gilabert, Eduardo; Martínez-Verdú, Francisco**

20 219 CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE UN PIGMENTO HÍBRIDO NANOESTRUCTURADO Y SU PRECURSOR ORGÁNICO

**Bastos, Rita**

21 226 EXPERIMENTAL COLOUR PHOTOGRAMS



- Bermejo Román, Ruperto;** Limón Villarejo, Piedad; Acien Fernández, F. Gabriel; Fernández Sevilla, José M;  
23 228 Melgosa Latorre, Manuel  
MEDIDAS DE COLOR EN ACEITES DE OLIVA VIRGEN ENRIQUECIDOS CON LUTEÍNA  
PROCEDENTE DE MICROALGAS
- Borghesi, Eva;** Trivellini, Alice; Gordillo, Belén; Rodríguez-Pulido, Francisco J.; Malorgio, Fernando; Heredia,  
25 235 Francisco J.  
HIBRIDACIÓN ENTRE ESPECIES TRADICIONALES Y EXÓTICAS DE TOMATE: INFLUENCIA  
EN EL COLOR, LA FIRMEZA Y LA COMPOSICIÓN ANTOCIÁNICA DEL FRUTO DURANTE LA  
MADURACIÓN
- Burgos Fernández, Francisco Javier;** Perales Romero, Esther; Gómez Lozano, Omar; Chorro Calderón, Elisabet;  
26 240 Viqueira Pérez, Valentín; Martínez-Verdú, Francisco Miguel; Pujol Ramo, Jaume  
CORRELACIÓN INSTRUMENTAL Y VISUAL ENTRE UN ESPECTROFOTÓMETRO  
MULTIÁNGULO Y UNA CABINA DE ILUMINACIÓN DIRECCIONAL
- Burgos Fernández, Francisco Javier;** Perales Romero, Esther; Herrera Ramírez, Jorge A; Vilaseca Ricart,  
27 245 Meritxell; Martínez-Verdú, Francisco Miguel; Pujol Ramo, Jaume  
GENERACIÓN DE ILUMINANTES ESTÁNDAR A PARTIR DE UNA FUENTE DE LUZ  
ESPECTRAL Y SINTONIZABLE BASADA EN LEDS
- Neto, María;** Carvalho, Joana; Costa, Ana  
29 251 AZULEJO: COLOR Y PAISAJE URBANO. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DE INTERVENCIÓN  
EN ZONAS HISTÓRICAS
- Capilla Tamborero, Esther;** Navarro Fajardo, Juan Carlos  
30 256 UNA PINCELADA SOBRE EL COLOR EN LAS BÓVEDAS DE CRUCERÍA GÓTICAS A TRAVÉS  
DE ALGUNAS REPRESENTACIONES PICTÓRICAS
- Carter, Ellen C.;** Melgosa-Hervás, María del Rocío  
31 266 TENDENCIAS EN LA PUBLICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN SOBRE EL COLOR
- Cejudo-Bastante, María Jesús;** Gordillo, Belén; Baca Bocanegra, Berta; Heredia, Francisco J.  
32 268 APLICACIÓN DE LA COLORIMETRÍA DIFERENCIAL A LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD  
CROMÁTICA DE VINOS TINTOS DE CLIMA CÁLIDO CON ADICIÓN DE VIRUTAS DE ROBLE  
DURANTE LA FASE DE ENCUBADO
- Chorro, Elisabet;** Perales, Esther; Gómez, Omar; Burgos, Francisco J.; Viqueira, Valentín; Martínez-Verdú,  
33 272 Francisco M.; Pujol, Jaume  
MÉTODO PARA DETERMINAR EL NÚMERO MÍNIMO DE MEDIDAS DE COLOR O TEXTURA  
EN MUESTRAS GONIOAPARENTES
- Coba Peña, Ana Cristina;** García Bueno, Ana; López Cruz, Olimpia; Collado Montero, Francisco J.; Medina  
35 279 Florez, Víctor  
PROPUESTA DE ENSAYOS DE ENVEJECIMIENTO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE  
ALTERACIONES DE COLOR EN LA POLICROMÍA DEL ALFARJE DEL PATIO DE LAS  
DONCELLAS, REAL ALCÁZAR DE SEVILLA
- Cortina-Maruenda, Javier;** Molina-Siles, Pedro  
37 292 BRASIL. CUANDO LA MODERNIDAD SE HIZO COLOR
- De la Roja de la Roja, José Manuel;** Santos Gómez, Sonia; García Fernández-Villa, Silvia; San Andrés Moya,  
38 300 Margarita  
EFECTOS DEL BARNIZ SOBRE EL COLOR DE LAS REINTEGRACIONES CROMÁTICAS
- De la Torre Fornés, Irene;** Torres Barchino, Ana; García Codoñer, Ángela  
39 307 CARACTERÍSTICAS CROMÁTICAS DE LA AZULEJERÍA BARROCA DEL CONVENTO DE SANTA  
CLARA DE XÀTIVA
- Eslava Cabanellas, Clara**  
41 322 “LOS COLORES”, UN RECUERDO DE INFANCIA DE WALTER BENJAMIN
- Fernández-Vázquez, Rocío;** Stinco, Carla M; Heredia, Francisco J; Hernanz, Dolores; Vicario, Isabel M.  
42 332 ENTRENAMIENTO ESPECÍFICO EN EVALUACIÓN VISUAL DE ZUMO DE NARANJA Y  
ESTUDIO DEL UMBRAL DE DIFERENCIACIÓN VISUAL

- Fernández-Vázquez, Rocío;** Stinco, Carla M.; Heredia, Francisco J.; Hernanz, Dolores; Vicario, Isabel M.  
43 339 DIGITALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE IMAGEN EN LA EVALUACIÓN DEL COLOR: INFLUENCIA DE LAS DIFERENTES CONDICIONES DE MEDIDA
- Ferrer-Gallego, Raúl;** Hernández-Hierro, José Miguel; Rivas-Gonzalo, Julián C.; Heredia, Francisco J; Escribano-Bailón, M. Teresa  
44 344 COPIGMENTACIÓN DE ANTOCIANOS: ESTIMACIÓN E INFLUENCIA EN EL COLOR DE VINOS TINTOS DE CULTIVAR GRACIANO
- Ferrero Turrión, Alejandro;** Rabal Almazor, Ana María; Perales Romero, Esther; Campos Acosta, Joaquín; Chorro Calderón, Elisabet; Martínez Verdú, Francisco Miguel; Pons Aglio, Alicia; Hernanz Sanjuán, María Luisa  
46 348 REPRESENTACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LA GAMA DE COLOR DE RECUBRIMIENTOS GONIOAPARENTES
- García-Domene, M<sup>a</sup> Carmen;** Luque Cobija, M<sup>a</sup> José; De Fez Saiz, Dolores  
47 354 CARACTERIZACIÓN COLORIMÉTRICA DE UN PROYECTOR DE VÍDEO CON TECNOLOGÍA LCoS ESPACIALMENTE INHOMOGÉNEO
- García-Domene, M<sup>a</sup> Carmen;** De Fez, M. Dolores; Luque, M. José; Acevedo, Pablo  
48 359 SOFTWARE PARA LA SIMULACIÓN DE LA VISIÓN DICRÓMATA EN SEÑALES DE VIDEO
- García-Fernández, Berta;** Vázquez-Moliní, Daniel; Álvarez Fernández-Balbuena, Antonio  
49 362 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD CROMÁTICA EN GUÍAS DE LUZ PRISMÁTICAS Y DE ALUMINIO
- García-Romera, Marta C.;** Huete, M<sup>a</sup> Dolores; Melgosa, Manuel  
50 364 SEGUIMIENTO DE LA EVOLUCIÓN DE LA DIABETES MEDIANTE ANOMALOSCOPIO Y RETINÓGRAFO
- García Sánchez, María Teresa**  
51 366 SONIDO: DOMINIO DE OPORTUNIDAD EN LA PRÁCTICA DEL COLOR
- Garfella Rubio, José Teodoro;** Mañez Pitarch, María Jesús; Martínez Moya, Joaquín Ángel; Cabeza González, Manuel  
52 373 APLICACIÓN DEL COLOR A LAS NUBES DE PUNTOS, LAS TEXTURAS Y SU POSTERIOR MODELIZACIÓN MEDIANTE TOMA DE DATOS AVANZADA A TRAVÉS DEL ESCÁNER Y LA FOTOGRAFÍA ARQUITECTÓNICA
- Gomes, Cristina;** Oliveira, Pedro  
54 384 THE REFLECTED LIGHT OR THE TINTED SIDE OF THE WHITE COLOUR
- Gómez Lozano, Omar;** Burgos Fernández, Francisco Javier; Perales Romero, Esther; Chorro Calderón, Elisabet; Viqueira Pérez, Valentín; Martínez-Verdú, Francisco M.; Pujol Ramo, Jaume  
56 393 COMPARACIÓN PRELIMINAR DEL RENDIMIENTO DE LAS FÓRMULAS DE DIFERENCIA DE COLOR AUDI2000 Y CIEDE2000 CON EVALUACIONES VISUALES EN UNA CABINA DE ILUMINACIÓN DIRECCIONAL
- Gómez-Robledo, Luis;** Gebejes, Ana M.; Melgosa, Manuel  
57 399 MEDIDA DE LOS FILTROS COLOREADOS DE UN TINTÓMETRO LOVBOND
- González Aurignac, Esther;** Sáiz Mauleón, Begoña; Santonja Llabata, Alfredo  
58 401 EL ROL CONTEMPORÁNEO DEL COLOR EN LA METAMORFOSIS DEL ESPACIO PÚBLICO
- González Cuasante, José María;** Alonso Muñoz, Fernando  
59 408 NOTAS PARA EVALUAR EL EFECTO DEL CONTRASTE SUCESIVO EN LAS POSIMÁGENES CROMÁTICAS
- Gordillo, Belén;** Cejudo Bastante, M. Jesús; Escudero-Gillete, M. Luisa; Bejines, Emilia; González-Miret, M. Lourdes; Heredia, Francisco J.  
60 413 DIFERENCIAS COLORIMÉTRICAS COMO ÍNDICES DE ESTABILIDAD CROMÁTICA DE VINOS TINTOS CON DIFERENTES TIEMPOS DE ENVEJECIMIENTO EN BARRICA
- Hernández Salueña, Begoña;** Sáenz Gamasa, Carlos; Alberdi Odriozola, Coro; Diñeiro Rubial, José Manuel  
61 417 COLOR EN BEBIDAS ISOTÓNICAS Y DEPORTIVAS
- Higón Calvet, José Luis**  
62 424 EL USO DEL COLOR COMO VEHÍCULO PARA LA COMPRESIÓN DE LA GEOMETRÍA. LA EDICIÓN DE LOS *ELEMENTOS* DE EUCLIDES DE OLIVER BYRNE. LONDRES 1847

- Irigoyen Gaztelumendi, Jesús;** Villar Cano, Miriam; Marqués Mateu, Ángel; García García, Francisco  
63 426 ADMINISTRACIÓN DEL COLOR EN LOS FONDOS CARTOGRÁFICOS DE LA FUNDACIÓN GIMÉNEZ LORENTE
- Jara-Palacios, M. José;** Gordillo, Belén; Escudero-Gilete, M. Luisa; Hernanz, Dolores; Heredia, Francisco J  
64 431 EVALUACIÓN COLORIMÉTRICA DEL POTENCIAL DE COPIGMENTACIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS OBTENIDOS DE SUBPRODUCTOS DE VINIFICACIÓN DE ZALEMA
- Jiménez Ramos, Miguel**  
65 435 EL PABELLÓN DE LA URSS EN LA *EXPOSITION INTERNATIONALE DES ARTS DÉCORATIFS ET INDUSTRIELS*, PARÍS 1925
- Jorge Camacho, Cristina**  
66 448 CONSTRUIR EL COLOR DE DIMENSIONES CONSTANTES Y DE LUZ Y MATERIA VARIABLES
- Lafuente Rosales, Victoria;** Val Falcón, Jesús; Negueruela Suberviola, Ángel Ignacio  
68 458 UTILIZACIÓN DE LAS COORDENADAS DE COLOR CIE L\*, A\* Y B\* PARA ESTIMAR EL MOMENTO ÓPTIMO DE RECOLECCIÓN DE LA CEREZA "CASHMERE"
- Laumain, Xavier;** López Sabater, Angela  
69 463 EL PALAUET Y LA CERÁMICA NOLLA: EL COLOR DEL MODERNISMO
- Lillo, Julio;** Prado, Lilia; Libish, Carlos; Moreira, Humberto; González, Fernando; Álvaro, Leticia  
71 472 TÉRMINOS DE COLOR BÁSICOS (TCBS) Y CATEGORÍAS DE COLOR BÁSICAS (CCBS) EN TRES VERSIONES DEL ESPAÑOL (CASTELLANO, MEJICANO Y URUGUAYO): DATOS LINGÜÍSTICOS Y BASADOS EN LA DENOMINACIÓN DE COLORES
- Llave Vincenti, Edgar;** Moreira, René; Chorro Calderón, Elisabet; Perales Romero, Esther; Martínez Verdú, Francisco Miguel  
73 478 CALIBRACIÓN COLORIMÉTRICA DEL MÉTODO SODIS DE PURIFICACIÓN DE AGUA MEDIANTE IRRADIACIÓN SOLAR CONTROLADA CON UNA CÁMARA DIGITAL
- Llinares Millán, Carmen;** Iñarra Abad, Susana; Serra Lluch, Juan; Guixeres Provinciale, Jaime  
74 487 ANÁLISIS DEL COLOR EN EL RENDER DE ARQUITECTURA A TRAVÉS DE LA INGENIERÍA KANSEI Y EYE TRACKING
- López González, Concepción;** Zornoza Zornoza, M<sup>ª</sup> Remedios  
75 489 HUELLAS Y COLORES EN EL TAPIAL DE LOS CASTILLOS DE LA VALL D'ALBAIDA
- Martínez, Guadalupe;** Naranjo, Francisco L.; Pérez, Ángel Luis; Suero, María Isabel  
76 501 LAS SIMULACIONES HIPERREALISTAS EN LA ENSEÑANZA DEL COLOR: EXPLICACIÓN DE LA GENERACIÓN Y MEZCLA DE COLORES UTILIZANDO POV-RAY
- Martínez-García, Juan;** Bokaris, Panagiotis-Alexandros; Gómez-Robledo, Luis; Melgosa, Manuel  
77 503 DIFERENCIAS DE CROMATICIDAD UMBRALES Y SUPRAUMBRALES MEDIANTE FÓRMULAS DE DIFERENCIA DE COLOR AVANZADAS
- Mayorga Pinilla, Santiago;** Vázquez Moliní, Daniel; Álvarez Fernández-Balbuena, Antonio; Gil, Teresa; Enríquez de Salamanca, Guillermo; Herráez, Juan; Del Egido, Marian  
78 509 CARACTERÍSTICAS DE ILUMINACIÓN NATURAL Y PERCEPCIÓN COLOR EN EL CLAUSTRO DEL MONASTERIO DE EL PAULAR
- Merino Sanjuan, Lola;** Val Fiel, Mónica  
79 519 UN CÍRCULO CROMÁTICO URBANO PARA LA CIUDAD CONTEMPORÁNEA
- Micó-Vicent, Bárbara;** Martínez-Verdú Francisco; Gilabert, Eduardo; Viqueira, Valentín; Roquero, Ana  
80 526 ANALYSIS OF THE COLOR GAMUT OF SOME AMERICAN NATURAL DYES IN TRADITIONAL TEXTILE FIBERS
- Molina-Siles, Pedro;** Piquer-Cases, Juan Carlos; Cortina-Maruenda, Javier  
81 528 EL COLOR EN LOS COMIENZOS DEL CINE. DE LA APLICACIÓN MANUAL AL TECHNICOLOR
- Muñoz de Pablo, María José;** De las Casas Gómez, Ignacio  
82 537 APROXIMACIÓN A TRAVÉS DEL COLOR A LA IMAGEN DE LA CIUDAD. LA CORNISA DE MADRID
- Muñoz, J.;** Vázquez, D; Alvarez, A.; Laborde, A.; García, A.  
83 539 LAS POLICROMÍAS DEL PÓRTICO DE LA GLORIA

- Neguera Suberviola, Ignacio;** Urzola Aísa, Concha; Echávarri Granado, José Federico; Ayala Zurbano, 84 552 Fernando  
LA REPRODUCCIÓN DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES EN EL RANGO VISIBLE A PARTIR DE UN PEQUEÑO NÚMERO DE CANALES
- Oliveira, Pedro;** Gomes, Cristina 85 557  
MILK PACKAGING CHROMATIC DIFFERENTIATION – CASE STUDY ON SKIMMED, SEMI-SKIMMED AND WHOLE MILK PACKAGING'S ON SALE IN MAIN PORTUGUESE SUPERMARKETS DURING 2012
- Pais Oliveira, Ana** 86 561  
EL COLOR Y EL PROCESO CREATIVO EN LAS PRÁCTICAS ARTÍSTICAS CONTEMPORÁNEAS: LA CONEXIÓN ENTRE LENGUAJES PICTÓRICOS E ARQUITECTÓNICOS A TRAVÉS DE LAS RELACIONES CROMÁTICAS
- Parada Castellano, Raúl;** Casado de Amezúa Vázquez, Joaquín 87 566  
EL PESO VISUAL PV Y SU CORRELACIÓN CON LA TEORÍA DEL PESO VISUAL EN EL ARTE: RUDOLF ARNHEIM
- Pardo, Pedro J;** Suero, María Isabel; Pérez, Ángel L. 88 577  
APORTACIONES DEL MCRI A LA MEDIDA DE LA CALIDAD DE COLOR DE LAS FUENTES LUMINOSAS
- Patirnac, Sorina;** Satorre Aznar, Miguel A; Gilabert Pérez, Eduardo 90 579  
VARIACIÓN DE LA CROMATICIDAD CON LA TEMPERATURA DE UNIÓN EN LEDS DE ALTA POTENCIA
- Pereira Uzal, José Manuel** 91 584  
EVALUACIÓN DE LA REPRODUCCIÓN DEL COLOR EN FLUJOS DE REVELADO RAW EN LA DIGITALIZACIÓN Y DOCUMENTACIÓN GRÁFICA DE BIENES CULTURALES
- Pérez Fuster, Joaquín;** Gilabert Pérez, Eduardo J; Martínez Verdú, Francisco; Miró i Martínez, Pau; Mateo Gómez, Juan Manuel 92 592  
COLOR Y MÚSICA. ANÁLISIS DE LAS SENSACIONES PERCEPTIVAS ENTRE ESTÍMULOS VISUALES Y AUDITIVOS.
- Pérez, Ángel L.;** Cordero, Eduardo; Pardo, Pedro J.; Suero, María Isabel 94 597  
¿SOLUCIONA EL CRI-CAM02UCS LA SUBESTIMACIÓN DE LAS FUENTES LED BLANCAS?
- Piquer-Cases, Juan Carlos;** Molina-Siles, Pedro 95 599  
LA AZULEJERÍA EN EL DESAPARECIDO PALACIO REAL DE VALENCIA (1238-1810). UNA APROXIMACIÓN A SUS ASPECTOS CROMÁTICOS
- Porras Castillo, Ignacio;** Conesa Martínez, Agustín; Martínez Nicolás, Javier; Jara Rodríguez, Francisco José; Manera Bassa, Francisco Javier; Medina Sánchez-Valladares, Alejandro; Brotons, José Manuel 96 607  
DIFERENCIAS DE COLOR ENTRE DIVERSAS VARIEDADES DE NARANJAS SANGUINAS
- Porras Castillo, Ignacio;** Conesa Martínez, Agustín; Martínez Nicolás, Javier; Manera Bassa, Francisco Javier; Brotons Martínez, José Manuel 97 612  
EVOLUCIÓN DEL DESVERDIZADO DEL COLOR EXTERNO EN LOS FRUTOS DE LIMÓN FINO 49 EN CÁMARA CON ATMÓSFERA DE ETILENO
- Prado León, Lilia R;** Rosales Cinco, Rosa A. 98 618  
PREFERENCIAS DEL COLOR: ESTÍMULOS AISLADOS VS APLICADOS A ROPA Y MUEBLES
- Quijano de Rincón, Olga Amparo;** Kadamani Abiyoma, Samira; Gutiérrez-Valderrama, Jorge Enrique; Nemocón Farfán, Camilo Andrés 100 628  
ANÁLISIS CUANTITATIVO DE COLOR EN ECOSISTEMAS DE MONTAÑA EN COLOMBIA
- Rabal Almazor, Ana M.;** Ferrero Turrión, Alejandro; Campos Acosta, Joaquín; Pons Aglio, Alicia; Hernanz Sanjuán, M. Luisa 101 638  
INFLUENCIA DE UN ERROR FOTOMÉTRICO SISTEMÁTICO EN LA BRDF ESPECTRAL EN LA DETERMINACIÓN DEL COLOR DE RECUBRIMIENTOS CON EFECTOS ESPECIALES
- Remón, Laura;** Calatayud, Arnau; Ferrando, Vicente; Furlan, Walter; Monsoriu, Juan A. 102 648  
COMPORTAMIENTO CROMÁTICO DE LENTES INTRAOCULARES MULTIFOCALAS

- Rodríguez-Pulido, Francisco J;** Nogales-Bueno, Julio; Hernández-Hierro, José Miguel; González-Miret, M.  
103 654 Lourdes; Heredia, Francisco J.  
APLICACIÓN DE LA COLORIMETRÍA TRIESTÍMULO POR ANÁLISIS DE IMAGEN A LA  
MODELIZACIÓN DEL ÍNDICE DE MADURACIÓN DE SEMILLAS DE UVA PARA VINIFICACIÓN
- Romero, Javier;** Nieves, Juan Luis; Hernández-Andrés, Javier; Valero, Eva M.  
104 660 FRECUENCIAS ESPECTRALES Y CAPTURA DE IMÁGENES
- Sáiz Mauleón, Begoña;** González Aurignac, Esther; Santonja Llabata, Alfredo  
105 666 ANÁLISIS COLORIMÉTRICO DEL EFECTO DE LA RADIACIÓN LÁSER SOBRE PIEDRA  
BATEIG CREMA. DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD DE LA LIMPIEZA LÁSER PARA UNA  
GÁRGOLA DE LAS TORRES DE SERRANOS DE VALENCIA, ESPAÑA
- Salvador García, Elena;** García Valldecabres, Jorge  
107 677 LOS COLORES DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS EN EL EDIFICIO DE LA LLOTGETA DE  
VALENCIA
- Sanches, Miguel;** Loução, Dulce; Moreira da Silva, Fernando  
108 688 MIRANDO A LAS TEORÍAS DEL COLOR
- Sánchez, Alicia;** Muñoz de Luna, Javier; Micó, Sandra; Vázquez, Daniel; Álvarez, Antonio  
109 690 ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL BARNIZ SOBRE EL COLOR EN ESCULTURAS DE CERA: UN  
CASO PARTICULAR
- Sánchez-Carballido, S.;** Justo-María, C.; Meléndez, J.; López, F.  
110 698 ACTIVE THERMOGRAPHY: FINDING AND CHARACTERIZING HIDDEN DEFECTS INSIDE  
MATERIALS
- Serra Lluch, Juan;** Torres Barchino, Ana; De la Torre Fornés, Irene; Llopis Verdú, Jorge  
111 700 ¿QUÉ CLAVES CROMÁTICAS APORTA EL CONTEXTO PARA REDISEÑAR UNA SILLA?
- Stinco, Carla M;** Fernández-Vázquez, Rocío; Escudero-Gilete, M<sup>a</sup> Luisa; Heredia, Francisco J.; Meléndez-  
112 702 Martínez, Antonio J.; Vicario, Isabel M.  
ESPECTRORRADIOMETRIA VS. DIGITALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE IMÁGENES EN LA MEDIDA  
DEL COLOR DE ZUMOS DE DIFERENTES VARIEDADES DE NARANJA Y MANDARINA
- Suero, María Isabel;** Pardo, Pedro J.; Pérez, Ángel L.  
113 708 EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE RENDIMIENTO DE COLOR. CRI-CAM02UCS ANTE CAMBIOS  
DE MUESTRAS
- Torres Barchino, Ana;** Serra Lluch, Juan; Llopis Verdú, Jorge; Molina Siles, Pedro  
115 710 APLICACIONES CROMÁTICAS EN EL DISEÑO DE LOCALES COMERCIALES
- Tortajada, Ignacio;** Carrión, F. Javier; Aguilar, Mariano  
118 712 INFLUENCIA DE LA POLARIZACIÓN DE LA LUZ EN LA FRECUENCIA CRÍTICA DE FUSIÓN
- Urtubia Vicario, César**  
119 715 CÓDIGOS DE COLOR EN LOS ECOSISTEMAS
- Vázquez, D.;** Muñoz, J.; Álvarez, A.; Calopa, P.; Iruretagoyena, A.; Muro, C; García, J.  
120 720 CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL Y COLORIMÉTRICA DE ZONAS DE INTERÉS EN LA  
RESTAURACIÓN DE OBRAS DE ARTE: MUJER EN AZUL DE PICASSO
- Zapata Gonnella, María Fabiana**  
121 734 FRAGMENTOS DE COLOR: ACUMULACIONES RETINALES

# ¿Soluciona el CRI-CAM02UCS la subestimación de las fuentes LED blancas?.

## *Does CRI-CAM02UCS solve the underestimation of white LED sources?.*

**Pérez, Ángel L.** (1); Cordero, Eduardo (1); Pardo, Pedro J. (1); Suero, María Isabel (1).

(1) Grupo de Investigación Orión, Universidad de Extremadura, Avda. de Elvas s/n, 06071Badajoz  
aluis@unex.es

### **RESUMEN**

DESDE LA APARICIÓN DE LAS FUENTES DE LUZ BASADAS EN TECNOLOGÍA LED, SE VIENE OBSERVANDO QUE ESTE TIPO DE TECNOLOGÍA PONE EN SERIOS APRIETOS A LOS MÉTODOS ESTABLECIDOS PARA EVALUAR LA CALIDAD VISUAL DE LAS FUENTES DE LUZ BLANCA, EN ESPECIAL EN LO REFERENTE AL RENDIMIENTO DE COLOR [1]. CON LA APARICIÓN DEL CRI-CAM02UCS [2] SE INCORPORA EL MODELO DE APARIENCIA DEL COLOR CIECAM02, RECOMENDADO POR LA CIE, QUE PODRÍA SOLVENTAR ESTOS PROBLEMAS. SE PRESENTA UN ANÁLISIS DE LA VALORACIÓN QUE HACE ESTE ÍNDICE DEL RENDIMIENTO DE COLOR DE DOS FUENTES LED BLANCAS Y LA VALORACIÓN SUBJETIVA REALIZADA POR VARIOS OBSERVADORES.

### **ABSTRACT**

*SINCE THE EMERGENCE OF LIGHT SOURCES BASED ON LED TECHNOLOGY, IT COULD BE SEEN THAT THIS TECHNOLOGY PUTS SERIOUS STRAIN ON ESTABLISHED METHODS TO ASSESS THE VISUAL QUALITY OF THE WHITE LIGHT SOURCES, ESPECIALLY WITH REGARD TO COLOR RENDERING [1]. THE APPEARANCE OF CRI-CAM02UCS [2] THAT INCORPORATE THE COLOR APPEARANCE MODEL CIECAM02 RECOMMENDED BY THE CIE, COULD SOLVE THESE PROBLEMS. IN THIS WORK, WE SHOW AN ANALYSIS OF THE ASSESSMENT OF THE COLOR RENDERING PROPERTIES OF TWO WHITE LED SOURCES AND THE SUBJECTIVE EVALUATION BY SEVERAL OBSERVERS.*

## 11 CONCLUSIONES

1. Ningún indicador actual que mida la reproducción cromática, resuelve las diferencias encontradas entre los valores calculados y la percepción de naturalidad mostrada por los observadores.
2. No existe correlación entre el valor calculado de CRI, con las fuentes luminosas empleadas, y la capacidad de discriminación de color mostrada por los observadores.
3. Las fuentes de origen LED quedan especialmente penalizadas en el cálculo de CRI, ya experimentan mayor diferencia entre su valor de CRI y la valoración subjetiva de los observadores reales
4. En el rango de 2800K a 9800K, la temperatura de color a la que se alcanza la mayor capacidad de discriminación de color por parte de los observadores es 6500K.
5. El valor de CRI varía ante cambios en el conjunto de muestras y espacios de color empleados, especialmente en fuentes con un perfil espectral con picos, como es el caso de las primeras fuentes LED RGB, y en menor medida, por las fuentes LED blancas.
6. En la prueba de escalamiento de tono, los observadores no perciben esas diferencias de tono que el algoritmo de CRI calcula.

## 12 BIBLIOGRAFÍA

La bibliografía de este trabajo está recogida en la bibliografía de todas las publicaciones presentadas. Además, se presenta la siguiente:

1. CIE, Colour Rendering of White Light Sources, Publication no. 177 (Vienna: Central Bureau of the CIE, 2007).
2. Cordero, A.L. Pérez, P.J. Pardo, M.I. Suero y G. Martínez . Estudio de la variabilidad de color de muestras cromáticas del Atlas NCS ante cambios de iluminante. Libro de actas del IX Congreso Nacional del Color. Alicante 2010.
3. Guadalupe Martínez, Eduardo M. Cordero, Pedro J. Pardo, María Isabel Suero. Estudio experimental de la influencia de la temperatura de color de una fuente luminosa sobre la capacidad de discriminación del color de los observadores. Libro de actas de la X Reunión Nacional de Óptica. Zaragoza 2012.
4. Pardo, P.J, Cordero, E.M, Suero, M.I and Pérez, A.L. Influence of correlated color temperature of a light source on colour discrimination capability of observers. Proceedings of 21 st symposium of the International Color Vision Society (ICVS 2011). Noruega 2011.
5. Pardo, PJ, Cordero, EM, Suero, MI and Pérez, AL. Influence of the correlated color temperature of a light source on the color discrimination capacity of the observer. JOSA. Vol. 29. 2012.
6. Ángel L. Pérez, Eduardo Cordero, Pedro J. Pardo, María Isabel Suero. ¿Soluciona el CRI-CAM02UCS la subestimación de las fuentes LED blancas?. Libro de actas del X Congreso Nacional del Color. Valencia 2013.
7. E.M. Cordero, P. J. Pardo, A. L. Pérez and M. I. Suero. Correlation of various light source quality indices with the colour discrimination capacity. Coloration Technology. Vol.127 . 2011.
8. Norma UNE 12464.1.
9. CIE, Method for Measuring and Specifying Colour Rendering. Properties of Light Sources, Publication no. 13.3 (Vienna: Central Bureau of the CIE, 1995).
10. G. Wyszecki and W.S. Stiles, Color science: Concepts and methods, quantitative data and formulae, New York: Wiley, 1982 (2nd ed.)



- 
11. CIE, *Colorimetry*, 15:2004 (CIE, 2004)
  12. Judd, Deane B.; MacAdam, David L.; Wyszecki, Günter (1964). "Spectral Distribution of Typical Daylight as a Function of Correlated Color Temperature". *JOSA* 54 (8): 1031–1040.
  13. *Ann Physiol Anthropol.* 1992 Jan;11(1):37-43. The effect of color temperature of lighting sources on mental activity level.
  14. Oliver Keisa, Hannah Helbig, Judith Streba, Katrin Hillea. Influence of blue-enriched classroom lighting on students' cognitive performance. *Trends in Neuroscience and Education*. Vol. 3. 2014.
  15. CIE, *International Lighting Vocabulary*, Publication no. 17.4 (Vienna: Central Bureau of the CIE, 1987).
  16. Ohno, Yoshi (2006), "Optical metrology for LEDs and solid state lighting", in E. Rosas, R. Cardoso, J.C. Bermudez, O. Barbosa-Garcia, Fifth Symposium "Optics in Industry" 6046, pp. 604625–1–604625–8, doi:10.1117/12.674617