

Comparación entre iluminantes y fuentes simuladoras

A comparison between illuminants and light-source simulators

Rafael Roa^(1,S), Rafael Huertas^(1,S), Miguel Ángel López-Álvarez⁽²⁾,
Luis Gómez-Robledo⁽¹⁾ y Manuel Melgosa^(1,*,S)

¹ Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias (Edificio Mecenás), Campus de Fuentenueva, Universidad de Granada, 18071, Granada (España).

² Hewlett-Packard Española (LFP), Avda. Graells 501, 08174 Sant Cugat del Vallès, Barcelona (España).

* Email: mmelgosa@ugr.es

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Recibido / Received: 17 – Mar – 2008. Versión revisada / Revised version: 24 – Abr – 2008. Aceptado / Accepted: 25 – Abr – 2008

RESUMEN:

El objetivo de este trabajo es comparar las fuentes luminosas de distintas cabinas comerciales con los iluminantes a los que simulan mediante distintos parámetros: la temperatura de color correlacionada, el índice de rendimiento en color de la CIE, distintas métricas espectrales y las diferencias de color CIEDE2000 entre las muestras de la GretagMacbeth ColorChecker iluminadas bien con la fuente simuladora o con su correspondiente iluminante. En algunos casos las diferencias entre las fuentes y los iluminantes son importantes. Los mejores simuladores de los iluminantes D65 y A son los de la cabina GretagMacbeth Spectralight III. Por el contrario, es la cabina VeriVide CAC120 la que posee una mejor fuente simuladora del iluminante F11.

Palabras Clave: Fuentes de luz, Iluminantes, *CCT*, *CRI*, *CSCM*, *SCI*, *RMSE*, *WRMSE*, CIEDE2000.

ABSTRACT:

The goal of this paper is to compare the light sources provided by different commercial color-assessment cabinets with their corresponding illuminants, using different indices: the correlated color temperature, the CIE color rendering index, different spectral metrics, and the CIEDE2000 color-difference formula computing color differences for the GretagMacbeth ColorChecker samples under a given light source and its respective illuminant. Sometimes the differences between light sources and illuminants appear relevant. We found that the best simulators of D65 and A illuminants are those provided by the GretagMacbeth Spectralight III cabinet. However, the VeriVide CAC120 cabinet provides the best simulator of the F11 illuminant.

Key words: Light Sources, Illuminants, *CCT*, *CRI*, *CSCM*, *SCI*, *RMSE*, *WRMSE*, CIEDE2000.

REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] J. Schanda, *Colorimetry. Understanding the CIE System*, Chapter 3 (CIE Colorimetry), John Wiley & Sons, Inc. (2007).
- [2] J. Campos, E. Hita, J. Romero, M. Melgosa, J. M. Artigas, P. Capilla, A. Felipe, F. M. Verdú, J. Pujol, I. Negueruela, L. Jiménez del Barco, “Avances y tendencias recientes en colorimetría”, *Opt. Pura Apl.* **30-2**, 3-33 (1997).
- [3] E. Valencia, M. S. Millán, “El color en la imagen digital captada por cámara: un marco de referencia para el análisis colorimétrico de la imagen y sus aplicaciones”, *Opt. Pura Apl.* **40**, 253-265 (2007).
- [4] CIE 15:2004, 3rd Edition, *Colorimetry* (Technical report), CIE Central Bureau, Vienna (2004).
- [5] R. Huertas, R. Roa, M. A. López-Álvarez, L. Robledo, M. Melgosa, “Comparación entre fuentes simuladoras e iluminantes”, VIII Congreso Nacional de Color, Libro de Actas, 37-38, Madrid, España (2007).

- [6] R. Huertas, M. J. Rivas, M. Melgosa, M. Sánchez-Marañón, S. Bhosle, J. J. Damelinourt, "Uniformity of lighting in color assessment cabinets", 19th Congress of the International Commission for Optics (ICO XIX), SPIE Proceedings, Volume 4829, 879-880, Firenze, Italy (2002).
- [7] R. Huertas, M. J. Rivas, M. Melgosa, S. Bhosle, J. J. Damelinourt, M. Sánchez-Marañón "Influence of lighting uniformity in precise soil-color measurements", *Trends in Soil Science* **3**, 35-46 (2004).
- [8] F. H. Imai, M. R. Rosen, R. S. Berns, "Comparative study of metrics for spectral match quality", Proceedings of the First European Conference on Colour in Graphics, Imaging and Vision (Society for Imaging Science and Technology, Springfield, VA) 492-496 (2002).
- [9] J. A. S. Viggiano, "Metrics for evaluating spectral matches: a quantitative comparison", Proceedings of the Second European Conference on Colour in Graphics, Imaging and Vision (Society for Imaging Science and Technology, Springfield, VA) 286-291 (2004).
- [10] J. A. S. Viggiano, "A perception-referenced method for comparison of radiance ratio spectra and its application as an index of metamerism", Proceedings of AIC Color 01, The 9th Congress of the International Colour Association, NY, 701-704 (2004).
- [11] M. A. López-Álvarez, J. Hernández-Andrés, J. Romero, R. L. Lee Jr., "Designing a practical system for spectral imaging of skylight", *Appl. Opt.* **44**, 5688-5695 (2005).
- [12] <http://www.verivide.com>
- [13] <http://www.xrite.com>
- [14] R. Huertas, *Estudio sobre el Error Asociado a los Parámetros de Color CIELAB y CIELUV*, Memoria de Licenciatura, Universidad de Granada (2001).
- [15] <http://www.sedoptica.es/main.html>, "Vocabulario de color". Comité Español del Color. Sociedad Española de Óptica.
- [16] J. Fontecha, J. Campos, A. Corróns, A. Pons, "An analytical method for estimating correlated colour temperature uncertainty", *Metrologia*, **39**, 531-536 (2002).
- [17] J. Hernández-Andrés, R. L. Lee Jr., J. Romero, "Calculating correlated color temperatures across the entire gamut of daylight and skylight chromaticities", *Appl. Opt.* **38**, 5703-5709 (1999).
- [18] CIE Publication 13.3-1995, *Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources* (Technical report), CIE Central Bureau, Vienna (1995).
- [19] F. M. Verdú, J. Pujol, "Revisión del cálculo del rendimiento en color de fuentes luminosas", *Opt. Pura Apl.* **33-1**, 17-43 (2000).
- [20] CIE Publication 17.4-1987, *International Lighting Vocabulary*, CIE Central Bureau, Vienna (1987).
- [21] CIE Publication 142-2001, *Improvement to Industrial Colour-Difference Evaluation* (Technical report), CIE Central Bureau, Vienna (2001).
- [22] M. Melgosa, M. M. Pérez, A. Yebra, R. Huertas, E. Hita, "Some reflections and recent international recommendations on color-difference evaluation", *Opt. Pura Apl.*, **34**, 1-10 (2001).
- [23] J. Hernández-Andrés, J. Romero, R. L. Lee, Jr., "Colorimetric and spectroradiometric characteristics of narrow-field-of-view clear skylight in Granada, Spain", *J. Opt. Soc. Am. A*, **18**, 412-420 (2001).
- [24] J. J. Michalsky, "Estimation of continuous solar spectral distributions from discrete filter measurements: II. A demonstration of practicability", *Sol. Energy* **34**, 439-445 (1985).
- [25] P. A. García, R. Huertas, M. Melgosa, G. Cui, "Measurement of the relationship between perceived and computed color differences", *J. Opt. Soc. Am. A* **24**, 1823-1829 (2007).

1. Introducción

En primera aproximación, dentro de lo que se conoce como colorimetría básica [1], el color percibido de un objeto depende de tres factores: el observador, el propio objeto y la fuente de iluminación [2,3]. Con el objetivo de estandarizar las coordenadas de color y facilitar el intercambio de información y la comparación entre laboratorios, la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) recomienda utilizar unos patrones tanto para el

observador como para la fuente de iluminación [4]. De esta forma la especificación del color (los valores triestímulos en particular) sólo dependerá de la reflectancia espectral (o transmitancia espectral, en su caso) del objeto. Para el observador la CIE establece, mediante las funciones de mezcla, los Observadores Patrón 1931 o 1964, dependiendo del ángulo subtendido por la muestra. Como fuentes de iluminación la CIE propone diversas distribuciones espectrales relativas, llamadas iluminantes.

Históricamente los iluminantes recomendados por la CIE son los siguientes: A, C, D50, D55, D65 y D75 [4], a los que se han añadido más recientemente otros iluminantes que representan típicas lámparas fluorescentes: iluminantes FL1 a FL12 [4]. Actualmente la CIE también proporciona las distribuciones espectrales de nuevas lámparas fluorescentes (FL3.1 a FL3.15) y de lámparas de descarga de alta presión (HP1 a HP5).

En las medidas instrumentales del color mediante espectrofotómetros o colorímetros, la mayoría de los dispositivos permiten elegir el Observador Patrón y el iluminante. Sin embargo, en experimentos visuales son necesarias algunas consideraciones. Por un lado, hemos de asegurarnos de que el observador no tiene visión defectiva del color, mediante alguno de los test usuales (Ishihara, Farnsworth-Munsell, etc.), y suponer entonces que sus funciones de mezcla pueden representarse, a efectos de cálculo, por las de un Observador Patrón. No es nuestro objetivo en este trabajo abordar esta cuestión. Por otro lado, en cuanto a la fuente de luz, se ha de utilizar una que reproduzca los datos espectrales del iluminante que queramos emplear: habitualmente luz-día para exteriores, o iluminante A o fluorescentes para interiores. Con esta intención se usan las cabinas de luz, equipadas con fuentes simuladoras de algunos de los iluminantes.

El objetivo de este trabajo es estudiar las fuentes de luz de cuatro cabinas comerciales, y compararlas con los iluminantes a los que simulan, ampliando los resultados de un trabajo anterior [5]. En otros trabajos previos se ha abordado de forma parcial el estudio de la variabilidad de color obtenida en algunas de estas cabinas comerciales [6,7]. Usaremos distintas magnitudes que nos darán idea de cuán aproximadas son las fuentes al iluminante que simulan. Podremos obtener una primera comparación cualitativa mediante la representación gráfica de la distribución espectral relativa de cada fuente superpuesta con su iluminante. Para realizar cuantitativamente una comparación espectral de las fuentes con sus iluminantes correspondientes utilizaremos distintas métricas espectrales previamente descritas en la literatura [8-11]. También realizaremos una comparación entre fuentes e iluminantes calculando, para cada fuente, su temperatura de color correlacionada (*CCT*) y comparándola con la del iluminante asociado. Calcularemos también el índice CIE de rendimiento en color (*CRI*). Finalmente, mediante el cálculo de diferencias de color, comprobaremos cómo varía el color de las 24 muestras de la carta GretagMacbeth en función de que empleemos para iluminarlas un iluminante o su fuente simuladora asociada.

2. Metodología

En la Tabla I se especifican las cabinas estudiadas en este trabajo y las fuentes luminosas existentes en cada una de ellas.

TABLA I

Cabinas usadas y fuentes provistas en cada una de ellas. En este trabajo empleamos sólo las indicadas en las 3 primeras filas.

VeriVide CAC120	VeriVide Portable	VeriVide CAC60	GretagMacbeth Spectralight III
D65	D65	D65	D65
F	F	F	A
TL84	TL84	TL84	TL84
UV	UV	D50 UV	CWF Horizon UV

Las fuentes D65 intentan reproducir el iluminante D65 (luz día con temperatura de color correlacionada de 6500K). En el caso de las cabinas de la marca VeriVide la fuente D65 se realiza mediante tubos fluorescentes, mientras que en la cabina GretagMacbeth se simula el iluminante D65 a partir de lámparas halógenas de incandescencia y filtros apropiados. La fuente D50, importante en artes gráficas, simula al iluminante D50 (luz día con temperatura de color correlacionada igual a 5000K) mediante tubos fluorescentes. Las fuentes A y F son lámparas de incandescencia y representan ambas al iluminante A (lámpara incandescente con filamento de tungsteno y temperatura de color de 2856K). La designación comercial de fuentes F usada por VeriVide [12] es a nuestro juicio poco apropiada, pues induce a pensar que se trata de fuentes fluorescentes, cuando en realidad son fuentes incandescentes simuladoras del iluminante A. Las fuentes luminosas TL84 y CWF son de tipo fluorescente y simulan a los iluminantes F11 (lámpara fluorescente trifósforo de banda estrecha con temperatura de color de 4000K) y F2 (fluorescente blanco frío con temperatura de color de 4100K), respectivamente. Todas nuestras cabinas disponen también de una fuente ultravioleta UV. La cabina GretagMacbeth posee asimismo una fuente denominada "Horizon" que simula luz de horizonte, que no tiene correspondencia con ningún iluminante de la CIE [13].

De todas las fuentes provistas en las cuatro cabinas citadas anteriormente (Tabla I), en este estudio hemos empleado únicamente las D65, A (o F en su caso) y TL84.

Las fuentes correspondientes a las cabinas VeriVide CAC 60 y GretagMacbeth Spectralight III han tenido un uso controlado y las medidas que aquí presentamos se realizaron cuando contaban con 100 horas de uso. Por el contrario, las fuentes de las dos cabinas restantes, VeriVide CAC 120 y VeriVide Portable, fueron usadas anteriormente a nuestro estudio durante un número de horas elevado e indeterminado, presentando no obstante un buen estado de conservación.

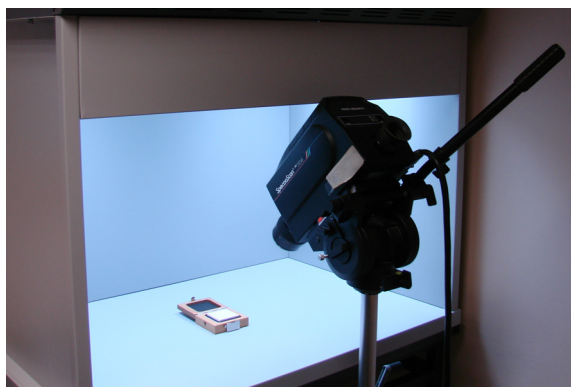


Fig. 1. Montaje experimental: espectrorradiómetro PR-704 y superficie difusora colocada en el centro de la cabina GretagMacbeth Spectralight III. En las otras cabinas el montaje experimental es completamente análogo.

Para la medida de la radiancia espectral de las distintas fuentes (Fig. 1) se ha utilizado un espectrorradiómetro Photo Research SpectraScan PR-704, que mide en el rango de 380 a 780 nm con un paso de 2 nm. La precisión del espectrorradiómetro es del 5% en la medida de la radiancia espectral, según la información proporcionada por el fabricante. En un trabajo anterior [14] hemos estudiado las incertidumbres en la medida de los valores triestímulos con este instrumento, obteniendo que, en la mayoría de los casos, son muy pequeñas, y siempre en torno a un orden de magnitud por debajo del umbral visual de discriminación de color de observadores normales.

Las medidas se han realizado sobre un blanco de referencia PTFE (del tipo de los conocidos comercialmente como Algoflon, Halon, o Spectralon), suministrado por el fabricante del espectrorradiómetro y colocado en el centro geométrico de cada una de las cabinas. Hemos considerado este blanco de referencia como un difusor perfecto. Según el fabricante, la reflectancia de este blanco es del $(98 \pm 2)\%$ en el rango visible e infrarrojo cercano. Estos datos están de acuerdo con la medida realizada de la reflectancia del blanco en un trabajo previo [14], donde obtuvimos que es

prácticamente constante y superior al 97% en todo el rango visible.

Después de 30 minutos de calentamiento de las fuentes y del espectrorradiómetro se realizó la medida de la radiancia espectral de la superficie difusora con la opción de tres ciclos: tres medidas consecutivas independientes, de las que se toma en adelante el promedio de las mismas (el instrumento no da la dispersión de esas medidas).

Hemos normalizado las distribuciones espectrales medidas de las fuentes luminosas, de forma que presenten área unidad. Hemos realizado la misma normalización en las distribuciones espectrales tabuladas de los iluminantes [4]. Este modo de proceder es habitual cuando se emplean métricas espectrales [11].

Hemos comparado las fuentes y sus respectivos iluminantes de diversos modos. Por un lado, hemos representado gráficamente las distribuciones espectrales normalizadas para cada una de las fuentes estudiadas junto con los valores normalizados para sus iluminantes asociados. Mediante la observación de estas gráficas podemos estudiar cualitativamente las diferencias de los perfiles espectrales, dándonos una primera idea aproximada de si las fuentes son o no buenos simuladores. Para una comparación cuantitativa de las distribuciones espectrales de fuentes e iluminantes hemos utilizado distintas métricas espectrales, cuyas expresiones matemáticas se detallan en un anexo al final del texto. Mediante la métrica *RMSE* [8] hemos evaluado el error cuadrático medio entre la curva espectral de la fuente y la del iluminante. También hemos empleado otras dos métricas propuestas para comparar dos espectros que tienen en cuenta propiedades del sistema visual humano. Por un lado, la métrica *WRMSE* [8,9], que añade a la métrica *RMSE* la diagonal de la matriz *R* propuesta por Cohen para proporcionar una medida del error espectral, en la que se dan mayores pesos a aquellas longitudes de onda donde el sistema visual humano es más sensible. Por otro lado, el índice de comparación espectral *SCI* propuesto por Viggiano [10], que es una métrica espectral que tiene en cuenta algunas características del espacio CIELAB. Por último, también hemos utilizado la métrica *CSCM* [11], desarrollada en nuestro Departamento, que consiste en una combinación apropiada de distintas métricas teniendo en cuenta los efectos espectrales, colorimétricos y de irradiancia integrada entre dos determinados espectros a comparar. En la métrica *CSCM* se incluye la diferencia de color CIELAB de la superficie difusora (blanco de referencia) iluminada por las dos distribuciones

espectrales comparadas. En nuestro caso, para el iluminante (pero no para la fuente simuladora) obtenemos para dicha superficie difusora coordenadas $L^*=100$; $a^*=0$; $b^*=0$, pues ha sido tomado como blanco de referencia en el cálculo de las coordenadas CIELAB.

Para todas estas métricas, un acuerdo perfecto entre fuente e iluminante se corresponde con un valor cero de las mismas, empeorando dicho acuerdo a medida que sus valores aumentan. Todas estas métricas no tienen límite superior. Es importante recordar que hemos normalizado las gráficas de las distribuciones espectrales de las distintas fuentes e iluminantes de forma que el área encerrada bajo cada una de las curvas tenga valor unidad. Este procedimiento de normalización es el usual a la hora de trabajar con métricas de comparación entre valores espectrales. Los valores de dichas métricas dependen de la radiancia total de las fuentes o iluminantes y por tanto, no permanecen invariantes si se emplea otra normalización. En general no hay una relación matemática entre los resultados de las distintas métricas mencionadas. Además no es apropiado comparar los resultados de cualquier métrica con dos fuentes que simulan diferentes iluminantes. Por lo tanto, en este trabajo sólo compararemos con cada una de las métricas las fuentes que simulan a un mismo iluminante.

Por otro lado, también comparamos la temperatura de color correlacionada (*CCT*) de las fuentes luminosas y sus iluminantes correspondientes. La temperatura de color correlacionada es “la temperatura de un radiador completo cuyo color percibido se parece mucho al del estímulo dado, en condiciones de observación especificadas y tiene la misma luminosidad” [15]. Es posible calcular la *CCT* por diferentes métodos, entre ellos Fontecha et al. [16] proponen un procedimiento para calcularla junto con su incertidumbre propagada desde las coordenadas de cromaticidad CIE 1960 (u,v). En este trabajo para calcular la *CCT* hemos seguido el procedimiento empleado por Hernández-Andrés et al. [17], que proporciona valores coherentes con los del software de nuestro espectrorradiómetro.

Asimismo también hemos calculado el índice CIE de rendimiento en color (*CRI*) de las fuentes estudiadas [18,19]. El rendimiento en color da idea del efecto de una fuente luminosa sobre la apariencia de color de objetos mediante una comparación con su apariencia bajo un iluminante de referencia [20]. Para el cálculo del *CRI* de la CIE [18] se utilizan las reflectancias espectrales de un conjunto de 8 muestras Munsell, cuyas coordenadas de color se calculan bajo la fuente y el iluminante de referencia. Como iluminante de referencia, la CIE recomienda

emplear un radiador planckiano si la *CCT* es inferior a 5000K y un iluminante natural (Daylight) si es superior, procurando que la cromaticidad de la fuente y el iluminante sean lo más parecidas posibles [18]. En este trabajo hemos utilizado como iluminante de referencia el iluminante asociado a cada fuente luminosa. De esta forma este índice nos compara, desde el punto de vista de la reproducción del color, cada fuente luminosa con su iluminante correspondiente. El valor del *CRI* será más alto cuanto más parecido sea el color de las muestras Munsell bajo la fuente simuladora y el iluminante correspondiente.

Por último, considerando las 24 muestras de la carta ColorChecker de GretagMacbeth, hemos calculado diferencias de color empleando la última fórmula recomendada por la CIE, CIEDE2000 [21]. Las reflectancias de las muestras de la citada carta se obtuvieron a partir de medidas espectrorradiométricas con la fuente D65 de la cabina VeriVide Portable. Las diferencias de color se han calculado para cada muestra, considerando sus coordenadas cuando se ilumina con la fuente o el iluminante correspondiente. De este modo podremos comparar las fuentes y sus iluminantes asociados desde la perspectiva del cambio de color percibido en diferentes objetos.

3. Resultados y discusión

3.a. Comparación espectral

En la Fig. 2 se muestran las radiancias espectrales de las distintas fuentes luminosas estudiadas junto con la distribución espectral de los iluminantes a los que simulan.

En el caso de las fuentes que simulan al iluminante D65, podemos observar como la fuente D65 de la cabina GretagMacbeth Spectralight III representa de forma más fidedigna al iluminante. Por el contrario, para las fuentes D65 de las cabinas de la marca VeriVide, la comparación visual entre las distintas curvas muestra un gran desacuerdo con el iluminante, debido a que éstas están realizadas mediante tubos fluorescentes y por tanto presentan una serie de picos que las distinguen del iluminante. Para las fuentes que simulan al iluminante A, el máximo acuerdo se produce también con la fuente de la cabina Spectralight III. Las fuentes de las cabinas de la marca VeriVide tienen unas distribuciones espectrales que difieren algo más del iluminante, siendo la de la cabina CAC 60 la más similar al iluminante y la de la cabina Portable la más diferente. Puesto que las fuentes simuladoras del iluminante A de las cabinas VeriVide son del mismo tipo, las diferencias entre ellas pueden

atribuirse al diferente número de horas de uso de cada fuente. En el caso de las fuentes TL84, son muy similares al iluminante F11 en todos los casos. Si tuviéramos que destacar una fuente concreta como la mejor simuladora del iluminante F11, elegiríamos de nuevo la de la cabina Spectralight III ya que los valores en los picos son los más aproximados al iluminante.

La comparación de las curvas espectrales mediante los índices que hemos comentado en la sección anterior, nos proporciona un análisis cuantitativo de las diferencias entre fuentes e iluminantes. En la Tabla II presentamos los valores calculados para las diferentes métricas. Se destacan en cursiva con negrita los valores máximos (peores simuladores), y en negrita los mínimos de cada índice (mejores simuladores).

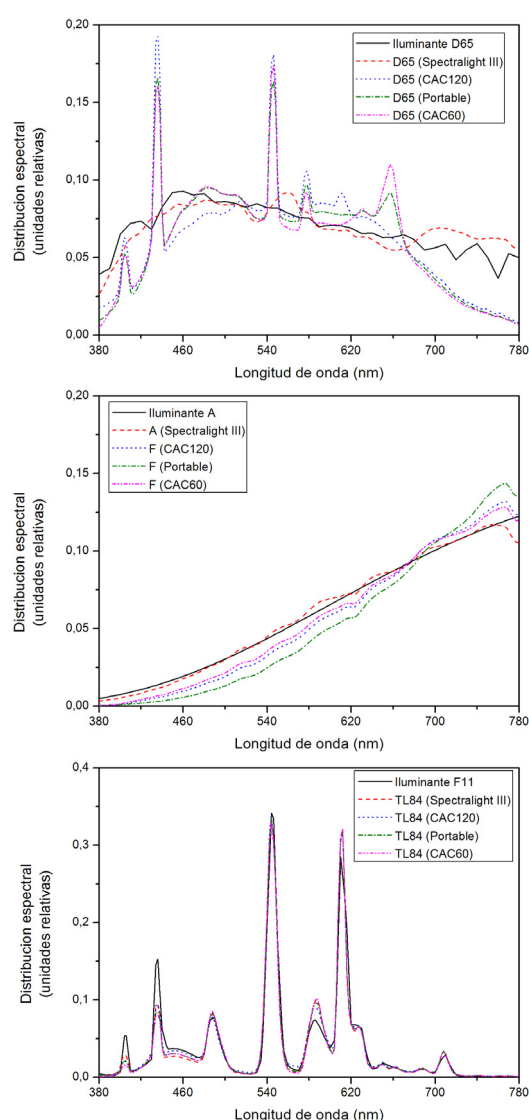


Fig. 2. Distribuciones espectrales relativas de las fuentes e iluminantes estudiados.

TABLA II

Resultados de distintas métricas que permiten comparar los distintos iluminantes con sus fuentes simuladoras.

Fuente	<i>RMSE</i>	<i>WRMSE</i>	<i>SCI</i>	<i>CSCM</i>
D65 (SL III)	0.121	0.0110	0.044	7.36
D65 (CAC120)	0.390	0.0565	0.243	28.74
D65 (Portable)	0.365	0.0437	0.177	22.94
D65 (CAC60)	0.379	0.0441	0.178	22.42
A (SL III)	0.0436	0.0041	0.0099	9.40
F (CAC120)	0.1182	0.0162	0.0354	40.60
F (Portable)	0.1996	0.0270	0.0481	63.50
F (CAC60)	0.0909	0.0122	0.0283	32.65
TL84 (SL III)	0.173	0.0314	0.135	26.07
TL84 (CAC120)	0.165	0.0292	0.130	17.22
TL84 (Portable)	0.177	0.0317	0.134	24.37
TL84 (CAC60)	0.191	0.0338	0.143	26.02

Para el caso de las fuentes que simulan al iluminante D65, puede verse cómo los valores más pequeños en todas las métricas se consiguen con la fuente de la cabina Spectralight III, como esperábamos al observar la Fig. 2. Los valores para las fuentes de las cabinas de la marca VeriVide son similares entre sí y bastante más elevados. Este mismo comportamiento se vuelve a reproducir con las fuentes luminosas que simulan al iluminante A. Nuevamente tenemos que el mejor simulador es el de la cabina Spectralight III, aunque en esta ocasión los valores proporcionados por la cabina CAC 60 de la marca VeriVide son mejores que los del resto de cabinas de la misma marca, lo que puede deberse a que la fuente de esta cabina ha sido empleada durante un número de horas inferior a las fuentes de las cabinas VeriVide CAC 120 y Portable. Finalmente, en el caso de las fuentes simuladoras del iluminante F11, los resultados son más parecidos entre sí que en los dos casos anteriores, siendo reseñable que en esta ocasión, según las distintas métricas, la fuente luminosa de la cabina CAC 120 es la más similar al iluminante, contrariamente a lo que cabría esperar a partir de la simple comparación visual de las distribuciones espectrales (Fig. 2).

3.b. Temperatura de color correlacionada e índice CIE de rendimiento en color

En la Tabla III mostramos los valores calculados para la temperatura de color correlacionada (*CCT*) y para el índice CIE de rendimiento en color (*CRI*). De nuevo destacamos en cursiva con negrita los peores simuladores, y en negrita los mejores.

La temperatura de color correlacionada para el iluminante D65 tiene un valor de 6500K, por lo que

podemos ver que nuevamente, la fuente luminosa que más se parece a su iluminante en este caso es la de la cabina Spectralight III, seguida por la de la cabina CAC 60. Para el caso del iluminante A, la temperatura de color correlacionada es de 2856K, obteniéndose nuevamente que la fuente luminosa que mejor reproduce a su iluminante es la fuente de la cabina Spectralight III, también seguida en este caso, por la de la cabina CAC 60. Por último, para el iluminante F11, la temperatura de color correlacionada es de 4000K, siendo la cabina Spectralight III la que proporciona el peor resultado de todos, si bien debemos observar que con las fuentes de las cuatro cabinas se obtienen valores de *CCT* muy similares entre sí.

El índice CIE de rendimiento en color (*CRI*) tanto para las fuentes que simulan al iluminante D65, como para las que simulan al iluminante A, es máximo para la cabina Spectralight III, seguido por los valores proporcionados por la cabina CAC 60. Observamos que mientras que para los simuladores de los iluminantes D65 y F11, todas las cabinas tienen valores de *CRI* bastante buenos (próximos a 100), para los simuladores de iluminante A de las cabinas CAC 120 y Portable se obtienen resultados poco aceptables. Nuevamente las horas de uso de las fuentes pueden ser la causa de estas diferencias. Finalmente, los simuladores del iluminante F11 tienen un mismo *CRI* para las cuatro fuentes de las cabinas estudiadas.

TABLA III

Temperatura de color correlacionada (*CCT*) e índice CIE de rendimiento en color (*CRI*) para las fuentes.

Fuente	<i>CCT</i> (K)	<i>CRI</i>
D65 (SL III)	6263	95
D65 (CAC120)	5426	91
D65 (Portable)	5772	94
D65 (CAC60)	5992	94
A (SL III)	2822	98
F (CAC120)	2434	87
F (Portable)	2199	78
F (CAC60)	2527	91
TL84 (SL III)	3663	97
TL84 (CAC120)	3759	97
TL84 (Portable)	3733	97
TL84 (CAC60)	3705	97

3.c. Diferencias de color CIEDE2000

Hemos calculado las diferencias de color existentes para cada una de las 24 muestras de la carta ColorChecker de GretagMacbeth al emplear una fuente luminosa y el iluminante al que simula dicha fuente. En la Tabla IV mostramos los resultados.

Si consideramos los valores medios de las diferencias de color de las 24 muestras, se puede observar que las menores diferencias de color para las fuentes que simulan a los iluminantes D65 y A se consiguen con la cabina Spectralight III. Por el contrario, tenemos que el mejor simulador para el iluminante F11 es el existente en la cabina CAC 120.

De forma global, la cabina GretagMacbeth Spectralight III ofrece unos buenos resultados en todas sus fuentes luminosas a la hora de reproducir el color de las muestras de la carta ColorChecker de la forma más parecida a como lo hace el iluminante, ya que en promedio, las diferencias de color no superan el valor de 1 unidad CIEDE2000. Más concretamente, en el caso de las fuentes D65 y A de esta cabina, no obtenemos en ninguna muestra de la carta diferencias de color mayores a 1 unidad CIEDE2000. En cambio con la fuente TL84, sí se obtienen diferencias de color mayores para algunas muestras de la carta. Trabajos anteriores establecían valores determinados para el umbral de discriminación cromática con la fórmula de diferencia de color CIELAB [22]. Aunque no se ha calculado este umbral para diferencias de color CIEDE2000, podemos esperar que diferencias de color superiores a 1 unidad CIEDE2000 serán visualmente perceptibles en comparaciones simultáneas para cualquier zona del espacio de color. En general, vemos que las muestras con mayores diferencias de color para la fuente TL84 son las de tonalidades azules (muestras 8 y 13). Esto se debe a que las mayores diferencias espectrales entre las distribuciones de fuente e iluminante aparecen en las cortas longitudes de onda.

Las cabinas CAC 120 y Portable, con mayor número de horas de uso, presentan en promedio diferencias de color superiores a 1 unidad CIEDE2000, para la comparación entre sus fuentes F y el iluminante A. Los peores resultados se dan para las muestras con tonalidades próximas a las medias y largas longitudes de onda, ya que en dichas regiones es donde más se diferencian las distribuciones espectrales de esta fuente e iluminante. En el caso de las fuentes D65 y TL84, las diferencias de color en promedio no son superiores a 1 unidad CIEDE2000, pero sí lo son para algunas de las muestras, concretamente las de tonalidades azules. Nuevamente esto es debido a que, en el caso de la fuente TL84, espectralmente los picos presentan mayores diferencias para las cortas longitudes de onda. Para las fuentes D65, al estar realizadas en estas cabinas mediante lámparas fluorescentes, aparecen también una serie de picos, más acusados en las cortas y medias longitudes de onda que provocan estas mayores diferencias de color para dichas tonalidades.

TABLA IV

Diferencias de color en unidades CIEDE2000 para cada una de las 24 muestras de la carta ColorChecker de GretagMacbeth iluminadas por la fuente simuladora y por su iluminante asociado. En las dos últimas filas se da el promedio de las diferencias de color de todas las muestras y su desviación estándar.

	Spectralight III			CAC 120			Portable			CAC 60		
	D65	A	TL84	D65	F	TL84	D65	F	TL84	D65	F	TL84
1	0.24	0.05	0.53	0.46	1.13	0.32	0.64	2.06	0.66	0.98	0.82	0.71
2	0.21	0.08	0.60	0.49	0.85	0.35	0.85	1.61	0.74	1.13	0.60	0.78
3	0.28	0.21	1.78	0.88	0.67	1.23	1.21	1.11	1.85	1.21	0.53	2.03
4	0.49	0.20	0.54	0.60	0.71	0.44	0.53	1.13	0.53	0.44	0.58	0.59
5	0.54	0.33	1.70	1.26	0.27	1.25	1.08	0.47	1.68	0.65	0.29	1.84
6	0.45	0.51	0.82	0.38	2.55	0.71	0.43	4.13	0.90	0.42	2.03	1.08
7	0.38	0.15	1.00	1.19	2.14	0.63	0.88	3.80	1.21	1.37	1.56	1.31
8	0.60	0.54	3.06	2.11	1.23	2.21	2.18	1.45	3.06	1.78	1.12	3.33
9	0.54	0.14	0.55	0.56	2.75	0.30	0.63	4.88	0.39	0.79	2.04	0.55
10	0.53	0.44	1.46	1.59	1.63	1.10	0.62	2.57	1.30	0.10	1.35	1.43
11	0.69	0.37	1.30	0.99	1.02	0.99	0.84	1.64	1.26	0.50	0.85	1.39
12	0.41	0.16	1.49	1.27	1.32	1.00	0.95	2.40	1.71	1.27	0.95	1.87
13	0.70	0.72	3.49	2.39	1.97	2.57	2.36	2.40	3.49	1.90	1.75	3.79
14	0.68	0.46	0.79	0.84	2.05	0.60	0.43	3.43	0.77	0.21	1.63	0.90
15	0.57	0.18	0.07	0.53	2.90	0.21	0.79	5.33	0.35	1.23	2.07	0.24
16	0.23	0.34	1.75	0.98	0.72	1.23	1.20	1.19	1.89	1.20	0.61	2.09
17	0.75	0.31	0.58	0.69	2.54	0.53	0.35	4.45	0.55	0.80	1.93	0.70
18	0.56	0.41	1.49	1.49	2.39	0.96	0.87	3.94	1.53	0.79	1.86	1.70
19	0.11	0.12	0.06	0.32	0.38	0.16	0.41	0.46	0.16	0.35	0.34	0.22
20	0.05	0.03	0.02	0.09	0.12	0.05	0.11	0.13	0.04	0.10	0.10	0.06
21	0.01	0.01	0.07	0.03	0.09	0.04	0.05	0.15	0.05	0.06	0.07	0.05
22	0.04	0.01	0.04	0.02	0.08	0.01	0.05	0.12	0.03	0.09	0.06	0.03
23	0.03	0.01	0.04	0.02	0.05	0.01	0.04	0.08	0.04	0.07	0.04	0.03
24	0.01	0.01	0.00	0.02	0.04	0.01	0.02	0.06	0.01	0.05	0.03	0.01
Prom.	0.38	0.24	0.97	0.80	1.23	0.70	0.73	2.04	1.01	0.73	0.97	1.11
D.E.	0.25	0.20	0.94	0.65	0.97	0.67	0.60	1.68	0.94	0.56	0.72	1.02

Finalmente, con la cabina CAC 60 las diferencias de color más elevadas se obtienen para la fuente TL84, y en promedio están próximas a 1 unidad CIEDE2000. Las muestras que presentan mayores diferencias de color son las mismas que en las otras dos cabinas de la marca VeriVide.

También puede observarse en la Tabla IV que, en todos los casos, las muestras acromáticas (números 19 a 24) son las menos sensibles al cambio entre fuente e iluminante.

4. Conclusiones

En la comparación entre fuentes e iluminantes, abordada en este artículo desde diferentes enfoques, podemos concluir que la cabina GretagMacbeth

Spectralight III es la que dispone de un mejor simulador para el iluminante D65. Esto se debe a que dicha fuente está realizada mediante una lámpara halógena incandescente y filtros apropiados, mientras que las fuentes D65 de las cabinas de la marca VeriVide están fabricadas con lámparas fluorescentes, cuyo perfil espectral se adapta peor al del iluminante. La cabina Spectralight III dispone asimismo de la mejor fuente simuladora del iluminante A. Para estos dos iluminantes, la cabina CAC 60 ofrece resultados mejores que las otras dos cabinas de la marca VeriVide. Por el contrario, es la cabina CAC 120 con su fuente TL84 la que consigue los mejores resultados a la hora de reproducir el iluminante F11.

Es también destacable que los distintos índices empleados para evaluar la similitud entre fuentes e iluminantes dan resultados altamente coherentes entre sí.

Como las fuentes luminosas de las cabinas VeriVide para cada iluminante concreto son del mismo tipo, las variaciones de los parámetros calculados en este trabajo pueden deberse en buena parte al distinto número de horas de uso de dichas fuentes. Como trabajo futuro puede ser interesante estudiar cómo evolucionan con el envejecimiento de las fuentes los distintos índices de similitud fuente-iluminante. De este modo, podríamos saber en qué momento las fuentes simulan mejor a los iluminantes y cuándo dichas fuentes se apartan ostensiblemente de su iluminante, con lo que dejarían de ser “válidas” para cálculos colorimétricos rigurosos.

Anexo: Métricas de comparación de valores espectrales

En este anexo expondremos brevemente cada una de las métricas espectrales utilizadas en este trabajo.

La métrica *RMSE* [8] mide la distancia entre dos curvas experimentales, es decir, da el error cuadrático medio entre las distribuciones espectrales. Esta métrica es pues de carácter puramente espectral, y viene dada por la ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (S(\lambda_i) - S'(\lambda_i))^2} \quad (1)$$

donde $S(\lambda)$ y $S'(\lambda)$, en nuestro caso serán las distribuciones espectrales de iluminante y fuente, respectivamente y n será igual al número de longitudes de onda para las cuales disponemos de valores de la distribución espectral de fuente e iluminante. Mantendremos esta misma notación para todas las métricas que a continuación se exponen.

Otra de las métricas empleadas es el coeficiente de bondad del ajuste *GFC* (Goodness Fit Coefficient) [8,9,23]. El *GFC* es una métrica espectral que mide el coseno del ángulo entre dos curvas espectrales, entendidas éstas como vectores en un espacio euclídeo n -dimensional. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$GFC = \frac{\left| \sum_{i=1}^n S(\lambda_i) S'(\lambda_i) \right|}{\left| \sum_{i=1}^n [S(\lambda_i)]^2 \right|^{1/2} \left| \sum_{i=1}^n [S'(\lambda_i)]^2 \right|^{1/2}} \quad (2)$$

Aunque tanto la métrica *RMSE* como la *GFC* son capaces de distinguir entre metámeros, no tienen en

cuenta las características de la visión humana. Se han desarrollado otras métricas espectrales que sí tienen en cuenta algunas de estas características. Entre ellas, podemos citar la métrica *WRMSE* [8,9] (Weighted Root Mean Square Error), que es una medida del error espectral en la que se dan mayores pesos a aquellas longitudes de onda en las que el ojo humano es más sensible. Esto se consigue mediante la matriz de Cohen, R . La expresión de este índice es la siguiente:

$$WRMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n R(i) (S(\lambda_i) - S'(\lambda_i))^2} \quad (3)$$

donde $R(i)$ es la diagonal de la matriz de Cohen, R , que se calcula mediante la ecuación:

$$R = A \cdot \text{inv}(A^t \cdot A) \cdot A^t \quad (4)$$

siendo A la matriz de las funciones de mezcla correspondientes al observador empleado. El superíndice t indica transposición de matrices, e “inv” la matriz inversa.

El índice de comparación espectral de Viggiano, *SCI* (Spectral Comparison Index) [10], es una métrica que tiene en cuenta algunas características del espacio CIELAB.

$$SCI = \sum_{i=1}^n w(\lambda_i) |\Delta\beta(\lambda_i)| \quad (5)$$

donde $\Delta\beta(\lambda_i)$ es la diferencia entre los dos espectros a comparar, $S(\lambda_i) - S'(\lambda_i)$, y:

$$w(\lambda_i) = \sqrt{\left(\frac{dL^*}{d\beta(\lambda_i)} \right)^2 + \left(\frac{da^*}{d\beta(\lambda_i)} \right)^2 + \left(\frac{db^*}{d\beta(\lambda_i)} \right)^2} \quad (6)$$

donde las derivadas de L^* , a^* y b^* con respecto a $\beta(\lambda_i)$ se calculan mediante la regla de la cadena:

$$\begin{aligned} \frac{dL^*}{d\beta(\lambda_i)} &= 116 k S(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \frac{d}{dY} f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \\ \frac{da^*}{d\beta(\lambda_i)} &= 500 k S(\lambda_i) \cdot \\ &\cdot \left[\bar{x}(\lambda_i) \frac{d}{dX} f\left(\frac{X}{X_n}\right) - \bar{y}(\lambda_i) \frac{d}{dY} f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \\ \frac{db^*}{d\beta(\lambda_i)} &= 200 k S(\lambda_i) \cdot \\ &\cdot \left[\bar{y}(\lambda_i) \frac{d}{dY} f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - \bar{z}(\lambda_i) \frac{d}{dZ} f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

donde:

$$\frac{d}{du} f\left(\frac{u}{u_n}\right) = \begin{cases} \frac{7.787}{u_n} & \text{si } \frac{u}{u_n} \leq 0.008856 \\ \frac{1}{3u} f\left(\frac{u}{u_n}\right) & \text{si } \frac{u}{u_n} > 0.008856 \end{cases} \quad (8)$$

donde u debe sustituirse por los valores triestímulos X, Y, Z y u_n por los valores triestímulos del blanco de referencia.

Disponemos también de otro tipo de métricas, como la métrica $IRE(\%)$ (Integrated Radiance Error) [24] que es un índice usado comúnmente en el contexto de medidas de radiación solar, y que tiene en cuenta la potencia total integrada a lo largo del espectro visible. Este índice se puede interpretar como el área de la diferencia entre las dos curvas espectrales que estamos comparando, expresada en tanto por cierto. Se calcula según la relación:

$$IRE(\%) = 100 \frac{\left| \sum_{i=1}^n S(\lambda_i) - S'(\lambda_i) \right|}{\sum_{i=1}^n S(\lambda_i)} \quad (9)$$

Finalmente, hemos hecho uso en nuestro trabajo de una métrica combinada llamada $CSCM$ (Colorimetric and Spectral Combined Metric) [11] que se define mediante la expresión:

$$CSCM = Ln(1 + 1000(1 - GFC)) + \Delta E_{ab}^* + IRE(\%) \quad (10)$$

donde ΔE_{ab}^* es la diferencia entre las coordenadas CIELAB correspondientes a los dos espectros.

Esta última métrica es una combinación de las métricas GFC , ΔE_{ab}^* e $IRE(\%)$ y tiende a cero en el caso de que los ajustes espectrales sean perfectos. Puesto que la métrica GFC vale 1 para espectros idénticos es por tanto necesario usar $(1 - GFC)$ en la expresión de $CSCM$. Al mismo tiempo cabe notar que en $CSCM$ se da el mismo peso a los tres índices, mediante coeficientes apropiados, para que los términos espectral, colorimétrico y de irradiancia integrada tengan similar importancia.

En la literatura reciente sobre evaluación de diferencias de color se han empleado también métricas híbridas similares a $CSCM$. Este es el caso de la métrica $PF/3$ (Performance Factor divided by 3), que parece ser superada por una métrica no híbrida denominada $STRESS$ (Standardized Residual Sum of Squares), procedente de técnicas de análisis multidimensional (MDS), que ha sido recientemente propuesta por nuestro laboratorio [25].

Agradecimientos

Proyecto de Investigación FIS2007-64266, Ministerio de Educación y Ciencia, España.

Vicerrectorado de Política Científica e Investigación de la Universidad de Granada por la beca de iniciación a la investigación otorgada a Rafael Roa.