Unexpected colored shadows: beyond simple additive color mixtures

Inesperadas sombras coloreadas: más allá de la simples mezclas aditivas de color

J.L. Nieves^{S*}, J.A. García^S, J. Romero^S

Departamento de Óptica - Facultad de Ciencias - Universidad de Granada – 18071 Granada (Spain)

(*) E-mail: jnieves@ugr.es

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Received / Recibido: 01/06/2015

Accepted / Aceptado: 15/06/2015

DOI: 10.7149/OPA.48.2.153

ABSTRACT:

The aim of this work was to clarify the difference between two color phenomena: the shadow color, which adds color to the shadows, and the colored shadows, which appears due to the context effect on the color perception. A laboratory photograph is introduced to illustrate the colored shadow effect and how this perceptual effect cannot be explained using classical colorimetry. A yellow colored shadow is observed when two separate white and blue lights illuminate a blank screen and an obstacle occludes part of the light impinging on the screen, and the Retinex Theory is used to explain that phenomenon.

Key words: Color Vision, Color, Optics Education, Optics Experiments

RESUMEN:

El presente artículo pretende aclarar la confusión que en ocasiones se encuentra respecto a las denominadas sombras de color y las sombras coloreadas. Se ilustra el fenómeno asociado a las sombras coloreadas y se pone de manifiesto cómo su naturaleza y origen perceptual es diferente a las sombras de color que se obtendrían, estas últimas, por simple mezcla aditiva de colores. Se muestra una fotografía donde se observa claramente el fenómeno al iluminar una pantalla con un foco de luz azul y otro de luz blanca cuando se introduce un obstáculo entremedias, y se introduce una explicación basada en la Teoría Retinex.

Palabras clave: Visión del color, Color, Educación en Óptica, Prácticas de Óptica

Fig.1. Demostración experimental (izquierda) del fenómeno de las “sombras de color”, y (derecha) de las “sombras coloreadas”. Las sombras amarillas pueden parecer en ambos casos muy similares visualmente pero son de naturaleza completamente distinta

---

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] J. Romero, J.A. García, A. García y Beltrán, *Curso introductorio a la Óptica Fisiológica*, Editorial Comares, Granada, 1996.
  - [2] G. Wyszecki, W. S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, John Wiley & Sons, Inc., London, 2000.
  - [3] E.B. Goldstein, *Sensation and Perception*, Thomson Wadsworth, Canada, 2007.
  - [4] Khan Academy, Light and Color at <https://www.khanacademy.org/partner-content/Exploratorium/Light-and-color/Colored-shadows/v/colored-shadows-introduction-1>
<http://arxiv.org/abs/1503.00506>
  - [5] S. Houde-Walter, G. Pierce, "Colored Shadows and Retinex Vision," *Optics and Photonics News* 3, 5, 64-65 (1992).
<http://dx.doi.org/10.1364/OPN.3.5.000064>
  - [6] J.W. Von Goethe, *Theory of Colors*, trans. into English by C.L. Eastlake, Cass Publ., London, 1967, p.34 et seq.; *The Nature of Light and Color in the Open Air*, section 96, 134, Dover Press, New York, 1954
  - [7] E.H. Land, J.J. McCann, "Lightness and retinex theory," *J Opt Soc Am* **61**, 1-11 (1971).
<http://dx.doi.org/10.1364/JOSA.61.000001>
-

1. Introducción

Lo que entendemos coloquialmente por “color” de una luz o de un objeto es algo que generalmente no ofrece dudas, en tanto en cuanto es un atributo ligado a la percepción. La Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) estableció en 1970 la definición de “color percibido” como un aspecto de la percepción visual mediante el cual un observador puede distinguir diferencias entre dos campos del mismo tamaño, forma y textura que puedan ser debidas a diferencias en la composición espectral de las radiaciones relacionadas con la observación.[1-2] Sin embargo la medida del color implica en muchas ocasiones su evaluación psicofísica y por ello hay que hablar también de color psicofísico. Según la CIE, “color psicofísico” es el atributo de la radiación visible mediante el cual un observador puede distinguir dos campos de igual tamaño, forma y textura tal que puedan ser debidas a las diferencias en la composición espectral de las radiaciones relacionadas con la observación. La diferencia en la primera parte de ambas definiciones pone de manifiesto que tanto la percepción del color como la medida del mismo puede resultar una tarea no trivial, pues depende de las propiedades físicas de la luz que ilumina los objetos, de las propiedades físicas de los mismos (respecto a su reflectancia o transmitancia espectrales) y del observador o receptor físico que recoja la luz reflejada o transmitida por los objetos o la emitida por la fuente de luz (en caso de que se observe directamente dicha fuente). La Colorimetría establece el procedimiento adecuado para la medida del color y, si exceptuamos el fenómeno del metamerismo en el que no entraremos aquí [2], permite medir de manera inequívoca el color de los objetos o las luces. En muchas ocasiones sin embargo, esos objetos o luces tienen una extensión espacial considerable y existen multitud de factores que pueden hacer que la medida del color haya que establecerla en términos más complejos (múltiples fuentes de luz en la escena, interreflexiones, texturas, sombras y penumbras, etc.)[3].

En este artículo usaremos una demostración experimental del fenómeno de las “sombras coloreadas” (figura 1, derecha) para ilustrar de manera sencilla la complejidad que supone la medida y percepción del color. En contraposición de las “sombras de color” (figura 1, izquierda), la experiencia pondrá de manifiesto cómo, en ocasiones, la percepción del color de una escena y su medida punto a punto en la misma no coinciden, como cabría esperar aplicando la Colorimetría clásica.

2. Cómo obtener las “sombras de color” y las “sombras coloreadas”
2.a. Fundamento de las mezclas aditivas y las “sombras de color”

La combinación o mezcla, en la proporción adecuada, de tres luces (primarios) de tonalidades roja, verde y azul nos permite obtener tanto luz blanca como otras de tonalidades diferentes en función de la proporción de dichas luces en la mezcla final. Si se cumple la ley de aditividad de Abney,[2] en base a la

cual la luminancia de un estímulo no es más que la suma de las luminancias de sus componentes, sucederá que:

$$Q = rR + vV + aA \quad (1)$$

donde R , V y A hacen referencia a los primarios (por ejemplo, se pueden utilizar los RGB propuestos por la CIE en 1931) y r , v y a representan números diferentes elegidos de tal modo que si tratáramos de igualar un estímulo equienergético resultara $r=v=a$; en el caso de los RGB CIE estas unidades tricromáticas serían $[1, 4.59, 0.06]$, mientras que en el caso de los primarios de un monitor, en niveles digitales, hablaríamos de $[1,1,1]$.

La figura 2 ilustra la experiencia denominada “sombras de color” que puede observarse en muchos museos de Ciencia o incluso online en muchas web sobre experiencias con luz [4]. En la mayoría de las ocasiones se las denomina sombras coloreadas (por su traducción directa quizá del inglés) pero aquí reservaremos ese nombre para el fenómeno del que trata este artículo y que veremos en la siguiente sección. Tanto esta como el resto de fotografías del artículo se han tomado con una cámara digital comercial (no profesional) SONY Cybershot (modelo 8.1 Mpx en modo de disparo “P”). El fondo iluminado blanco que se observa en la figura 2, que se observaría también si no hubiera obstáculo alguno, proviene de la mezcla aditiva de tres focos de luz Roja, Verde y Azul (obtenidos con tres simples filtros de color de plástico no interferenciales). Como comprobamos en el esquema de esta figura, cuando interponemos un obstáculo entre los focos y la pantalla aquél tapará el camino óptico que conecta cada foco de color con la pantalla, asumiendo una trayectoria en línea recta para la propagación de la luz hasta iluminar por completo la pantalla.

Fig.2. Demostración experimental del fenómeno de “sombras de color” que se obtiene iluminando una pantalla con tres focos de luz (Rojo, Verde y Azul) e interponiendo un obstáculo entremedias. Un detalle ampliado de las tres sombras de color Cian, Magenta y Amarilla obtenidas puede verse en la fotografía de la izquierda en la Figura 1.

Si en lugar de un obstáculo delgado colocamos otro más ancho (como una tira de cartón) observaremos muchos más colores en la pantalla, e incluso será posible observar una franja negra si situamos el obstáculo muy próximo a la pantalla. En este último caso estaríamos bloqueando la luz que llega de los tres focos y por ello no cabría hablar de mezcla aditiva alguna.

2.b. Las “sombras coloreadas”

Sin embargo el fenómeno de las sombras coloreadas (“colored shadows” en inglés [5]) tiene una naturaleza totalmente diferente. Una llamativa explicación la encontramos en la siguiente cita que describe cómo “cuando el sol está bajo al final de un día claro de invierno, las alargadas sombras de los árboles proyectadas sobre la nieve aparecen de tonalidad azul-violácea en contraposición con el amarillo solar. A medida que el atardecer avanza y la luz del sol va bañando todo de tonalidades más rojizas, las sombras de los árboles pueden parecer verdosas” [6].

Volviendo al montaje de la figura 2, prescindamos de los focos de luz roja y verde y sustituyámoslos por uno de luz blanca manteniendo el foco azul. La sombra coloreada aparecerá cuando coloquemos el obstáculo de nuevo entre los focos de luz y la pantalla. Ahora bien, ¿de dónde proviene la luz amarilla que constituye la sombra arrojada sobre la pantalla? El efecto que aparece en la fotografía de la figura 1 (derecha) no es posible explicarlo basándonos en la teoría de mezclas aditivas.

Este es un ejemplo de lo que llamamos “colores relacionados”, es decir, estímulos de color observados en relación con otros del entorno (por oposición a los estímulos de color “no relacionados” o “aislados”). Se trata de un fenómeno perceptual que ilustra cómo el sistema visual humano obtiene la percepción del color teniendo en cuenta no sólo la luz que proviene de un punto de la escena (punto de la pantalla en el caso que nos ocupa) sino también la que proviene de todas las áreas en la escena que rodean al punto de interés.

3. Resultados y discusión

Para tratar de explicar el fenómeno de la sombra coloreada que ilustra la figura 1 (derecha), vamos a mostrar un par de secuencias de fotografías en las que hemos apagado y encendido, alternativamente, el foco de luz blanca y el foco de luz azul. Si hacemos esto comprobaremos que, como era de esperar, al introducir el obstáculo en el camino de la luz del único foco que hay encendido, el fondo aparecerá blanco (figura 3, izquierda) o azulado (figura 3, derecha) y la sombra del obstáculo gris oscura, en cualquiera de los dos casos.

Fig. 3. (Izquierda) Fotografía obtenida al utilizar únicamente el foco de luz blanca usado en la fotografía de la derecha en la fig. 1. (Derecha) Idéntico montaje al anterior donde ahora la fotografía se ha obtenido encendiendo sólo el foco azul (ON indica encendido y OFF apagado en ambos esquemas).

Si ahora encendemos ambos focos azul y blanco (figuras 1, derecha, y 4), considerando la ley de Abney y la ecuación (1), cabría esperar para la luz del fondo Q^f :

$$Q^f \equiv (b \text{ Foco Blanco}) + (a \text{ Foco Azul}) \quad (2)$$

$$Q^f = (r_b R + v_b V + a_b A) + (r_a R + v_a V + a_a A) \approx r_b R + v_b V + (a_b + a_a) A \quad (3)$$

donde el superíndice f hace referencia al estímulo de color de fondo, el subíndice b al foco de luz blanca, el subíndice a al foco de luz azul y donde hemos supuesto que las componentes (r_a, v_a) del foco azul son despreciables en comparación con las del foco blanco si ambos focos de luz se describen en términos de tres primarios R, V y A . La cantidad de lúmenes (o en este caso, la luminancia en la pantalla) representada por la cantidad (a_b, a_a) hará que el fondo aparezca con tonalidad azulada en lugar de blanco; la razón para ello radica en que la apariencia blanca se hubiera obtenido en la ecuación (2) si solamente hubiese intervenido el término aditivo $(r_b R + v_b V + a_b A)$ asociado al foco de luz blanco.

Aplicando idéntico razonamiento pero tratando ahora de describir la sombra “amarilla” Q^s (en las figuras 1, derecha, y 4) en términos de sus componentes obtendremos:

$$Q^s \equiv (b^s \text{Foco Blanco}) + (a^s \text{Foco Azul}) \quad (4)$$

$$Q^s \approx (r_b^s R + v_b^s V + a_b^s A) + (a_a^s A) = r_b^s R + v_b^s V + (a_b^s + a_a^s) A \quad (5)$$

y dado que a esa zona de sombra siempre le llegará algo de luz de ambos focos, la ecuación demuestra que la apariencia de color de la sombra debería ser grisácea y oscura (por el menor valor de las componentes r_b^s, v_b^s, a_b^s y a_a^s) pero en ningún caso amarillenta, como muestra la fotografía de la derecha en la figura 1.

Por el contrario, la apariencia amarilla estaría asociada a una componente o cantidad $[(a_b^s + a_a^s)A]$ próxima a cero, predominando entonces la mezcla aditiva de rojo y verde en la ecuación (5); sin embargo, esto no ocurre si los focos blanco y azul tienen suficiente potencia lumínica. ¿Cómo explicar entonces la apariencia amarilla de la sombra coloreada? Una explicación adecuada nos la brinda la Teoría Retinex, introducida por Edwin H. Land [7]. Esta teoría, cuyo acrónimo se deriva de la conjunción de las palabras “retina” y “córtex”, trata de explicar cómo el sistema visual humano codifica y percibe los estímulos de color teniendo en cuenta el entorno visual que le rodea. La teoría Retinex se fundamenta en dos principios básicos:

- La composición espectral de la luz proveniente de un punto o área de la escena no determina su color.
- El color de un área de la escena queda determinado por un trío de números, cada uno calculado sobre un ancho de banda espectral diferente, que especifican la relación entre esa área y el resto de puntos de la escena.

A estos principios se puede añadir un tercero que sería el propio algoritmo de cálculo propuesto para determinar ese trío de números (denominados también “retinexes” o “luminosidades”, como concepto psicofísico equivalente al de reflectancia espectral). En base a ello vamos a explicar la apariencia de color de las sombras coloreadas estimando los tres descriptores luminosidad q_R, q_V , y q_A , tal y como propone Land.

Fijémonos ahora en el esquema de la Figura 4 y describamos por separado la luz del fondo y la proveniente de la sombra basándonos en la ecuación (1). Supongamos que trabajamos con un foco de luz blanca de componentes $r_b=v_b=a_b=100$ (siendo el valor 100 totalmente arbitrario) y uno azul de componentes $r_a=0,01r_b, v_a=0,01v_b$ y $a_a=a_b=100$ (es decir, suponiendo que su naturaleza es idéntica al foco blanco pero con una cantidad mucho menor asociada a los primarios R y V). Aplicando el segundo principio de la Teoría Retinex, el color de la sombra debe estimarse a partir de la relación existente entre las componentes o luminancias del área de sombra s y del área de fondo f , para cada banda espectral (o cada primario, en este caso, R, V y A), resultando:

$$\begin{aligned} q_R^s &= r_s / r_f = r_s / (r_b + r_a) = r_s / (r_b + 0,01r_b) = r_s / 101 \\ q_V^s &= v_s / v_f = v_s / (v_b + v_a) = v_s / (v_b + 0,01v_b) = v_s / 101 \\ q_A^s &= a_s / a_f = a_s / (a_b + a_a) = a_s / (a_b + a_b) = a_s / 200 \end{aligned} \quad (6)$$

donde r_s, v_s y a_s representan las cantidades de primario R, V , y A , respectivamente, asociadas al área en sombra y que, por el hecho de estar en la zona de sombra, presentarán valores muy pequeños y similares. La apariencia del color de la sombra arrojada por el obstáculo resultará de la intercomparación de los valores relativos de los tres descriptores. Del análisis de las ecuaciones (6) se deduce que el descriptor luminosidad q_A^s , asociado a la componente que codifica la banda “azul”, tendrá un valor mucho menor que

los otros dos descriptores, por lo que la sombra presentará una apariencia amarilla dominada por los valores de q_R^s (en la banda “roja”) y q_V^s (en la banda “verde”).

Fig. 4. Esquema ilustrativo (ver Sección 3 para más detalles) del fenómeno de sombra coloreada amarilla que aparece en la fotografía de la derecha en la figura 1.

Es interesante resaltar que, como quizá el lector puede intuir, si sustituye el foco azul de luz por uno de luz roja la sombra coloreada aparecerá de tonalidad cian; y si utiliza un foco de luz verde, la sombra aparecerá de tonalidad magenta, resultados ambos de la comparación relativa de los valores de los tres descriptores. Por tanto, la teoría Retinex, sin ser un modelo fisiológico que trate de representar los mecanismos que el sistema visual humano pone en juego para la obtención de la percepción del color, consigue explicar el fenómeno de las sombras coloreadas, algo que no era posible explicarlo mediante la teoría clásica de mezclas de color.