

LA ESPECIFICACION DEL COLOR: ESPACIOS DE REPRESENTACION DEL COLOR

Joaquín Campos Acosta. Instituto de Física Aplicada (CSIC)

Serrano, 144. 28006 Madrid

Cuando a una persona se le pregunta de qué color es un objeto, su primera respuesta suele ser la de especificar su tono: rojo, verde, azul etc. Esta primera especificación es vaga, ya que hay muchos colores que responden a la misma. Por ello, cuando se pide una mejor especificación solemos responder indicando si es claro u oscuro o si es pálido o fuerte, o si es saturado o no. Sin embargo, podríamos ir seleccionando estímulos de color de forma tal que necesitaríamos muchas palabras para diferenciar uno de otro. En resumen, la forma coloquial de especificar el color no es adecuada, porque no seríamos capaces de transmitir a los demás el estímulo de color concreto al que nos estamos refiriendo.

El color es muy importante en nuestras vidas particulares y en la actividad económica de nuestra sociedad y basta recurrir a la experiencia personal de cada uno para encontrar ejemplos que soportan esta afirmación. Por este motivo, el problema de la especificación del color tiene que ser resuelto y no se puede dejar en la ambigüedad antes mencionada del lenguaje coloquial.

Para afrontar este problema cabría preguntarse qué es el color y obtendríamos distintas respuestas a esta pregunta dependiendo del gremio o de la actividad profesional de la persona con la que estuviésemos hablando (artista, físico, químico, psicólogo o diseñador, entre otros). Sin embargo, de todas ellas podríamos concluir que para percibir el color se necesita que la luz de un objeto llegue a nuestros ojos y estimule el proceso visual que, como tal, tiene un aspecto fisiológico y otro psicológico. También cabría concluir que el color es un atributo más de lo observado como la forma, o la textura. En resumen, se puede decir que el color es una percepción con fundamento físico e interpretación psicológica.

Con este panorama, es fácilmente asumible que la mejor forma de especificar el color sería la más próxima posible a los atributos perceptivos, ya que, como se ha comentado, ésta no es posible. Si se analiza más con detenimiento la forma coloquial de especificar un color, se puede llegar a la conclusión de que en ella intervienen tres factores de una u otra forma. Estos factores son el tono, atributo por el que decimos que un estímulo es verde o rojo, la cantidad de luz, atributo por el que decimos si el color es claro u oscuro, y la saturación o croma, atributo por el que decimos si el color es más suave o más fuerte. Luego lo ideal sería especificar un color mediante tres números relacionados con esos tres atributos.

A lo largo del tiempo se han ido desarrollando distintos sistemas para conseguir este objetivo. Estos sistemas se podrían clasificar en dos grupos: los atlas de color y los espacios de representación del color. Un atlas de color contiene un número más o menos elevado de muestras, perfectamente especificadas y ordenadas según los tres atributos perceptivos del color: claridad, tono y croma. La especificación de un color particular se lleva a cabo comparando el estímulo en cuestión con el muestrario del atlas y emitiendo un juicio de igualdad entre ambos. Existen distintos atlas de color de este tipo. Algunos han sido desarrollados para una actividad profesional concreta y contienen las muestras más frecuentes en esos ámbitos, como puede ser la utilización de pinturas o las

artes gráficas, y sólo se conocen y usan en esos ámbitos. Otros se han desarrollado con una intención más amplia y se utilizan en distintos ámbitos. Entre estos últimos cabe destacar el Munsell y el NCS (“Natural Colour System”) como los más populares.

El segundo grupo es el de los conocidos como espacios de color, en el que los estímulos se identifican por tres números cuyo significado es distinto en cada uno de ellos. La palabra espacio al hablar de estos sistemas de especificación del color no tiene el mismo significado que en Matemáticas, conjunto en el que se definen operaciones con unas propiedades determinadas, sino que hace referencia a que la clasificación es tridimensional, necesitándose un volumen, y no sólo un plano, para contener todos los colores posibles. Esta llamada de atención es importante porque en algunos espacios se pueden realizar operaciones como la suma o la multiplicación por un número, pero no en todos ellos.

En este artículo nos vamos a ocupar de este segundo grupo. Existen diversas referencias en la bibliografía sobre los atlas de color, su desarrollo y su uso y el lector interesado podrá encontrarlas con facilidad.

Al objeto de entender mejor los fundamentos de los espacios de representación del color hay que tener en cuenta algunas peculiaridades del observador humano y algunos fenómenos característicos de la visión.

1. EL OBSERVADOR HUMANO

Comentábamos anteriormente que para que se produzca la percepción de un estímulo de color, la luz ha de llegar a la retina del observador, donde se inicia una cadena de fenómenos que acaba en la percepción. La retina es una región heterogénea con gran variedad de células. Las responsables de la visión son las conocidas como conos y bastones debido a su forma. Los bastones son células que responden a la cantidad de luz que reciben, fundamentalmente, mientras que la respuesta de los conos depende de la cantidad de luz y de la composición espectral de la misma. Los conos se dividen en tres grupos que se conocen como conos S, conos M y conos L. Los conos S responden a la luz de longitudes de onda más cortas, los conos M a la luz de longitudes de onda medias y los L a la de longitud de onda larga. En resumen, cuatro tipos de células con cuatro funciones de respuesta espectral diferentes.

Además de haber distintos tipos de células, la distribución espacial de las mismas en la retina no es uniforme. Existe una zona central de mayor agudeza visual en la que el sistema óptico del ojo forma las imágenes cuando observamos en detalle y que se denomina fovea. En esta zona no existen bastones y la distribución de los conos no es uniforme a lo largo de toda superficie ni en número ni en tipo. Fuera de esta zona central existen tanto bastones como conos, pero su distribución tampoco es uniforme. La de los conos decae rápidamente al separarse de la fovea, mientras que la de los bastones crece, alcanza un valor máximo y vuelve a disminuir conforme nos separamos de la fovea.

Otra característica relevante de estas células es que su umbral de excitación es distinto, necesitando mayor cantidad de luz los conos que los bastones para producir una respuesta visual.

A la vista de este panorama fisiológico, cabe entender que el ojo humano no responde por igual a todas las longitudes de onda. Sólo responde a las comprendidas entre 380 nm y 780 nm, intervalo que se conoce como visible por este motivo, aunque

hay observadores particulares cuyo sistema visual puede responder bien a longitudes de onda más cortas, bien a longitudes de onda más largas, bien a ambas. En todas las células, la misma cantidad de estímulo físico de dos longitudes de onda no produce la misma respuesta. La función que indica la cantidad de respuesta visual para cada longitud de onda de la luz incidente se conoce curva de eficacia luminosa del ojo humano. Es frecuente encontrar esta curva en forma relativa, indicando la cantidad de respuesta en relación con la de la máxima respuesta. Esta otra función se conoce como curva de eficiencia luminosa. Es una curva sin dimensiones ni unidades, en consecuencia, mientras que la de eficacia luminosa tiene dimensiones.

Como la distribución espacial de los tipos de célula no es uniforme, la curva de eficiencia luminosa será distinta para un campo de observación en detalle que para un campo de observación de una escena amplia. En este sentido se suele tomar el valor del campo de 4 grados como frontera entre observación en detalle (< 4 grados) y panorámica (> 4 grados).

Asimismo, dado que los umbrales de excitación de las células son distintos, hay una curva de eficiencia luminosa para niveles altos de luz, que se conoce como curva fotópica y otra para niveles bajos de luz que se conoce como curva escotópica. Entre ambas hay una zona amplia que se conoce como nivel de iluminación mesópico cuya curva de eficiencia luminosa no está bien establecida todavía. Para dar una idea aproximada al lector, se puede decir que los niveles fotópicos de iluminación se corresponden con la visión diurna, mientras que los escotópicos corresponden a visión nocturna. El máximo de la curva de eficiencia fotópica se encuentra en la longitud de onda de 555 nm, mientras que el de la curva escotópica está en 507 nm. Este efecto se conoce como efecto Purkinje.

En la figura 1 se representa la curva de eficiencia luminosa fotópica para observación en detalle y observación panorámica. Aunque no se puede observar en la gráfica, el máximo de la segunda está desplazado un poco hacia longitudes de onda más largas (557 nm en lugar de 555 nm). Además las longitudes de onda más cortas son más eficientes en la observación panorámica que en la de detalle. Estas curvas no corresponden, probablemente, a ningún observador real concreto, sino a un promedio de observadores.

2. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LA RESPUESTA VISUAL

La respuesta visual que se inicia en el ojo y acaba en el cerebro tiene algunas características importantes que deberían ser tenidas en cuenta por los sistemas de especificación del color. Éstas son el metamerismo, la capacidad de discriminación cromática y la adaptación cromática.

2.1. Metamerismo

El sistema visual humano tiene la capacidad de percibir como iguales dos estímulos de color cuya composición espectral es distinta. Esta capacidad se conoce como metamerismo y los estímulos que cumplen esta condición se llaman metámeros. Esta capacidad es muy importante, puesto que permite igualar un color mediante mezcla de otros colores, haciendo posible lo que conocemos como Colorimetría.

2.2 Discriminación cromática

La capacidad de distinguir colores es limitada y hay diferencias de unos observadores a otros, aunque de todos es bien conocido por experiencia propia lo buen

detector que es el ojo humano para diferenciar colores cuando están uno al lado del otro. La capacidad de diferenciación cambia de unos tonos a otros y, además, depende de las condiciones de observación: tamaño de campo, tipo de comparación (por yuxtaposición o sucesión) y nivel de luminancia.

La capacidad de diferenciación cromática tiene una incidencia grande en la práctica y permite establecer los intervalos de tolerancia de los colores. Piense el lector en aquellas situaciones en las que es necesario igualar un color determinado, como ocurre en las reparaciones de chapa y pintura de los automóviles. Si no fuera por esta capacidad reducida sería muy difícil la igualación ya que las producciones industriales de los productos no son siempre las mismas.

2.3 Adaptación cromática

El sistema visual cambia su ganancia y sensibilidad en función de la intensidad de la luz que observa. Este fenómeno se conoce como adaptación de forma genérica. Cuando el cambio de respuesta se debe al cambio de composición espectral más que al cambio de cantidad de luz, el fenómeno se conoce como adaptación cromática. Un ejemplo de este fenómeno se puede percibir cuando caminando por la calle de noche, estando ésta iluminada con luminarias de vapor de sodio, que es el típico color amarillo de muchas farolas, se mira de repente a una pantalla de televisión. La sensación será que los colores percibidos son más azules de lo que se percibiría si se estuviera mirando a la televisión desde el interior de la habitación.

En relación con este fenómeno de la adaptación cromática está el que se conoce como fenómeno de constancia del color. Un objeto familiar lo percibimos con el mismo color bajo iluminantes muy diferentes, aunque el mismo estímulo de color, si no estuviera asociado a ese objeto en nuestra mente, sería percibido de forma diferente. Piense el lector en el color percibido de una naranja con luz diurna y con la luz de una farola con lámpara de vapor de mercurio, o con una farola con lámpara de vapor de sodio, por ejemplo.

3. LEYES DE GRASSMAN

Una vez repasadas algunas características del observador humano y del proceso de visión, nos ocupamos de estas leyes, deducidas por Grassman, que son leyes empíricas que rigen las igualaciones de colores que se llevan a cabo con un nivel de iluminación fotópico. En los niveles mesópico y escotópico dejan de cumplirse.

Las leyes de Grassman se pueden encontrar escritas de distintas formas y utilizando símbolos matemáticos, pero en este artículo se ha optado por enunciarlas, ya que los símbolos matemáticos que se usan pueden llevar a errores conceptuales si no se entienden adecuadamente.

La primera ley de Grassman establece que si un estímulo A iguala a otro B y uno C iguala a otro D, la mezcla aditiva de A y C iguala a la mezcla aditiva de B y D. La expresión simbólica de esta ley es: si $A = B$ y $C = D$ entonces $A+C = B+D$, que en Matemáticas se cumple para la operación suma, pero que para la adición de los colores es una ley empírica.

La segunda ley establece que si el estímulo A iguala al B y una mezcla de colores C que contiene el color A iguala a otra mezcla D que contiene al color B,

entonces lo que queda de la mezcla C al quitar el color A iguala a lo que queda de la mezcla D al quitar el color B.

La tercera y última ley establece que si un estímulo A iguala a otro estímulo B, al incrementar o disminuir la cantidad de ambos en la misma proporción, sin alterar las composiciones espectrales relativas, la igualación de los estímulos se mantiene.

Las dos primeras leyes se conocen como leyes de aditividad y la tercera como ley de proporcionalidad.

En consecuencia, atendiendo a estas leyes, si un color se puede obtener como mezcla aditiva de otros, podríamos expresar la igualación mediante una ecuación como la siguiente:

$$cC = aA + vV + rR$$

Donde las letras mayúsculas hacen referencia a los estímulos y las minúsculas a las cantidades de esos estímulos que se necesitan para la igualación. Los estímulos de color con los que se logra la igualación se denominan estímulos de color primarios o colores primarios. La palabra primario indica simplemente que son los componentes de la mezcla. Colores primarios en este sentido podrían ser muchos. Sin embargo, el número de colores que se puede reproducir por mezcla aditiva de primarios no es el mismo para cualquier conjunto de primarios. Se puede demostrar que con un primario rojo, uno verde y otro azul seleccionados adecuadamente, se pueden reproducir casi todos los colores por mezcla aditiva. Por este motivo el número de primarios suele ser tres y la ecuación anterior se denomina ecuación tricromática. Las cantidades de cada primario que se necesitan para conseguir la igualación de la cantidad unidad del estímulo considerado se llaman las coordenadas tricromáticas de ese estímulo.

En resumen, se puede concluir que para representar cualquier color bastará con dar las cantidades de primario que permitan obtenerlo como mezcla aditiva; es decir, estas leyes establecen los cimientos para poder expresar un estímulo de color de forma numérica, que era uno de los objetivos planteados al principio de este artículo, como recordará el lector.

4. EL ESPACIO DE COLOR CIE RGB

El espacio de representación de color CIE RGB es el que surge al representar en un sistema de ejes cartesiano las coordenadas tricromáticas de los estímulos de color en el sistema de primarios RGB de la CIE (Comisión Internacional de Iluminación). Este fue el primer espacio de color que se definió como tal. Como se ha mencionado anteriormente, con un sistema de tres primarios rojo (R), verde (G) y azul (B) se puede obtener casi todos los colores eligiendo el rojo, el verde y el azul de forma adecuada. En este sistema, los primarios seleccionados por la CIE eran colores casi espectrales cuya longitud de onda central era 700 nm para el rojo, 546,1 nm para el verde y 435,8 nm para el azul.

Este sistema de representación tenía dos problemas fundamentalmente. Uno es que para especificar cada color habría que hacer una igualación colorimétrica del mismo con los tres primarios y se necesitaría disponer de los primarios en cada ocasión. La segunda es que esta especificación es muy dependiente de los estímulos específicos y siempre se pretende que la especificación este más relacionada con alguna característica física del objeto.

Para solucionar estos problemas se determinaron las funciones de mezcla o igualación espectrales. La idea es extender el conjunto de primarios a los estímulos correspondientes a las longitudes de onda del espectro y determinar las cantidades de cada uno de esos estímulos que se necesitan para reproducir los primarios rojo, verde y azul de la CIE. Ahora cada estímulo vendrá especificado por las ecuaciones:

$$R = k_m \sum E_\lambda \bar{r}(\lambda) \Delta\lambda \quad G = k_m \sum E_\lambda \bar{g}(\lambda) \Delta\lambda \quad B = k_m \sum E_\lambda \bar{b}(\lambda) \Delta\lambda$$

Donde k_m es una constante, E_λ es la distribución espectral de potencia radiante característica del estímulo de color, λ es la longitud de onda, N es el número de longitudes de onda del espectro que se usa en la sumatoria y \bar{r} , \bar{g} y \bar{b} son las funciones de mezcla espectrales. Los valores R , G y B , que no hay que confundir con los estímulos, como indicaban antes, se denominan valores triestímulos del estímulo de color en cuestión en el sistema RGB.

A partir de los valores triestímulos se pueden calcular las coordenadas de cromaticidad en el sistema RGB, que vienen dadas por las ecuaciones:

$$r = \frac{R}{R + G + B} \quad g = \frac{G}{R + G + B} \quad b = \frac{B}{R + G + B}$$

Como se puede observar, las coordenadas de cromaticidad o coordenadas cromáticas están relacionadas entre sí por la condición de ligadura $r + g + b = 1$. Por lo tanto, es posible representar un estímulo de color mediante dos de esas coordenadas, con lo que la representación será plana. Este tipo de representación se conoce como diagrama cromático.

Las coordenadas cromáticas pueden tomar valores negativos. Esto no quiere decir que habría que quitar esa cantidad de primario de la mezcla de primarios, sino que para obtener la igualación hay que mezclar el estímulo en cuestión con el primario cuya coordenada es negativa y que esa mezcla aditiva de ambos es la que se iguala con la mezcla aditiva de los otros dos primarios.

5. EL ESPACIO CIE X, Y, Z

En el espacio RGB hay estímulos de color con coordenadas cromáticas negativas. Por este y otros motivos, la Comisión Internacional de Iluminación decidió adoptar otro espacio de representación del color que evitara este problema y así nació el espacio X, Y, Z. En este espacio los primarios no corresponden con estímulos de color reales, sino que surgen al imponer la condición de que no haya coordenadas cromáticas negativas. Además, también se impuso que uno de los primarios, el Y, se correspondiese con la curva de eficiencia luminosa. De esta forma nacieron las funciones de mezcla de los estímulos X, Y, Z que se presentan en las figuras 2a y 2b. Si el lector recuerda lo visto en el apartado 1 referido al observador humano, entenderá que haya dos funciones de mezcla para los estímulos X, Y, Z, puesto que había una función de eficiencia luminosa para la observación en detalle y otra para la observación panorámica, o lo que es lo mismo, para campo de observación menor que 4 grados y mayor que 4 grados, respectivamente. Por este motivo el espacio de representación X, Y, Z está formado en realidad por dos espacios que se conocen como X, Y, Z CIE 1931 (año en el que fue adoptado por la Comisión Internacional de Iluminación) y el espacio X, Y, Z CIE 1964 (año en el que se adoptó este espacio).

Al igual que en el caso del espacio RGB, se pueden calcular los valores triestímulos de un estímulo de color en este espacio mediante las ecuaciones:

$$X = k_m \sum E_\lambda \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \quad Y = k_m \sum E_\lambda \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \quad Z = k_m \sum E_\lambda \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda$$

Y de la misma forma se pueden calcular también las coordenadas cromáticas:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

En la figura 3 se representa el diagrama cromático (x,y) del espacio de color X, Y, Z CIE 1931, que es el más habitual. A la vista de este diagrama el lector puede estimar los valores de las coordenadas cromáticas que corresponden a los distintos tonos, correspondiendo los valores mayores de la coordenada x a los tonos rojos y los valores mayores de la coordenada y a los tonos verdes. También se puede observar que los blancos tienen valores de coordenadas alrededor de 0,30. Esto se debe a que otra de las condiciones que se impusieron para obtener este espacio fue que el iluminante equienergético tuviera el mismo valor para las tres coordenadas.

Asimismo, se puede observar en la figura la posición de los colores espectrales puros y la posición de tres primarios típicos de un sistema de televisión en color. Como se ve, el número de colores que se puede obtener con mezcla de esos primarios es reducido en comparación con el total. Los colores mezcla de los primarios son los encerrados en el triángulo que tiene por vértices a dichos primarios.

Este diagrama también pone de manifiesto el principal problema de este espacio de representación. El área ocupada por los diferentes tonos no es comparable. El tono verde ocupa mucho más espacio que los otros, por lo que no existe correlación entre las diferencias visuales entre colores y las distancias entre sus coordenadas en este espacio.

A pesar de lo anterior, en el espacio X, Y, Z se produce una nueva aproximación entre la especificación numérica de los estímulos que estamos buscando y su relación con la percepción. En este sistema, a diferencia del anterior, el valor triestímulo Y está relacionado con la cantidad de luz del estímulo de color.

6. ESPACIOS UNIFORMES DE COLOR

Si la especificación del color es importante, no lo es menos que exista una correlación entre las diferencias de color percibidas y la distancia que separa los estímulos en un espacio de color. Por este motivo, desde hace muchos años se intenta desarrollar espacios de color en los que se cumpla esta condición para el mayor número de tonos posible. Para todos estos intentos se han definido nuevas coordenadas de color basadas en las del espacio X, Y, Z, tanto para campo de observación grande como pequeño, definiendo transformaciones no lineales entre los valores triestímulos. De entre todos ellos sólo nos ocupamos en este artículo del conocido como CIELAB, definido por la Comisión Internacional de Iluminación en el año 1976.

Destacamos este espacio porque es el más utilizado y porque aporta otra novedad. En este espacio el color del estímulo se especifica como percibido en relación con un blanco. Ésta es una nueva aproximación a la forma de percibir del observador humano, para el que el color percibido de un estímulo físico cambia en función del entorno y del ambiente de la observación.

En este espacio los estímulos de color se especifican mediante las coordenadas L^* , a^* , b^* , y de ahí su nombre. La definición de estas coordenadas viene dada por las ecuaciones:

Siempre que el cociente entre los valores triestímulos y los del estímulo blanco de referencia no sean muy pequeños, en cuyo caso se usan otras expresiones que no son del caso especificar.

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right] \quad b^* = 500 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right]$$

La coordenada L^* representa la cantidad de luz, ya que depende del valor triestímulo Y , y puede tomar valores entre 0 y 100. Las coordenadas a^* y b^* son como pares de sensaciones de colores opuestos y también recuerdan mecanismos de percepción visual como los canales rojo-verde y azul-amarillo. Valores de a^* positivos indican tonos rojos y valores negativos indican tonos verdes. Los valores positivos de b^* indican tonos amarillos, mientras que los negativos indican tonos azules.

En este espacio, el diagrama cromático más usado es el (a^*, b^*) , cuyo aspecto se puede observar en la figura 4. El lector puede comprobar que en este diagrama el área ocupada por los distintos tonos es mucho más uniforme que en el diagrama (x, y) mostrado en la figura 3.

Dada la relación existente entre ciertos aspectos perceptivos y el espacio CIELAB, como se ha comentado anteriormente, en este espacio se pueden definir cantidades que correlacionan con los atributos perceptivos del color: cantidad de luz, cromaticidad y tono. Estas cantidades se denominan claridad (L^*), croma (C^*) y tono (h^*) y se calculan mediante las expresiones:

$$L^* \Leftrightarrow L^* \quad C_{ab}^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad h_{ab} = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

El grado de correlación entre estas cantidades y los atributos perceptivos varía de unos tonos a otros.

7. CONCLUSION

Los espacios de representación del color que se han desarrollado hasta ahora han logrado una especificación numérica de los estímulos que elimina la ambigüedad del lenguaje coloquial, que es el primer objetivo que se tiene que plantear cualquier sistema de especificación. Algunos de ellos han conseguido, además, que los números que especifican el estímulo tengan una cierta correlación con los atributos perceptivos del color, con lo que la especificación es más efectiva al ser más próxima a la percepción del observador humano.

La tarea que queda pendiente es la obtener un espacio más uniforme en el que exista una buena correlación entre la diferencia de color percibida entre dos estímulos y la distancia que los separa en el espacio de color, independientemente del tono de dichos estímulos. Quizás en los próximos años se produzca algún avance significativo en este campo, cuando se desarrollen nuevos primarios basados en la fisiología del ojo humano o se mejoren los modelos de apariencia del color.

Figuras

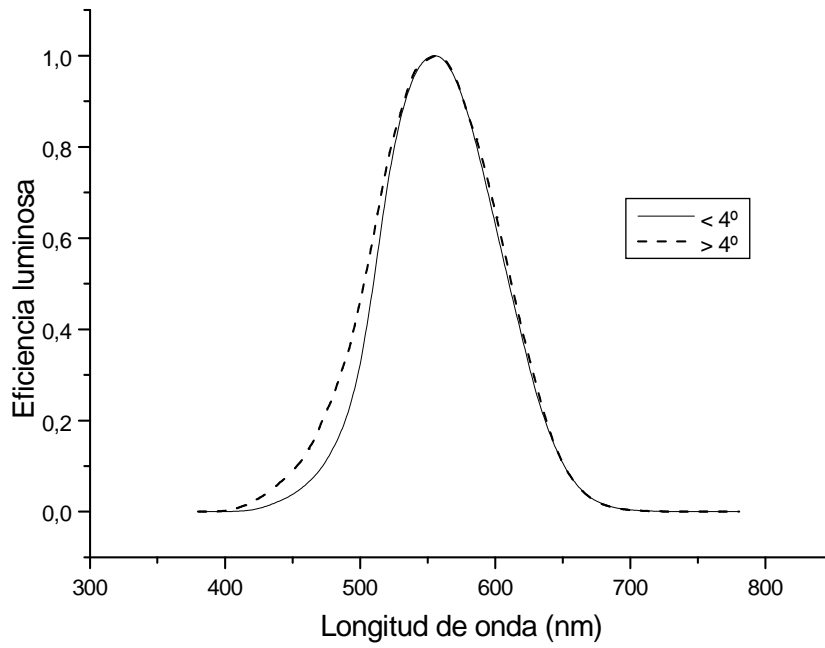


Figura 1. Curvas de eficiencia luminosa para campos de observación menores que 4 grados y mayores que 4 grados.

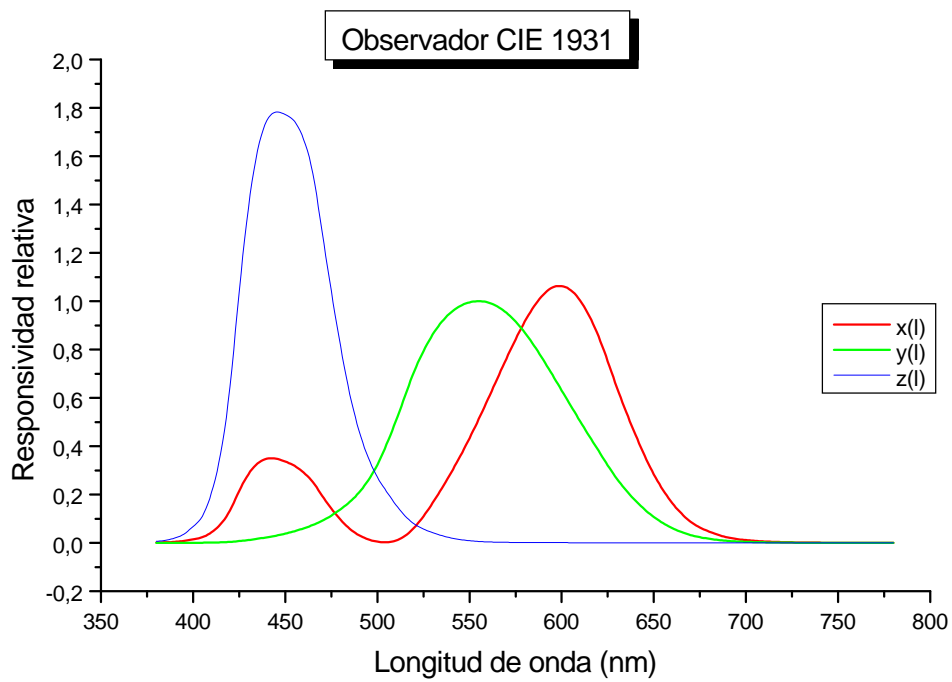


Figura 2a. Funciones de mezcla para campo de observación menor que 4°.

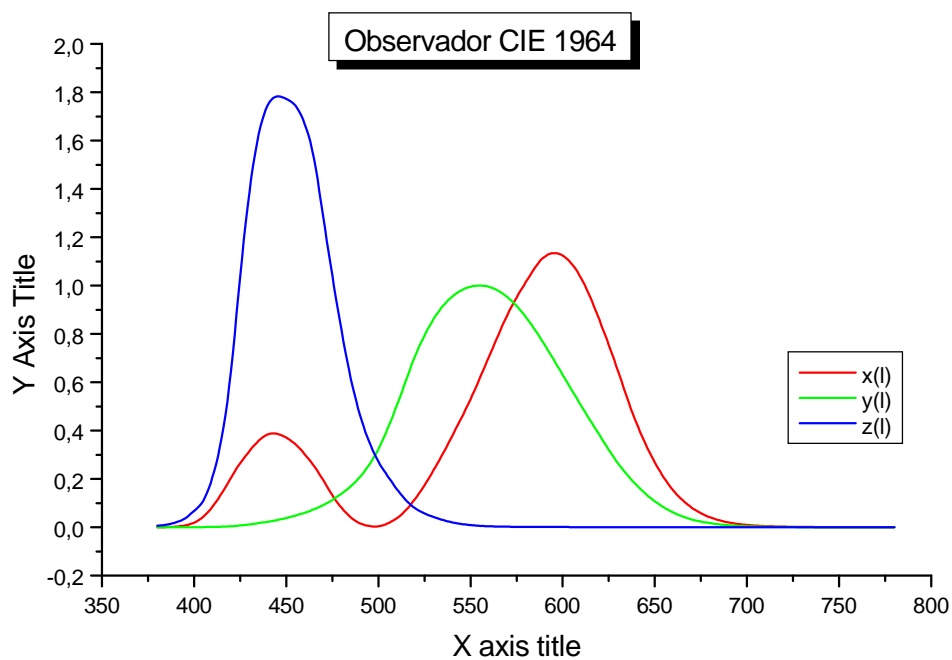
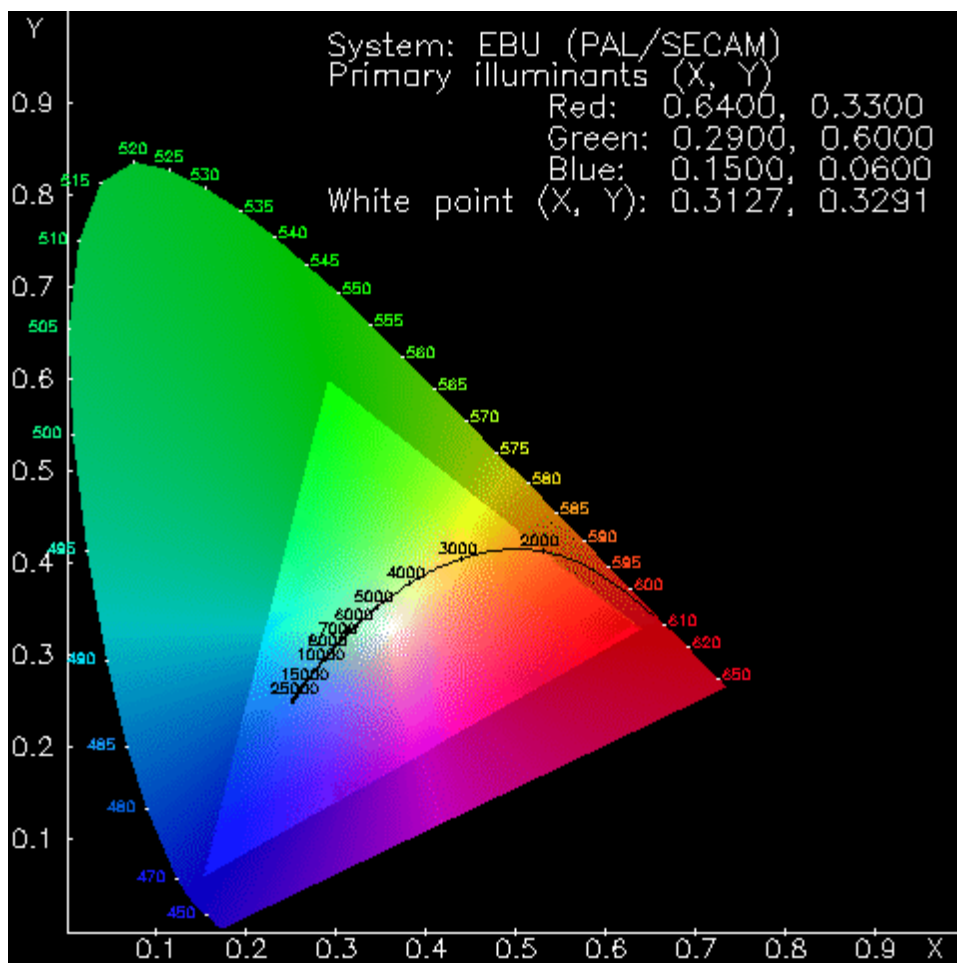


Figura 2b. Funciones de mezcla para campo de observación mayor que 4°.



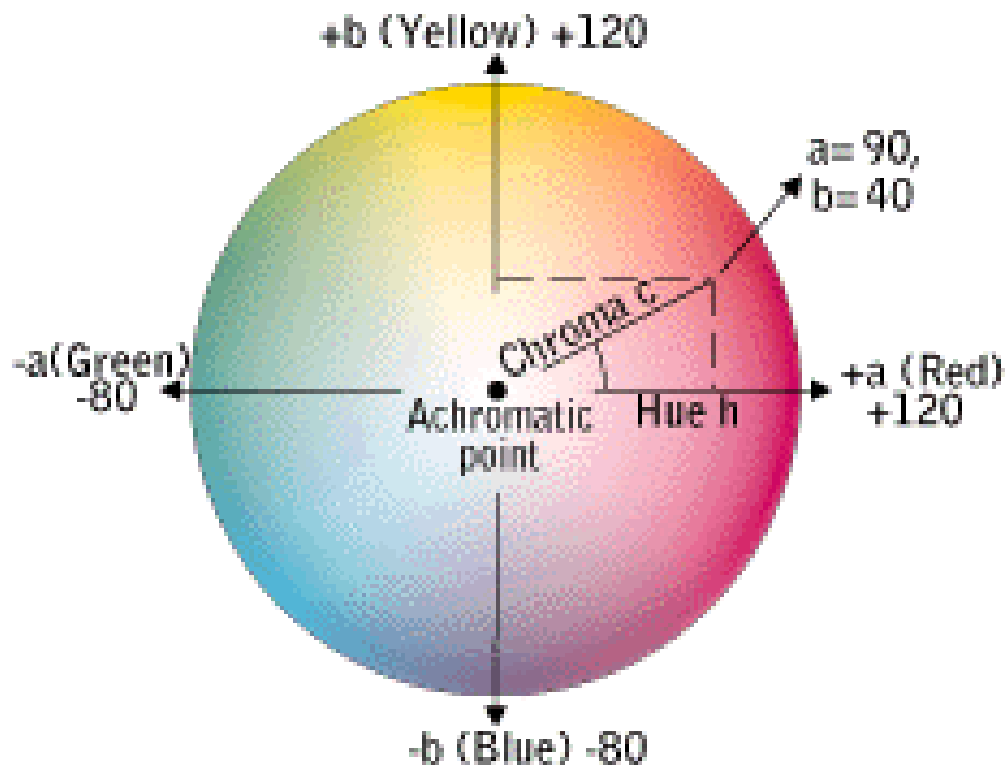


Figura 3. Diagrama cromático (x, y) del espacio XYZ CIE 1931, indicando la posición de los colores espectrales y el locus del radiador completo.

Figura 4. Diagrama cromático (a*, b*) del espacio CIELAB (tomada del catálogo de Minolta).

Nota: Este artículo está reproducido con las imágenes en color en la dirección web: <http://www.unex.es/~optica> dentro del apartado “Enlaces Interesantes”