



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DEPARTAMENTO DE POTENCIA

Notas del curso del Programa de Especialización en Iluminación:

Física de la Luz

Grupo de Fotometría e Iluminación

Autores:

Prof. Adjunto Nicolas Rivero

Doc. Asistente Michael Varela

Responsable:

Ing. Nicolás Rivero

Versión 1.1.

Fecha de publicación: 2020-09-07

“L’architecture est le jeu savant, correct et magnifique des volumes assemblés **sous la lumière.**” Le Corbusier

Índice general

1. Introducción	5
2. Color	7
2.1. Conceptos básicos	7
2.1.1. Radiación óptica	7
2.1.2. Color de los objetos	7
2.1.3. Color práctico	10
2.1.4. Percepción del color humano	11
2.2. Especificación de color: Sistema CIE	14
2.2.1. Diagramas cromáticos	14
2.2.2. Propiedades del diagrama CIE	17
2.2.3. Sistemas espaciados más cercanos a la uniformidad	18
2.2.4. Diferencia de color	18
2.2.5. Longitud de onda dominante, pureza de excitación y Longitud de onda dominante complementaria	19
2.2.6. Temperatura de color y temperatura correlacionada de color (CCT)	20
2.3. Índice de Reproducción de color	21
2.3.1. Método de ensayo de color CIE	21
2.3.2. Limitaciones del método de prueba de color CIE	22
2.3.3. Recomendaciones sobre el uso de medidas para la reproducción cromática	24
2.4. El color según la IES, TM-30-15	25

C.I.E. S.I. NGL núcleo lateral genicular IR UV EM SVH Sistema Visual Humano DEP Densidad Espectral de Potencia

Capítulo 1

Introducción

Como ya decía en el 2000 la sociedad americana de iluminación (IESNA) en la 9 edición de su " *Lighting Handbook*" [1], "En los últimos 20 años ha habido un cambio en la práctica de iluminación de la ingeniería de la iluminación hacia el *lighting design*, un cambio de cálculos de iluminación hacia el juicio de estética, un cambio de cantidad hacia calidad". Este es el *leitmotiv* por el cual el grupo de fotometría e iluminación crea este nuevo material de estudio.

En este documento también se describen los aspectos básicos de la iluminación clásica, antes de comenzar con el *lighting design*.

Capítulo 2

Color

El color es el resultado del espectro de la radiación óptica generada por la fuente luminosa, posiblemente modificado luego por objetos y procesados por el sistema visual humano. Los métodos para caracterizar al color en cada etapa desde la generación hasta la percepción son los objetos de este capítulo. Temas relacionados al umbral de discriminación de colores, anomalías de percepción y canales de procesamiento son vistos en el capítulo de percepción. El objeto del estudio del color es el de cuantificar y predecir la experiencia humana frente al color. En este sentido el texto se enfoca en la aplicación práctica de conceptos de color.

2.1. Conceptos básicos

En este apartado describe las características básicas del estímulo visual que produce la percepción del color, como esas percepciones son descritas y como son cuantificadas con el objeto de poder realizar predicciones analíticas.

Científicamente el color puede ser definido como la característica de la radiación óptica por lo cual un observador puede distinguir entre cuadros luminosos del mismo tamaño, forma y estructura. El color considerado como una magnitud física propiedad esencial de las fuentes luminosas, objetos y de la interacción entre ellas, nos ayuda a predecir la percepción humana del color en un amplio rango de situaciones. Sin embargo para lograr entender completamente la misma, es necesario considerar adicionalmente efectos psicofísicos; la relación entre los estímulos físicos y la respuesta de percepción humana.

La percepción del color tiene tres componentes:

1. La radiación óptica: El estímulo físico de la visión y el detonador de la percepción del color.
2. Objetos: Tanto fuentes directas como superficies iluminadas por la interacción con radiación óptica.
3. Visión: El complejo SVH, incluyendo los receptores en la retina, el nervio óptico y el cerebro.

2.1.1. Radiación óptica

La radiación óptica de las fuentes luminosas puede ser separadas en la cantidad relativa de potencia radiante en cada longitud de onda. A esto se le llama Densidad Espectral de Potencia (DEP) o SPD por sus siglas en inglés. Todas las características del color de una fuente de luz son derivadas de su densidad espectral. La DEP se define como la potencia radiante por unidad de intervalo de longitud de onda considerado dentro del espectro visible, típicamente las unidades son watts/nm, normalizado con el pico de potencia al valor 1 ó 100. Densidades espectrales típicas de diferentes fuentes se pueden observar en la Figura 2.1.

2.1.2. Color de los objetos

Los materiales modifican la radiación óptica mediante la reflexión, transmisión, dispersión o fluorescencia. Podemos pensar en la radiación óptica producido por este fenómeno ocurrido en los materiales como el “color del objeto” en si.

Reflexión espectral

Las Densidades de reflectancia espectral (SRD) son cantidades relativas de potencia radiante reflejada en cada longitud de onda en un rango de longitudes de onda. La reflectancia espectral puede variar con las direcciones incidente y emitida. En la Figura 2.2 se muestran ejemplos de SRD para varias frutas comunes.

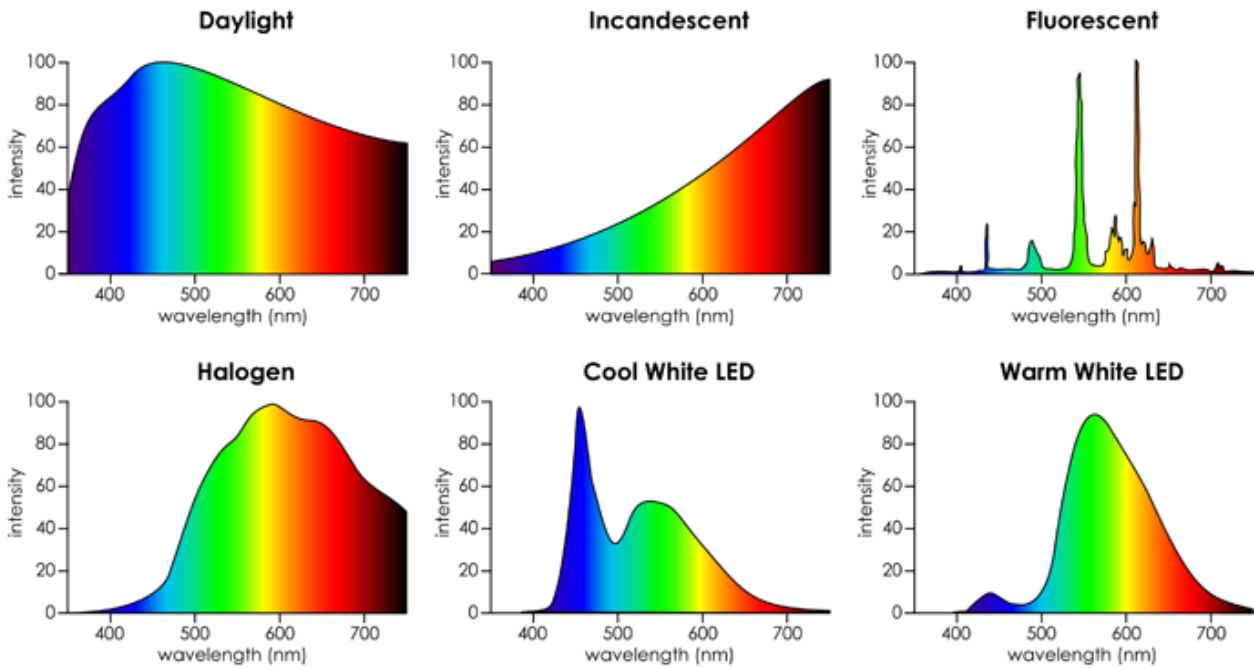


Figura 2.1: Densidades Espectrales de Potencia de fuentes luminosas tipo

Transmisión espectral

Las Densidades de transmitancia espectral (STD) son las cantidades relativas de potencia radiante transmitida en cada longitud de onda en un rango de longitudes de onda. La transmitancia espectral varía con la dirección incidente y de emisión. Para superficies translúcidas como ventanas y tragaluces, el efecto de ese objeto sobre la radiación óptica se puede caracterizar mediante DEP.

En la Figura 2.3 se muestran ejemplos de dos tipos de acristalamientos de ventanas. La reflectancia espectral y la transmitancia pueden ser necesarias para caracterizar objetos translúcidos, ya que reflejan y transmiten radiación óptica.

Absorción espectral

La fracción de radiación óptica que es absorbida por un material se disipa como calor o se vuelve a emitir a longitudes de onda más largas. Cuando se disipa como calor, se pierde radiación óptica visible. La absorción suele depender espectralmente.

Dispersión espectral

La dispersión se refiere a la re-dirección de la radiación óptica desde su dirección de incidencia por reflexión, difracción o transmisión. El color de un material depende de la magnitud y geometría de la dispersión y la cantidad de absorción. El color y la dispersión son el resultado de lo que ocurre a nivel molecular. La dispersión aumenta con el tamaño de las partículas hasta que tienen aproximadamente el mismo tamaño que la longitud de onda de la radiación óptica y luego disminuye a medida que el tamaño de las partículas aumenta. Un objeto aparecerá de color blanco cuando hay muy poca absorción y la misma cantidad de dispersión en cada longitud de onda. Un material aparecerá coloreado cuando la dispersión depende de la longitud de onda. Un objeto que parece azul, por ejemplo, dispersará radiación óptica de longitud de onda corta mientras absorbe longitudes de onda más largas. Sin la dispersión de la superficie, un objeto tendrá un aspecto brillante o brillante, que es el resultado de reflejos especulares. Por tanto, la dispersión está íntimamente ligada tanto al color de la superficie como a la especularidad.

Fluorescencia

La fluorescencia puede ser responsable del color del objeto de una manera complicada al absorber la radiación óptica y volver a emitirla en longitudes de onda más largas. Los fósforos de las lámparas fluorescentes absorben la radiación óptica UV y la emiten nuevamente como radiación óptica visible. Los

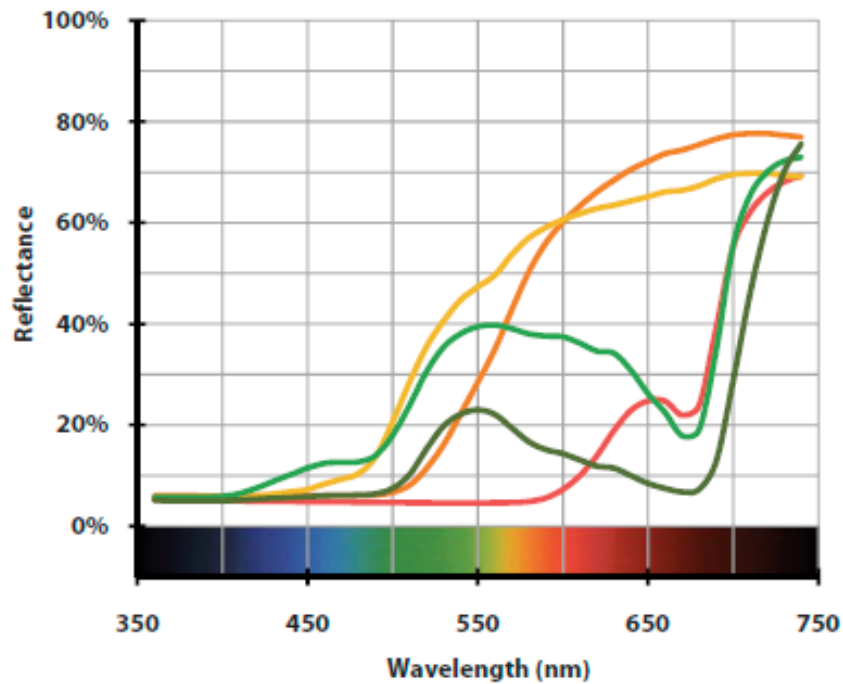


Figura 2.2: SRD de Frutas: Naranja-Naranja, Dorado-Limon, Verde claro-Manzana smith, Rojo-Manzana roja, Verde Oscuro- Lima [1]

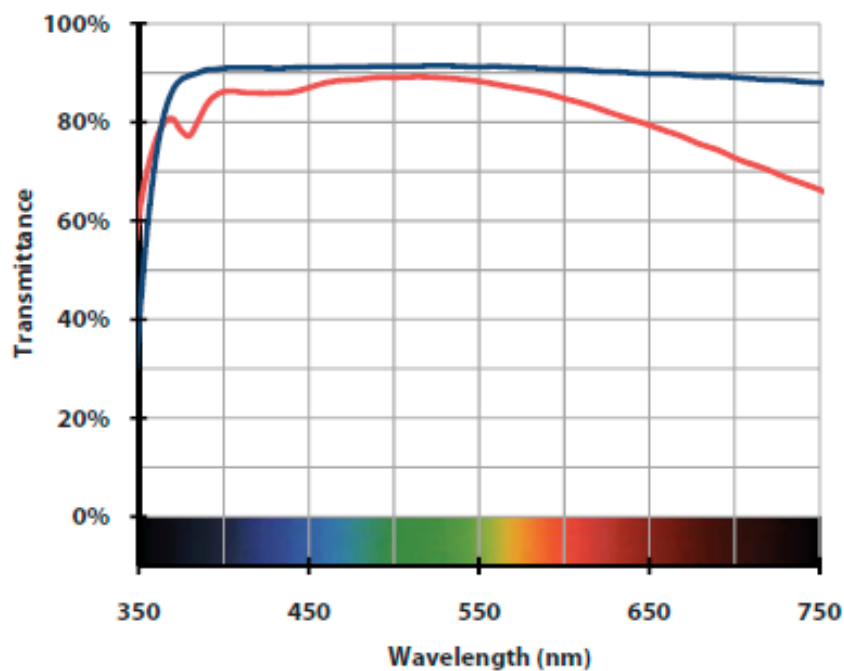


Figura 2.3: STD de vidrios: Azul - alta transmittancia, Rojo - transmittancia estándar[1]

agentes blanqueadores fluorescentes o agentes abrillantadores ópticos que actúan de esta forma se utilizan para blanquear papel y textiles. Absorben la radiación óptica UV y la emiten nuevamente como radiación visible de longitud de onda corta. Los agentes colorantes fluorescentes absorben radiación óptica dentro del rango visible y emiten radiación óptica en longitudes de onda visibles más largas; caracterizar tales superficies es complejo porque tienen una distribución espectral reflejada diferente bajo diferentes fuentes de luz.

2.1.3. Color práctico

El color percibido en un objeto es el resultado de la radiación óptica producida por una fuente, modificada por el objeto debido a la reflexión, transmisión, dispersión o fluorescencia, y finalmente penetrando en los ojos. La figura 2.4 proporciona un ejemplo esquemático de esta interacción fuente/objeto.

En la columna de la izquierda se encuentran los SPD para dos fuentes comunes. La columna central contiene el SRD inherente a una manzana Red Delicious. La columna de la derecha contiene el espectro que reflejaría la manzana bajo cada una de las tres fuentes de luz. Una manzana Red Delicious parece roja porque refleja predominantemente radiación óptica roja mientras absorbe otras longitudes de onda. Pero solo aparecerá en rojo si está iluminado por una fuente que emite radiación óptica en la región de longitud de onda larga (roja) del espectro. En este ejemplo, la manzana tendrá una apariencia de color rojo oscuro tanto bajo la radiación óptica incandescente como bajo la luz del día. Pero bajo sodio de alta presión, que emite proporcionalmente menos radiación óptica de longitud de onda larga, la manzana cambiará en apariencia de color y será visto en un tono menos saturado. Menos saturado significa que el color cambia hacia un gris neutro, que en este caso sería un cambio hacia un rojo pardusco.

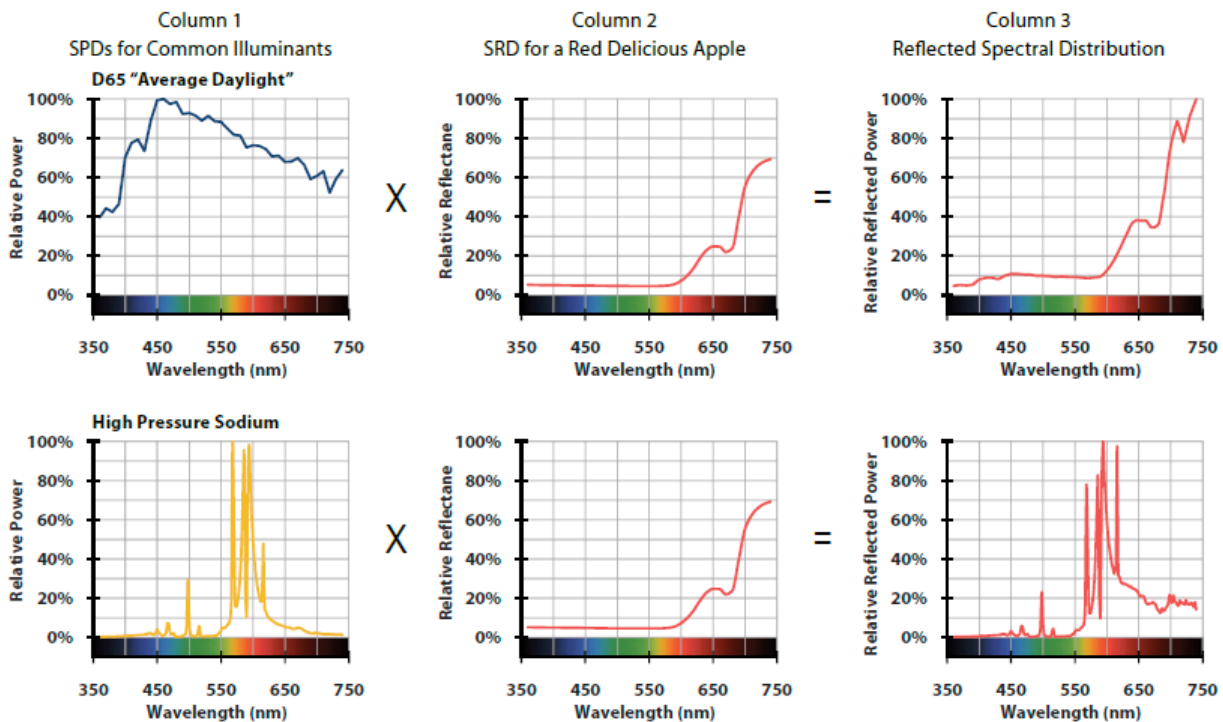


Figura 2.4: Interacción Objeto Fuente: Columna 1 SPD de fuentes de luz, Columna 2 SRD de una manzana roja y Columna 3 el SPD resultante.[1]

Mezcla de colores aditivos y sustractivos

La mezcla aditiva de colores es el proceso mediante el cual se integran o agregan diferentes longitudes de onda y la radiación óptica resultante contiene más potencia. Si se integran dos haces de radiación óptica de longitud de onda larga (rojo) y de longitud de onda media (verde), la mezcla se percibe como amarilla. Si se integran haces de radiación óptica de longitud de onda larga (rojo), media (verde) y de longitud de onda corta (azul) en las proporciones adecuadas, la percepción de la mezcla será blanca.

La mezcla sustractiva de colores es el proceso mediante el cual se absorben o restan diferentes longitudes de onda y la radiación óptica resultante contiene menos energía. El color se percibe en un objeto cuando se absorben ciertas longitudes de onda de radiación óptica incidente y se reflejan otras. La radiación reflejada hacia los ojos de un observador ya no contiene las longitudes de onda que fueron absorbidas. Los pigmentos, que son la base de la mezcla de colores sustractivos, son sustancias químicas que absorben y reflejan selectivamente diferentes longitudes de onda de radiación óptica. La mezcla sustractiva también puede ocurrir con filtros, ya que están diseñados para absorber ciertos colores dentro del espectro mientras

transmiten otros. Toda la radiación óptica reflejada y transmitida se somete a una cierta cantidad de mezcla de color sustractiva.

Las pinturas y tintas funcionan según el principio de mezcla de colores sustractivos. Una pintura o pigmento magenta aparece magenta porque absorbe la radiación óptica de longitud de onda media (verde) y refleja las longitudes de onda larga (rojo) y corta (azul). Recuerda que con aditivo mezclando longitudes de onda larga (rojo) y corta (azul) se combinan para hacer magenta. Una pintura cian absorbe longitudes de onda largas (rojo) y refleja longitudes de onda medias (verde) y cortas (azul), mientras que una pintura amarilla absorbe longitudes de onda cortas (azul) y refleja longitudes de onda largas (rojo) y medias (verde). Si se combinan las pinturas magenta y cian, la mezcla aparecerá azul. Esto se debe a que los pigmentos combinados absorben las longitudes de onda largas (rojo) por la pintura cian y las longitudes de onda medias (verde) por la pintura magenta. Finalmente, si el nuevo azul la pintura se mezcla con pintura amarilla, los tres colores primarios se absorberán y esta nueva mezcla aparecerá negra.

2.1.4. Percepción del color humano

El color no es una propiedad intrínseca de la radiación óptica o de los objetos: es un fenómeno perceptivo que forma parte de la experiencia visual. Ni la radiación óptica ni los objetos están coloreados de la forma en que se experimentan. Aunque quizás sea conveniente pensar que un limón se ve amarillo porque es amarillo, esto es fundamentalmente incorrecto. También es común asignar diferentes colores a diferentes longitudes de onda de radiación óptica, aunque las propias longitudes de onda son incoloras.

La conversión de energía radiante en percepciones de color es extremadamente compleja y la comprensión actual es incompleta. Pero hay muchas herramientas, derivadas de lo conocido, disponibles para los profesionales del diseño. Estos incluyen métricas para cuantificar el color de la fuente de luz, la diferencia de color, la representación de objetos iluminados y métricas para predecir cómo el sistema visual humano percibirá el color, incluso en entornos complejos. Estas herramientas impulsadas por aplicaciones se basan en modelos de visión humana del color.

Foto-receptores

La percepción del color comienza con los foto-receptores retinianos. La Figura 2.5 muestra la superposición entre las sensibilidades espectrales de los tres tipos de conos, especialmente entre los conos L y M. Estas las superposiciones implican que el sistema visual no trata todas las longitudes de onda por igual. Este muestreo desigual es importante porque permite a los humanos tener una fina discriminación de color. En muchas regiones de la retina, los foto-receptores individuales agrupan sus señales para formar campos receptivos. En todos los casos, las señales se envían a través del nervio óptico hacia el cerebro. Es el cerebro el asiento de la visión; es donde las señales son interpretadas, se crea el color y donde se realiza la visión.

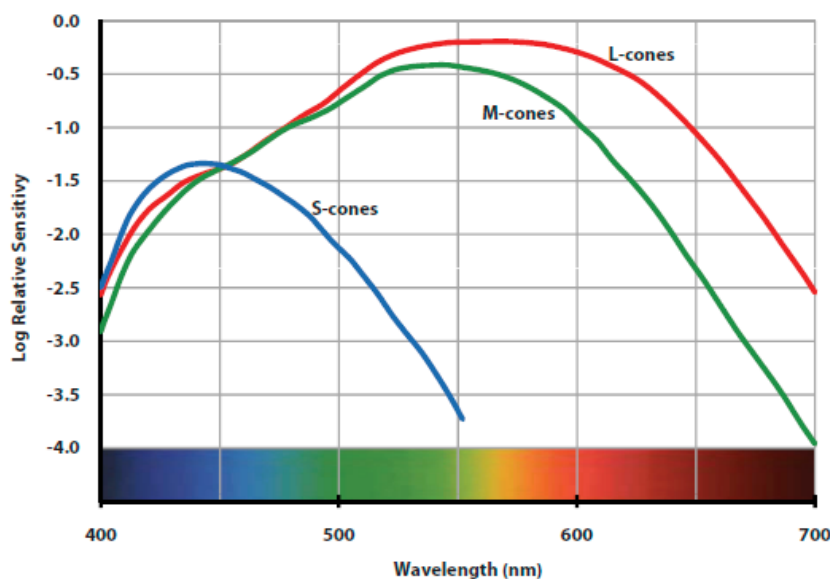


Figura 2.5: Probabilidades de absorber radiación óptica como una función de la longitud de onda de los foto-pigmentos en los tres tipos de foto-receptores de cono. Esto se muestra para conos foto-receptores S = longitud de onda corta, M = longitud de onda media, L = longitud de onda larga.[1]

Metamerismo

Cuando se combinan dos (o más) longitudes de onda, es imposible para un observador identificar las longitudes de onda, o incluso saber que el estímulo contiene diferentes longitudes de onda. La implicación es que dos fuentes diferentes pueden parecer idénticas aunque tengan diferentes SPD. El fenómeno en el que los estímulos de radiación óptica que son espectralmente diferentes parecen idénticos para un observador dado se conoce como metamerismo.

El metamerismo es el concepto más importante en la ciencia del color, lo que permite que muchas tecnologías que se basan en la reproducción del color tengan éxito utilizando solo tres o cuatro primarios para representar todos los colores. Algunos ejemplos son pantallas de computadora, televisión, impresión, fotografía, lámparas fluorescentes trifósforo y LED RGB. Combinar materiales que usan diferentes colorantes también se basa en el metamerismo, como hacer coincidir el panel de plástico de un guardabarros de automóvil con el panel de puerta pintado.

Tricromacia

La tricromacia es la característica de la visión mediante la cual los estímulos complejos se pueden reducir a tres señales visuales. Se cree que cuando dos estímulos producen las mismas señales de cono, coincidirán en color. En colorimetría aplicada, no se utilizan funciones de sensibilidad de cono directamente para caracterizar una coincidencia visual. Más bien, el procesamiento simultáneo de los tres canales visuales se cuantifica utilizando funciones de igualación de color (CMF).

Funciones de igualación de colores RGB

Aunque la mayoría de los profesionales del diseño no aplicarán los CMF directamente, es útil tener una comprensión básica de su derivación y cómo conducen a las herramientas prácticas de análisis y especificación del color.

A continuación se ofrece una descripción esquemática de los procesos de búsqueda de funciones de igualación de colores. Un disco luminoso se divide en dos semicírculos, un campo de prueba y un campo de referencia, y se ve dentro de una habitación oscura, como se ilustra en la Figura 2.6. Los campos de prueba y de referencia se pueden iluminar por separado con radiación óptica monocromática de diferentes partes del espectro, como rojo (R), verde (G) y azul (B). Estos forman un conjunto primario RGB y son fijos para cualquier experimento dado. Por ejemplo, los primarios R, G y B pueden tener longitudes de onda de 700, 546 y 436 nm, respectivamente.

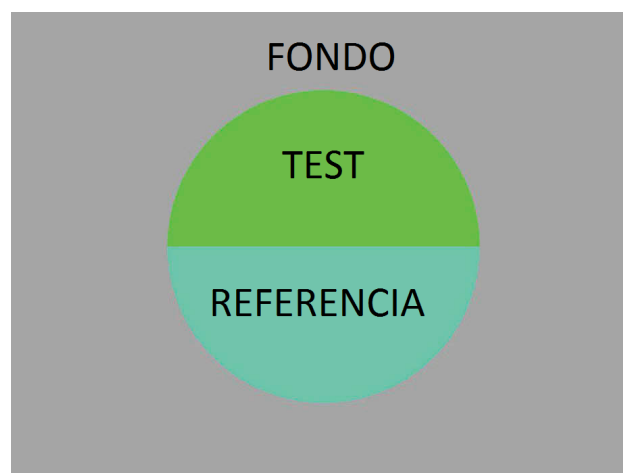


Figura 2.6: Campo visual bipartido: esquema de un campo visual circular bisechado horizontalmente como se utiliza en experimentos de visión para derivar CMF. El color en el campo de prueba es ajustable. El color en el campo de referencia puede ser ajustable. El fondo está fijo. [1]

Con el fondo de referencia iluminado con una radiación monocromática distinta a una de las primarias, un observador ajusta por separado las primarias R, G y B en el campo de prueba, intentando igualar visualmente el campo de referencia. Cuando se combinan con éxito, las cantidades de radiación óptica R, G y B en el campo de prueba se suman para producir un color que es un metamero del color en un fondo de referencia.

Para algunas longitudes de onda en el campo de referencia, el observador no podrá producir una coincidencia. En tales casos, uno de los primarios se mueve al campo de referencia. Matemáticamente,

agregar un primario al campo de referencia equivale a restarlo del campo de prueba. Este fenómeno, que la coincidencia de colores sigue las leyes de la suma algebraica, se conoce como Ley de Aditividad de Grassmann.

Esta correspondencia se realiza para cada una de las muchas radiaciones monocromáticas a través del espectro visible. En cada partido, el sujeto habrá ajustado las primarias para crear un metamero para la longitud de onda de referencia en el fondo de referencia. Experimentos de emparejamiento metamérico como este han sido realizados por 17 observadores y proporcionan datos que ahora son estándar [3] [4].

Las cantidades de cada primario requeridas para producir una coincidencia para cada color monocromático definen los CMF rojos, verdes y azules, conocidos como $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ y $b(\lambda)$, como se muestra con líneas continuas en la Figura 2.7. Las funciones $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ y $b(\lambda)$ definen los valores triestímulos del espectro para este conjunto particular de primarios y definen las cantidades relativas de cada componente primario que se requieren para coincidir con un estímulo dado. La barra sobre cada variable implica un promedio porque los datos de la Figura 2.6 se basan en el promedio de coincidencias de color realizadas por los observadores. Las letras mayúsculas R, G y B se utilizan para denotar los valores triestímulos para este conjunto de CMF. Tenga en cuenta que $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ y $b(\lambda)$ tienen componentes negativos y positivos; lo negativo es más evidente en la función $r(\lambda)$.

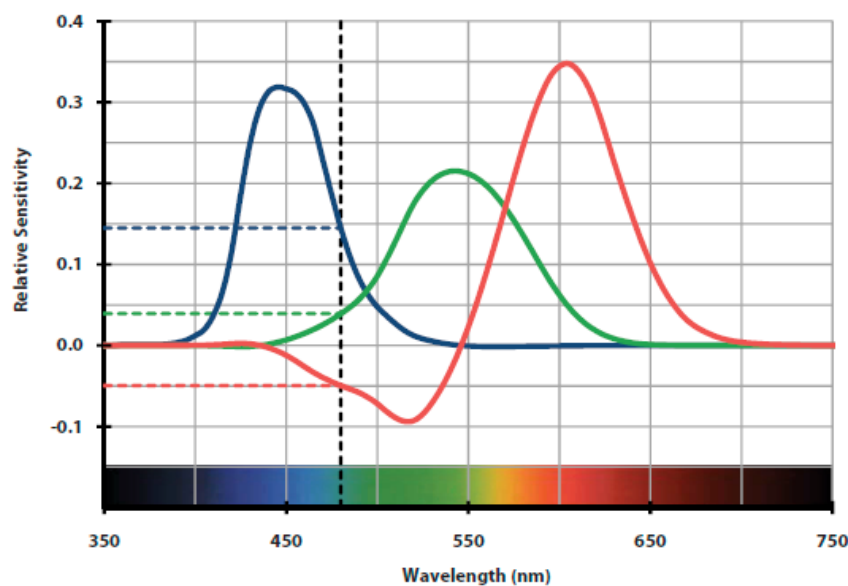


Figura 2.7: CMF RGB: Estas funciones de coincidencia de colores (CMF) se basan en datos de 17 observadores y para un conjunto primario compuesto por luces espectrales de 700, 546 y 436 nm. La intersección de la línea vertical discontinua a 480 nm y cada uno de los CMF definen los tres valores triestímulos requeridos para coincidir con una luz de referencia de 480 nm.[1]

Los valores de triestímulo definen las cantidades relativas de cada componente primario que se requieren para igualar un estímulo, como se ilustra con las líneas discontinuas en la figura 2.7.

La línea punteada vertical a 480 nm define la longitud de onda del estímulo del campo de referencia. Se logra una coincidencia visual cuando: el primario rojo se agrega al campo de referencia (porque tiene un valor negativo) y los primarios verde y azul están en el campo de prueba (porque son positivos). Las cantidades relativas de las primarias R, G y B necesarias para hacer esta coincidencia se indican con líneas horizontales discontinuas que se extienden y corresponden a los valores en el eje vertical. Los valores de triestímulo requeridos para esta coincidencia son $R = -0.049$, $G = 0.039$ y $B = 0.145$. Es decir, el campo de referencia monocromático de 480 nm es metaméricamente igual a: $-0.049r(\lambda) + 0.039g(\lambda) + 0.145b(\lambda)$.

Funciones de igualación de colores XYZ

Una dificultad práctica con el sistema RGB es que los CMF tienen valores positivos y negativos que complican la medición; un instrumento diseñado para ejemplificar los CMF RGB necesitaría responder negativamente a la radiación óptica en algunas longitudes de onda. Esta dificultad se superó transformando matemáticamente los CMF RGB en un nuevo sistema de CMF sin valores negativos. Al mismo tiempo, se crearon las nuevas funciones de manera que el CMF del medio corresponde exactamente a la función $V(\lambda)$. El nuevo conjunto de CMF transformados no representa la psicofísica subyacente de la combinación de colores humanos. Son una forma numéricamente confiable de cuantificar el metamerismo, pero se basan en un conjunto imaginario de primarias. Los CMF transformados se denotan como $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ y $z(\lambda)$, y los

valores de triestímulo se denotan como X, Y y Z. Además, hay dos conjuntos, los cuales se ilustran en la Figura 2.8, que traza los observadores estándar CIE 2° de 1931 y CIE 10° de 1964. La CIE recomienda el uso del Observador estándar de 1931 cuando la subtensión angular del campo de visión está entre 1° y 4°. El Observador estándar CIE 1964 está diseñado para usarse cuando el subtensión angular es mayor de 4°. Los CMF se han desarrollado para tamaños de campo que se aproximan a la visualización de campo completo, concluyendo que los CMF continúan cambiando con tamaños de campo superiores a 10° [5].

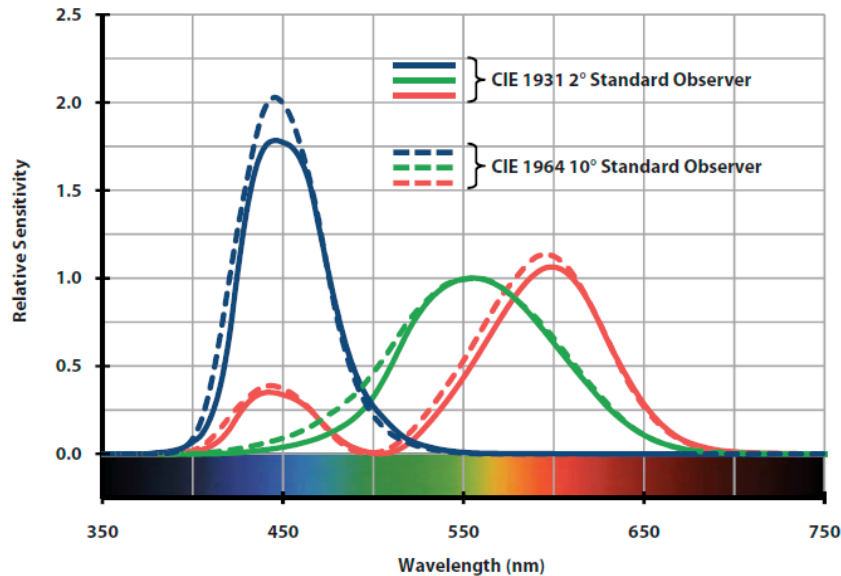


Figura 2.8: CMF XYZ de 2° y 10°: Los conjuntos más comunes de funciones de coincidencia de colores, los de los observadores estándar CIE 1931 2° y CIE 1964 10°.

Cálculo de valores triestímulos

Los observadores estándar, que se aproximan a la respuesta promedio de los observadores humanos, se utilizan para reducir los estímulos complejos como SPD, SRD y STD, en tres valores triestímulos.

Los valores de triestímulo se calculan multiplicando el espectro del estímulo por cada uno de los CMF, longitud de onda por longitud de onda, y luego sumando los resultados. La figura 2.9 proporciona una ilustración gráfica de esta operación numérica. El gráfico de la izquierda en la Figura 2.9 es idéntico al gráfico de la parte superior derecha de la Figura anterior; representa el espectro reflejado de una manzana Red Delicious iluminada por la luz del día. Cuando esta radiación óptica reflejada golpea la retina, se muestrea selectivamente de una manera que se puede caracterizar con los tres CMF, como se representa en la columna central de la Figura 2.9. Los valores de triestímulo (X, Y y Z) están representados por las áreas bajo la curva en la columna más a la derecha de la Figura 2.9. Los números insertados en estos gráficos de la derecha son los valores triestímulos calculados.

Si dos estímulos tienen valores triestímulos idénticos, entonces los estímulos son metameros. Los diferentes espectros reflejados que se muestran en la última columna de la Figura 2.4 pueden sugerir al principio percepciones de color muy diferentes para la manzana roja, siendo las formas de los espectros reflejados bastante diferentes. Pero la manzana roja no se verá significativamente diferente bajo cada fuente porque no se retiene la información de la longitud de onda individual, el resultado de percepción es un tono de rojo sutilmente diferente debajo de cada fuente.

2.2. Especificación de color: Sistema CIE

El sistema de especificación de color CIE se emplea para prácticamente todas las medidas colorimétricas relacionadas con las fuentes de luz, incluida la especificación de CCT, CRI y tolerancias de color [6].

2.2.1. Diagramas cromáticos

Un diagrama cromático CIE es una representación cuantitativa bidimensional de lugares donde dos estímulos serán metameros. Los estímulos con los mismos valores de triestímulo tienen las mismas

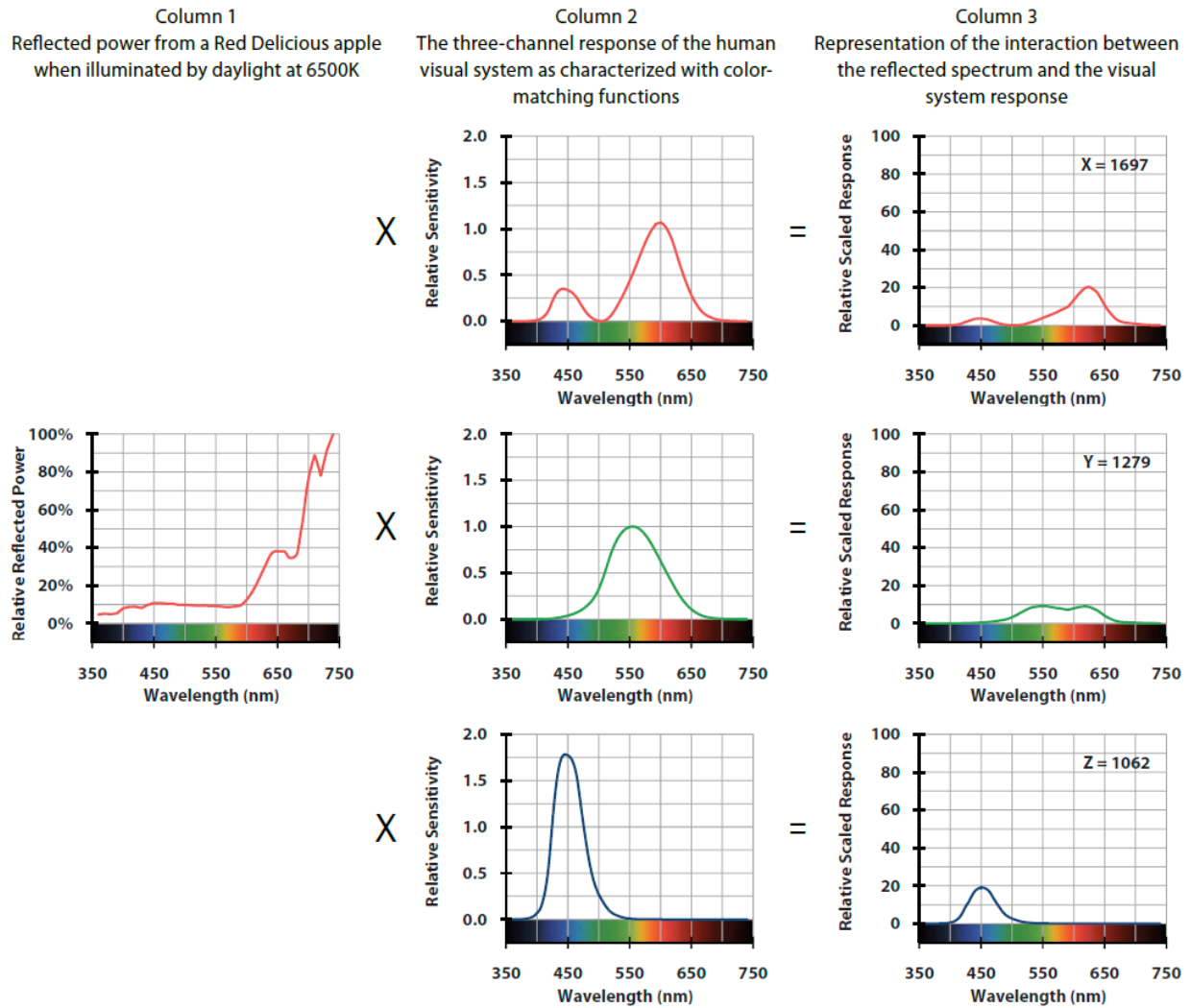


Figura 2.9: Distribución espectral reflejada a valores triestímulo: Columna 1 representa la luz reflejada por una manzana roja iluminada por la luz del día. La columna 2 representa los CMF de 2° CIE 1931 como se indica anteriormente. La columna 3 representa la interacción entre el estímulo espectral que inicia la visión cuando entra en los ojos (columna 1) y un proxy imaginario para las respuestas espectrales de tres canales del sistema ojo-cerebro (columna 2). Las cantidades representadas por las tres “áreas bajo las curvas” en la Columna 3 se conocen como valores triestímulo. [1]

coordenadas cromáticas y se grafican en el mismo punto del diagrama. Las coordenadas cromáticas son la fracción de los valores triestímulo X, Y o Z del estímulo, dividida por su suma. Es decir:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (2.1)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2.2)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (2.3)$$

Donde: x, y y z = coordenadas cromáticas, que no tienen unidades, cada una con un valor entre 0 y 1,0. X, Y y Z = valores de Triestímulo, que no tienen unidades, cada uno con un valor entre 0 e infinito. Tenga en cuenta que $x + y + z = 1$ y la especificación de dos arregla el tercero. Por convención, la cromaticidad se expresa en términos de x e y.

La Figura 2.10 ilustra el diagrama cromático para el Observador estándar de 2° CIE 1931, que es el diagrama que se usa más comúnmente para la especificación colorimétrica. Los diagramas cromáticos se utilizan en la determinación de la temperatura de color correlacionada (CCT), el índice de reproducción cromática (CRI) y algunas medidas de diferencia de color.

Un diagrama cromático a veces se interpreta incorrectamente como un mapa bidimensional de color, y los diagramas cromáticos a menudo se presentan con una matriz continua de colores, como si fueran diagramas de color, en lugar de diagramas cromáticos. Debe entenderse que cuando se muestran los colores, como en la Figura 2.10, son solo para orientación. Dado que las coordenadas cromáticas son valores de triestímulo normalizados, cambiar solo la potencia radiante relativa de una fuente no cambia sus coordenadas cromáticas aunque la percepción del color pueda cambiar. Los diagramas cromáticos no tienen en cuenta la dimensión brillante-tenué de la percepción del color; explican el tono y la saturación, pero no la luminosidad. Esto se ilustra esquemáticamente en la Figura 2.11.

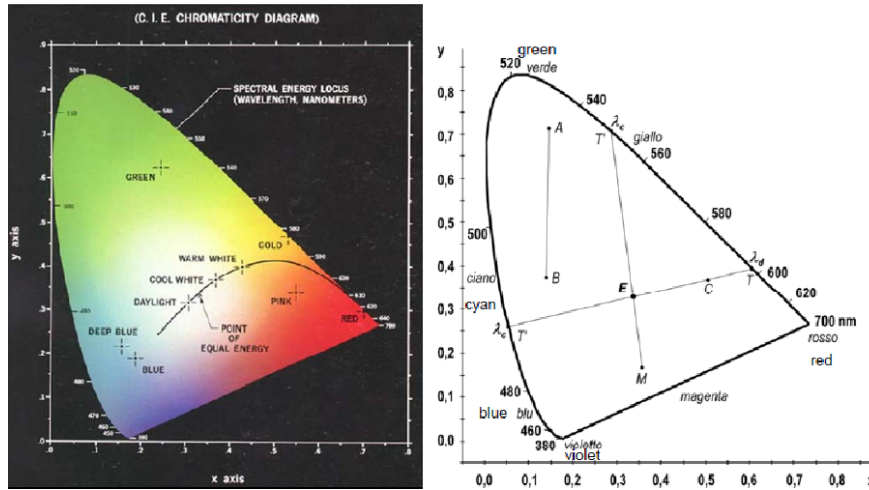


Figura 2.10: Diagrama cromático (x,y,Y) según la CIE

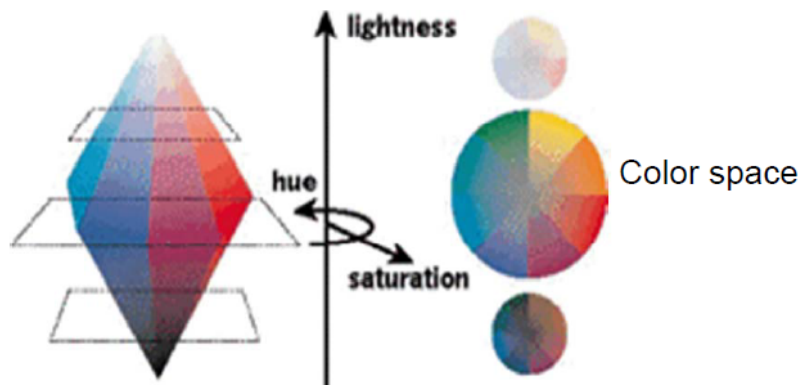


Figura 2.11: Diagrama 3D del color percibido

Las coordenadas cromáticas se pueden determinar en lámparas por su SPD, en objetos por SRD, en materiales translucidos por su STD y para “colores prácticos” que explican espectralmente las interacciones entre la fuente de luz y el objeto. Están disponibles estándares que cubren estos cálculos y para el manejo de casos especiales [7]. La curva en forma de herradura de la figura 2.10 se denomina “locus” del espectro y comprende las coordenadas cromáticas para la radiación óptica monocromática de 360 a 830nm. La línea que une los extremos del locus del espectro es el “límite púrpura”. Consiste en las coordenadas de los púrpuras más saturados que se pueden obtener. El púrpura se crea combinando trazados de rojo puro con azul puro, y por lo tanto, púrpura entre los extremos del locus del espectro. Todos los colores están contenidos dentro del área delimitada por el lugar geométrico del espectro y el límite púrpura. Aparece un color saturado hacia el perímetro y colores menos saturados hacia el centro. Por tanto, una fuente de luz con una emisión espectral muy estrecha centrada alrededor de una longitud de onda se trazará cerca del lugar del locus del espectro, mientras que una fuente que emite radiación óptica de banda ancha o de espectro completo se trazará en la región central. En muchas situaciones, es más importante tener un método preciso para describir la diferencia de color que tener un modelo preciso para predecir la apariencia absoluta del color. Por ejemplo, a menudo es deseable que las lámparas en interiores arquitectónicos coincidan en apariencia, ya que las diferencias de color entre las fuentes pueden ser visualmente discordantes. Una limitación importante de los diagramas cromáticos CIE 1931 y 1964 es que la misma distancia entre un par de coordenadas no corresponde a la

misma cantidad de diferencia de color percibida en todas partes del diagrama.

Se puede establecer una elipse alrededor de una coordenada cromática que establece el límite en el que un porcentaje dado de personas puede determinar que dos colores, uno con coordenadas cromáticas en el centro de la elipse y otro con coordenadas cromáticas en la elipse son simplemente notablemente diferentes[8]. Las elipses cambian de tamaño sobre el diagrama como se ilustra en la Figura 2.12. Estas elipses de MacAdam se emplean para establecer tolerancias de color para algunas fuentes de luz [9].

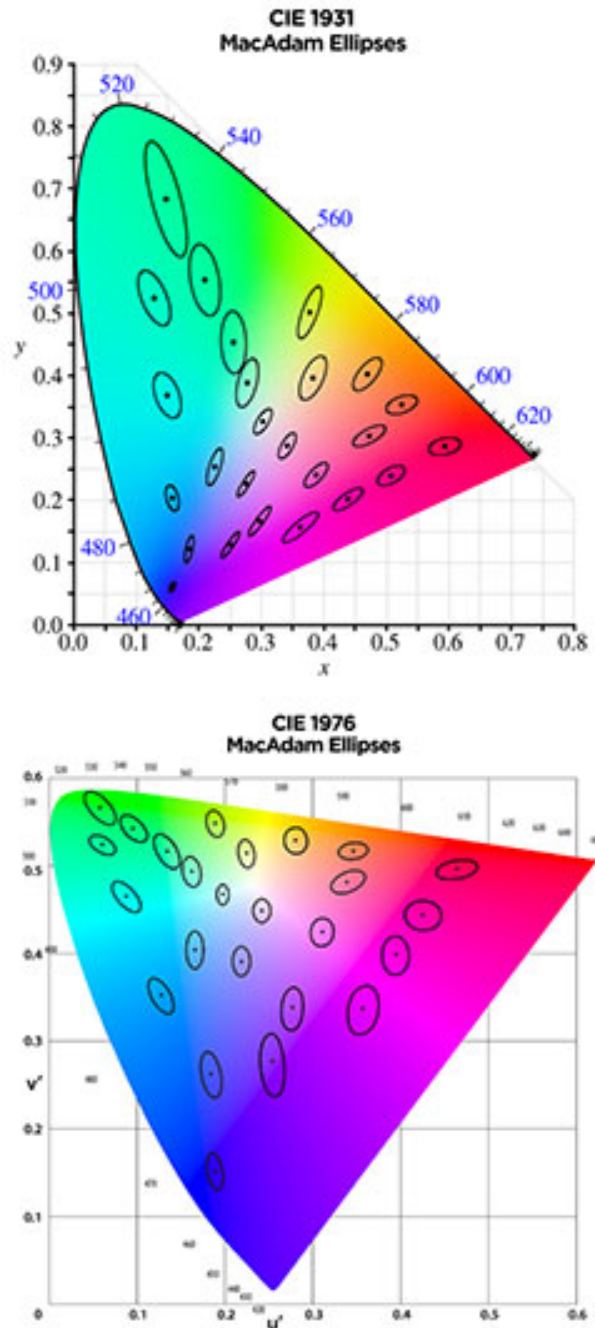


Figura 2.12: Elipses de MacAdam: El diagrama cromático CIE 1931 y CIE 1976 que muestran las elipses de MacAdam agrandadas en un factor de diez.[1]

El hecho de que estos límites sean elipses de diferentes tamaños significa que el diagrama cromático no es perceptiblemente uniforme: un espacio cromático uniforme limitaría las diferencias de color con círculos de radios iguales. Se han sugerido varias transformaciones que proporcionan un espaciado más uniforme.

2.2.2. Propiedades del diagrama CIE

Existen otras propiedades importantes en este diagrama.

Curva del cuerpo negro

Primero la curva en el centro, representa los puntos de igual color de emisión de un cuerpo negro desde los 1000 K a los 20000 K. Sobre esta curva podemos encontrar los diferentes tipos de blancos que se informan comercialmente.

Punto Acromático

Segundo se encuentra el punto de igual energía, en el cual todos los tonos son acromáticos (equivalente al punto central de la figura ??).

Linealidad

Si se forma un color como la mezcla de los colores en los puntos A y B, el color resultante estará sobre la recta que une los puntos A y B.

Pureza

Los colores puros son los que se encuentran sobre la curva exterior del diagrama.

Longitud de onda y tonos: Dominante λ_d y Complementaria λ_c

Si para un color en el punto C, trazamos la recta que determinan C y el punto acromático se tienen 2 cortes con el contorno del diagrama. El corte de la semirrecta desde el punto acromático que contiene a C determina la longitud de onda dominante. El corte de la semirrecta opuesta determina la longitud de onda complementaria. Análogamente estos puntos de cortes determinan el tono dominante T y complementario T' .

2.2.3. Sistemas espaciados más cercanos a la uniformidad

Basado en un trabajo anterior [10], la CIE adoptó un diagrama de Escala cromáticas uniforme (UCS) en 1960. Los cálculos de la temperatura de color correlacionada todavía pueden emplear esta escala. La escala de 1960 fue modificada y reemplazada en 1976 y se muestra en la Figura 2.12. Ambas escalas se producen mediante una simple transformación lineal de coordenadas cromáticas o valores triestímulos. [6] [11].

Ambos sistemas mejoran la relación entre la diferencia de color percibida y la distancia de separación, pero una limitación importante de estos y de todos los diagramas cromáticos es la falta de uniformidad de percepción en función de la luminosidad o factor de reflectancia luminosa. Las propiedades acromáticas de claridad, negrura y blancura son atributos de color importantes. Por ejemplo, el marrón y el naranja pueden tener la misma cromaticidad pero se perciben como colores diferentes porque tienen valores diferentes de luminosidad. Características acromáticas no se puede evaluar a partir de ningún diagrama cromático porque solo se representan dos dimensiones, como se ilustró anteriormente en la Figura 2.11. Esta es una limitación inherente que hace que todos los diagramas cromáticos bidimensionales no sean adecuados para caracterizar la diferencia de color.

En 1976, la CIE recomendó dos nuevos espacios de color uniformes, conocidos como CIELUV y CIELAB, que señalaban el cambio de una escala cromática a un espacio de color y estaban relacionados con el cambio de dos a tres dimensiones. La terminología oficial es el espacio CIE 1976 L^* , a^* , b^* , con la abreviatura oficial CIELAB, y el espacio CIE 1976 L^* , u^* , v^* , con la abreviatura oficial CIELUV [11]. Las coordenadas a^* y u^* están relacionadas visualmente con una dimensión perceptiva de enrojecimiento-verdor. Las coordenadas b^* y v^* están relacionadas visualmente con una dimensión perceptiva de amarillo-azul. Las dimensiones a^* , b^* y u^* , v^* son conceptualmente análogas y pueden derivarse de las coordenadas cromáticas x , y . La coordenada L^* es un índice de luminosidad. Los espacios de color CIELAB y CIELUV, por lo tanto, están organizados de una manera análoga a los canales opuestos de la visión humana. La figura 2.13 es una representación esquemática de CIELAB.

Aunque estos espacios de color proporcionan una representación más uniforme de las diferencias de color y reemplazan las escalas de cromaticidad para la mayoría de los propósitos, el diagrama UCS de 1976 se ha conservado para el cálculo de los índices de reproducción cromática CIE.

2.2.4. Diferencia de color

La diferencia de color se calcula dentro de espacios de color tridimensionales que tienen un espaciado visual aproximadamente uniforme. CIELAB y CIELUV son ejemplos de tales espacios y las fórmulas de diferencia de color están asociadas con ambos. Los resultados de las fórmulas de diferencia de color incluyen

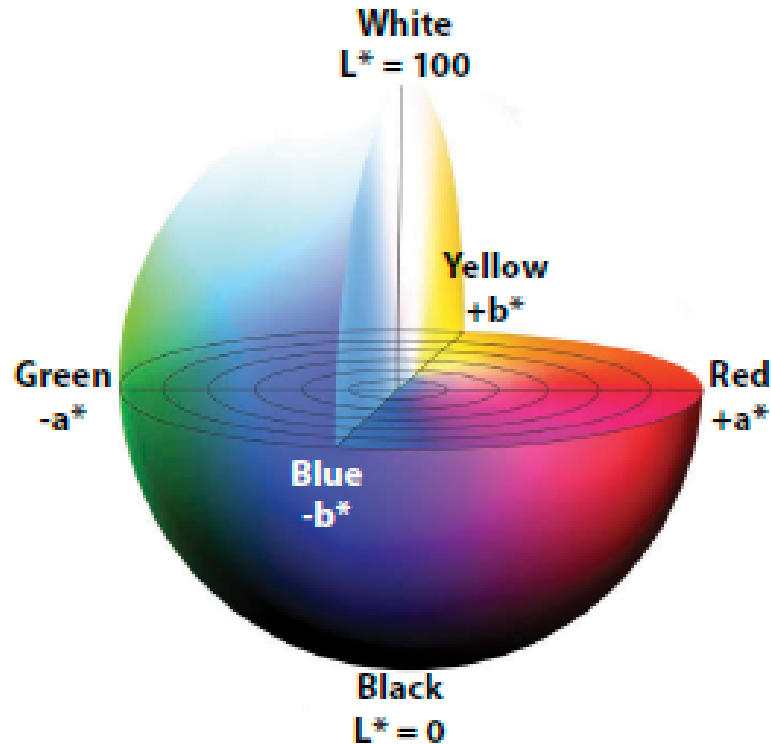


Figura 2.13: CIELAB: Representación esquemática del espacio color CIELAB, también conocido como $L^*a^*b^*$. Foto Konica Minolta Sensing Americas

un valor único que representa la diferencia de percepción entre dos colores. Las ecuaciones se pueden aplicar a cualquier estímulo espectral, ya sea de objetos o iluminantes.

Inicialmente, la diferencia de color en estos espacios se calculó simplemente como distancia euclidiana, designada ΔE^*_{ab} en el espacio de color $L^*a^*b^*$. También se pueden calcular las correlaciones para los atributos subjetivos de luminosidad, saturación y tono. Los refinamientos posteriores en 1994 y 2000 proporcionaron valores de diferencia de color conocidos como ΔE^*_{94} y ΔE^*_{00} . ΔE^*_{00} es la fórmula de diferencia de color más precisa pero también matemáticamente más compleja.

2.2.5. Longitud de onda dominante, pureza de excitación y Longitud de onda dominante complementaria

El uso de la longitud de onda dominante, la pureza de excitación y la longitud de onda dominante complementaria ya no se recomienda. Se definen aquí porque siguen siendo de uso común, especialmente en la especificación de LED de colores, y porque sugieren más la apariencia de color de una fuente de luz u objeto que las coordenadas de cromaticidad x , y .

Estas cantidades se derivan de un diagrama cromático considerando el estímulo de radiación óptica en relación con el locus del espectro y un punto acromático supuesto. El punto acromático asumido para una fuente de luz, como un LED, son a menudo las coordenadas cromáticas para una fuente de igual energía, pero también puede ser la radiación de un cuerpo negro o una fase de la luz del día. El punto acromático asumido para los objetos suele ser el punto definido por las coordenadas cromáticas de la fuente de luz que se utilizará para iluminar el objeto.

La longitud de onda dominante de todos los colores cuyas coordenadas x , y caen en una línea recta que conecta el punto acromático con un punto en el locus del espectro es la longitud de onda indicada en la intersección de esa línea con el locus del espectro. Para algunos colores, la línea recta desde el punto acromático a través de la cromaticidad de prueba tocará el límite púrpura en lugar del lugar geométrico del espectro. Estos colores no tienen una longitud de onda dominante, sino que tienen una longitud de onda dominante complementaria, que se determina extendiendo la línea hacia atrás desde el punto acromático. El punto donde la línea extendida hacia atrás golpea el locus del espectro determina la longitud de onda dominante complementaria para tal color. La pureza de excitación, a veces simplemente llamada pureza, se define como la distancia desde el punto acromático a las coordenadas cromáticas del estímulo, dividida por la distancia total a lo largo de la misma línea desde el punto acromático al lugar del espectro o al límite

púrpura. Es una cantidad sin unidades de 0 y 1, o de 0 a 100 si se expresa como porcentaje. La pureza de la excitación se correlaciona de alguna manera con la saturación. Una fuente de luz monocromática se traza en el locus geométrico del espectro y tiene una pureza de excitación de 1.0. De ello se deduce que, para cualquier fuente de luz dada, cuanto más cerca esté la pureza de excitación a 1.0, más saturado aparecerá será el color. La longitud de onda dominante se correlaciona algo con el tono. Las fuentes de luz con diferentes longitudes de onda dominantes tendrán diferentes matices. Por ejemplo, las longitudes de onda dominantes de 450, 530 y 610 nm sugieren tonos azul, verde y rojo anaranjado, respectivamente. Dos fuentes con la misma longitud de onda dominante pueden tener diferentes matices, particularmente si se usa un punto acromático diferente para cada una.

2.2.6. Temperatura de color y temperatura correlacionada de color (CCT)

1.4.4.1

El espectro de radiación óptica y, por lo tanto, el color aparente de un cuerpo negro depende únicamente de su temperatura. El color y la temperatura aparentes de un cuerpo negro están vinculados y, por lo tanto, la temperatura de un cuerpo negro se puede utilizar para describir la apariencia del color de una fuente de luz, llamada temperatura de color. Las temperaturas del cuerpo negro son temperaturas absolutas, expresadas en unidades de kelvin (K). Un cuerpo negro teórico se vuelve blanco amarillento a 3000 K, blanco a 5000 K, blanco azulado a 8000 K y azul profundo a 60,000 K.

La temperatura de color se puede relacionar con los diagramas cromáticos discutidos anteriormente. La curva que atraviesa el centro de la figura 2.10 es el lugar geométrico del cuerpo negro o curva del cuerpo negro. El lugar geométrico del cuerpo negro representa las coordenadas cromáticas de un radiador de cuerpo negro a diferentes temperaturas, algunas de las cuales están etiquetadas. Los valores de la coordenada cromática x son mayores para la parte más a la derecha del lugar geométrico del cuerpo negro, donde la temperatura del cuerpo negro es baja. Un valor grande para x significa que las longitudes de onda largas son dominantes, lo que corresponde a las apariencias de color que son rojizas y visualmente cálidas. Moverse hacia la izquierda a lo largo del locus se corresponde con el aumento de la temperatura del cuerpo negro y con los cambios en la apariencia visual del cuerpo negro, de rojo pálido a blanco anaranjado, luego a blanco amarillento y eventualmente a blanco azulado. El punto más a la izquierda de la curva, etiquetado con el símbolo de infinito, representa una apariencia de color azul profundo. Las temperaturas bajas del cuerpo negro producen colores visualmente cálidos y las temperaturas altas del cuerpo negro producen colores visualmente fríos.

Si la cromaticidad de una fuente de luz cae exactamente en el lugar geométrico del cuerpo negro, la apariencia de esa fuente se puede especificar con una temperatura de color específica, ya que a esa temperatura un cuerpo negro emite radiación óptica que produce un color que coincide con el de la fuente de luz. Sin embargo, en muchos casos no es posible una coincidencia exacta de la fuente y las cromaticidades del cuerpo negro y se utiliza la temperatura correlacionada de color (CCT) para describir la coincidencia visual más cercana (CCT) es la temperatura absoluta que tiene un cuerpo negro cuando tiene aproximadamente el mismo color que la fuente. Al igual que la temperatura de color, el CCT también se expresa en unidades de kelvin (K). La figura 2.14 es una vista ampliada de la parte central del diagrama cromático. Muestra dónde se trazan algunas fuentes de luz comunes con respecto al lugar geométrico del cuerpo negro. Las líneas rectas son líneas de CCT constante. Al igual que con la temperatura de color, los CCT exhiben la misma combinación de bajas temperaturas con colores visualmente cálidos y altas temperaturas con colores visualmente fríos.

El CCT generalmente no tiene nada que ver con la temperatura de la superficie de una lámpara real o cualquiera de sus componentes. Hay que tener en cuenta que el CCT es un número único, destinado a encapsular algo sobre la apariencia del color de una fuente de luz. Dado que la percepción del color es multidimensional, se descarta la información del color.

Los índices de un solo número son cómodos y convenientes, pero deben reconocerse sus limitaciones inherentes. Al observar las líneas de CCT constante en la Figura 2.14, por ejemplo, se puede observar que dos fuentes de luz pueden tener la misma CCT pero cromaticidades muy diferentes. Esto significa que dos lámparas con valores idénticos de CCT pueden tener apariencias de color muy diferentes. Como ejemplo de este fenómeno, la lámpara fluorescente en el punto "D" y la lámpara de halogenuros metálicos en el punto "E" tienen un CCT de aproximadamente 3000 K. Sin embargo, no coincidirán porque no se trazan en el mismo punto en el diagrama cromático.

A menudo es deseable igualar la apariencia de color de las fuentes de luz dentro de un único entorno arquitectónico y, en estos casos, la CCT puede ser insuficiente. Una tienda minorista, por ejemplo, puede emplear lámparas fluorescentes lineales para iluminación general, halogenuros metálicos para acentuar pantallas verticales y LED dentro de la carpintería. En situaciones en las que la apariencia del color de lámpara a lámpara es una característica crítica del entorno luminoso, es prudente crear maquetas. En este ejemplo, una maqueta permitiría al propietario evaluar visualmente si las diferencias serían aceptables o no dentro de la estrategia minorista general. En la práctica, la selección de lámparas con CCT coincidentes (y

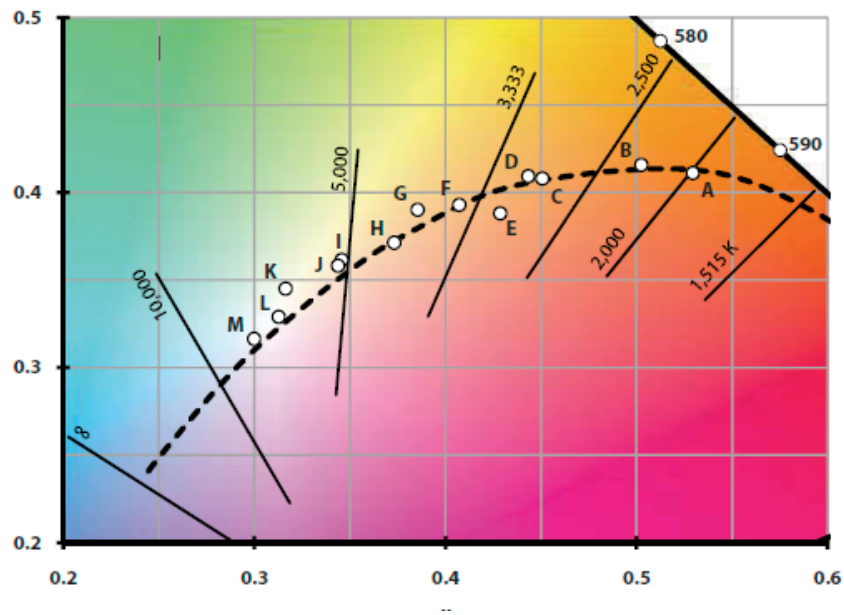


Figura 2.14: CCT: Vista ampliada del diagrama del diagrama cromático CIE 1931 que muestra la región cercana al lugar geométrico del cuerpo negro con líneas de isotemperatura para CCT y las coordenadas cromáticas de algunas fuentes de luz. A = sodio claro de alta presión, 2000 K B = sodio de alta presión CRI alto, 2200 K C = Incandescente GLS estándar, 2800 K D = T8 trifósforo fluorescente, 3000 K E = Halogenuro metálico cerámico, 3000 K F = T8 trifósforo fluorescente, 3500 K G = T8 trifósforo fluorescente, 4000 K H = Halogenuro metálico cerámico, 4100 K I = T12 fluorescente para evaluación de color, 5000 K J = T8 trifósforo fluorescente, 5000 K K = T8 trifósforo fluorescente, 6200 K L = CIE D65, 6500 K M = T12 fluorescente para evaluación de color, 7500 K

CRI altos, consulte la siguiente sección) es tan buena como se puede esperar si la especificación de diseño se realizará sin evaluar muestras o realizar maquetas.

2.3. Índice de Reproducción de color

Al seleccionar acabados arquitectónicos y diseñar sistemas de iluminación para que las personas y los objetos se vean como se espera, es relevante considerar tanto la apariencia de color absoluto de los objetos tanto cómo estos puede cambiar bajo diferentes fuentes de luz. Aunque hay muchas formas de evaluar la reproducción del color, se caracteriza más comúnmente asignando un índice de un solo número a una fuente de luz que se calcula mediante una norma CIE.

2.3.1. Método de ensayo de color CIE

El método de ensayo de color CIE clasifica las lámparas utilizando índices de reproducción cromática que representan el grado de cambio de color resultante de un objeto de ensayo bajo una lámpara de ensayo en comparación con su color bajo una fuente de referencia del mismo CCT. Los índices se basan en una comparación general de las longitudes de los vectores de diferencia de cromaticidad en el diagrama CIE uv 1964. La calificación consiste en un índice general, R_a o CRI, que es la media de los índices especiales, R_i , para un conjunto de ocho muestras de color de prueba que son de luminosidad moderada y aproximadamente igualmente espaciadas en tono. La Figura 2.15 traza la muestra de ocho colores de prueba bajo una fuente de referencia e ilustra la base gráfica para el cálculo. El CRI se mide en una escala de 0 a 100. Las lámparas que reproducen los ocho colores de prueba de manera muy similar a la fuente de referencia tendrán pequeños cambios cromáticos y un CRI alto. Por el contrario, las lámparas con un CRI bajo producen grandes cambios cromáticos en comparación con la referencia.

Para las lámparas con un CCT por debajo de 5000 K, la referencia es un radiador de cuerpo negro que funciona a la misma temperatura de color. Para lámparas con un CCT igual o superior a 5000 K, la referencia es un modelo matemático de la luz del día derivado de las mediciones del espectro de la luz del día. Los espectros de luz diurna utilizados en el cálculo de CRI se reconstituyen a partir de mediciones de luz diurna realizadas en Enfield, Inglaterra; Rochester, NY; y Ottawa, Canadá. Se calcula el espectro de luz diurna para que tenga el mismo CCT que la fuente de luz de prueba. Los datos espectrales tabulados se incluyen

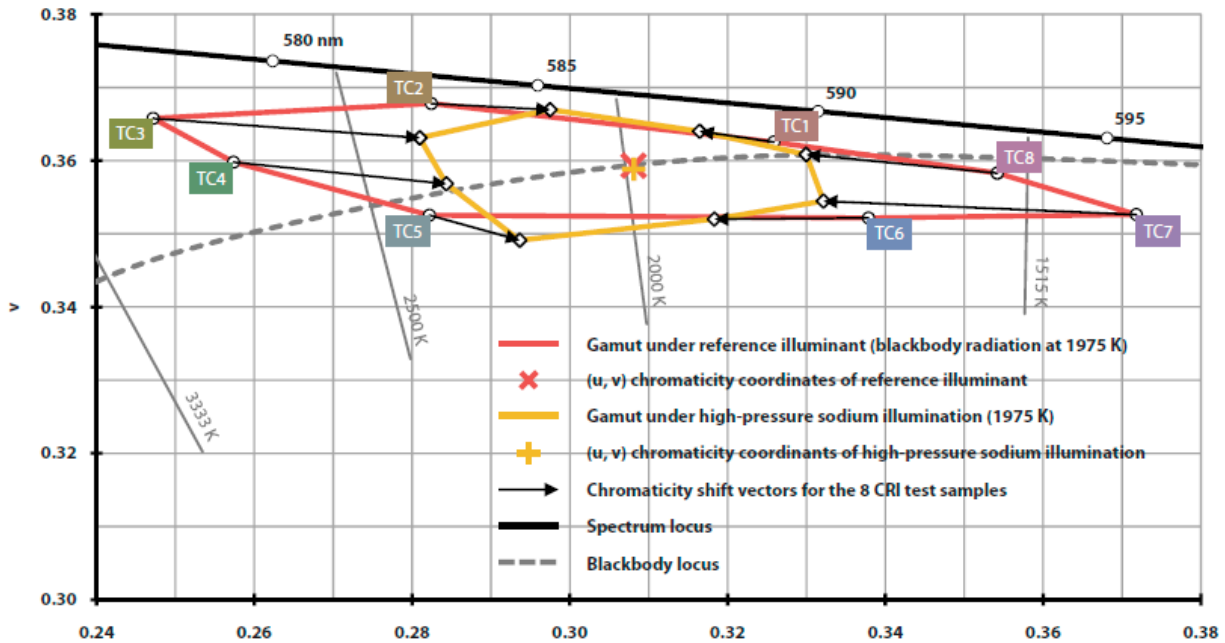


Figura 2.15: Base gráfica para CRI: Vista ampliada del diagrama cromático uv CIE 1960 que ilustra las magnitudes y direcciones del cambio cromático para las ocho muestras de color de prueba de CRI para la lámpara de sodio de alta presión.

en las recomendaciones de la CIE para radiadores de cuerpo negro de hasta 5000 K, para los espectros de luz diurna reconstituidos desde 5000 K hasta el infinito, y para los ocho colores de prueba generales y seis muestras especiales [13]. Las seis muestras de colores de prueba especiales incluyen cuatro colores saturados y uno representativo de piel caucásica y follaje verde moderado. La Tabla 2.1 proporciona su especificación y representaciones de color esquemáticas. Los colores mostrados son aproximaciones y no deben utilizarse en lugar de muestras reales. Las especificaciones definitivas se refieren a las funciones de SRD, previstas en CIE 13.3 [13]. De particular interés es el indicador R9, que corresponde a un rojo saturado. Es menos probable que las fuentes de luz con valores bajos para R9 sean aceptadas para iluminación general. Dado que una lámpara que exhibe un R9 débil aún puede presentar un CRI alto, se recomiendan las maquetas.

Debido a que la fuente de referencia para CRI cambia con CCT, solo es válido comparar el CRI de diferentes lámparas si su CCT es similar. Por ejemplo, se debe esperar que una lámpara fluorescente de luz diurna de 6500 K con un CRI de 84 represente los objetos de manera diferente a una lámpara fluorescente trifósforo de 3000 K con un CRI de 84. Esto ocurre porque el CRI para la lámpara de 6500 K se derivó de la comparación con un modelo de luz diurna y la lámpara de 3000 K se comparó con un cuerpo negro. Aunque ambas lámparas en este ejemplo tienen un CRI de 84, el número tiene un significado diferente para cada lámpara. A pesar de esta restricción, las lámparas con un CRI más alto son generalmente (pero no siempre) mejores para hacer que los objetos se vean como se esperaba. Por ejemplo, el sentido común sugiere que una lámpara fluorescente trifósforo de 3000 K con un CRI de 84 producirá una amplia gama de objetos de colores mejor que una lámpara de sodio de alta presión de 2100 K con un CRI de 21.

2.3.2. Limitaciones del método de prueba de color CIE

El método CIE para evaluar las propiedades de reproducción cromática de las fuentes se introdujo en 1965 y se actualizó en 1974. La importancia de adoptar un método sencillo y racional para evaluar las propiedades de reproducción del color de las fuentes de luz es evidente, por lo que a pesar de los desafíos y otras medidas fácilmente disponibles, el método CIE es la herramienta más utilizada dentro de la comunidad de iluminación. Aunque un índice de un solo número es deseable para facilitar su uso, no es realista esperar que un solo número caracterice completamente la experiencia multidimensional del color. La Tabla 2.2 resume las principales limitaciones de CRI.




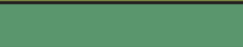



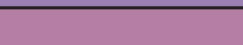






Test Color # (R ₁ -R ₁₄)	Munsell Notation	CIE Specification			ISCC-NBS Name	Approximate Appearance
		x	y	Y		
1	7.5 R 6/4	0.375	0.331	29.9	Light grayish red	
2	5 Y 6/4	0.385	0.395	28.9	Dark grayish yellow	
3	5 GY 6/8	0.373	0.464	30.4	Strong yellow green	
4	2.5 G 6/6	0.287	0.4	29.2	Moderate yellowish green	
5	10 BG 6/4	0.258	0.306	30.7	Light bluish green	
6	5 PB 6/8	0.241	0.243	29.7	Light blue	
7	2.5 P 6/8	0.284	0.241	29.5	Light violet	
8	10 P 6/8	0.325	0.262	31.5	Light reddish purple	
9	4.5 R 4/13	0.567	0.306	11.4	Strong red	
10	5 Y 8/10	0.438	0.462	59.1	Strong yellow	
11	4.5 G 5/8	0.254	0.41	20	Strong green	
12	3 PB 3/11	0.155	0.15	6.4	Strong blue	
13	5 YR 8.4	0.372	0.352	57.3	Light yellowish pink (Caucasian complexion)	
14	5 GY 4/4	0.353	0.432	11.7	Moderate olive green (leaf green)	

Tabla 2.1: Colores de ensayo CIE para el cálculo del CRI

Explicación de la limitación	Promedio de los cambios de color El CRI se calcula promediando las puntuaciones de las muestras de color de prueba 1 - 8. Por lo tanto, una fuente de luz puede alcanzar una puntuación aceptable incluso si uno o más de los colores de las muestras de prueba se reproducen de forma deficiente. El CRI no implica nada sobre la reproducción de un color de superficie en particular a menos que CRI = 100. Se debe tener especial cuidado al especificar fuentes de luz blanca que emplean componentes primarios de emisión estrecha, como ocurre con algunos LED, ya que son más susceptibles a reproducir mal algunos colores.
Muestras de prueba de color	Todas las muestras de color de prueba tienen una saturación moderada; ninguno está muy saturado. Como resultado, la reproducción cromática de los colores saturados puede ser deficiente incluso cuando el CRI es alto. Las muestras de color de prueba 9-12 son para colores saturados, pero no contribuyen al cálculo del CRI general. Esta debilidad puede ser especialmente aguda cuando la luz blanca se crea con componentes primarios de emisión estrecha, como ocurre con algunos LED.
Espacio de color	Los cambios de cromaticidad se calculan dentro del diagrama de cromaticidad UCS de 1964, que ya no se recomienda para ningún otro uso. La región roja de este espacio de color es particularmente no uniforme, lo cual es importante ya que la reproducción fiel de la complejidad humana depende de esta región espectral. Se podrían emplear otros espacios de color, como CIE LAB o CIE LUV.

Sanciones para todos los cambios cromáticos	CRI siempre relaciona un patrón de cromaticidad (para un conjunto de muestras de color de prueba) bajo la fuente de prueba con un patrón arquetípico de cromaticidad (para el mismo conjunto de muestras de color de prueba) bajo la referencia. Esto supone que el patrón de cromaticidad bajo la referencia es ideal, lo que no siempre, ni siquiera en general, es cierto. En aplicaciones prácticas, se ha demostrado que es deseable un aumento de la saturación, en comparación con los iluminantes de referencia, lo que probablemente se deba a un aumento del brillo percibido y a una discriminación de color mejorada.
Todos los CCT reciben el mismo trato	Las fuentes de referencia se definen para tener un CRI perfecto independientemente del CCT. Esto significa que un cuerpo negro muy rojizo (digamos, 2.000 K) y un espectro de luz diurna muy azulado (digamos, 20.000 K) tienen ambos un CRI de 100, a pesar de que ambos renderizarán objetos de formas peculiares.
Dependencia de CCT	Se usa un iluminante de referencia diferente en cada CCT, lo que hace que sea incorrecto comparar el CRI de fuentes de luz que tienen diferentes CCT. Una escala absoluta que permita comparaciones entre todas las fuentes de luz, independientemente del CCT, puede ser más deseable.
Adaptación cromática	La adaptación cromática se explica con una transformada de Von Kries, que se ha demostrado que funciona mal y ya no es recomendado para cualquier otro uso. Podría emplearse la transformada de adaptación cromática CIE más reciente, CIE CAT02.
Índice de un solo número	Los índices numéricos únicos para describir la reproducción cromática son intrínsecamente útiles y fundamentalmente defectuosos. Cualquier medida de reproducción del color que reduzca la experiencia multidimensional del color en un solo valor descartará información que puede ser importante para un profesional del diseño.
Discontinuidad a 5000 K	A 5000 K, el iluminante de referencia cambia de un cuerpo negro a una fase de luz diurna. Esto es importante para cualquiera que desarrolle iluminación de estado sólido con temperatura de color variable, ya que la discontinuidad se nota a medida que la temperatura de color varía hasta 5000 K. La solución de ingeniería típica es utilizar el lugar geométrico del cuerpo negro para todas las temperaturas de color. Pero esto no resuelve el problema con CRI: una fuente de 4999 K con un CRI de 100 recibirá un CRI más bajo simplemente aumentando su CCT a 5000 K.

Tabla 2.2: Limitaciones del Índice CRI

El CRI no caracteriza razonablemente bien espectros de banda estrecha altamente estructurados, como los de los LED que dependen de la mezcla aditiva de componentes rojo, verde y azul con emisiones espectrales estrechas. Las maquetas siguen siendo el método recomendado para evaluar las propiedades de reproducción cromática de la lámpara, particularmente en aplicaciones de color crítico.

2.3.3. Recomendaciones sobre el uso de medidas para la reproducción cromática

A pesar de las alternativas, CRI es la herramienta numérica más utilizada dentro de la comunidad de iluminación para la evaluación de la reproducción cromática. Se desarrolló como una métrica de “naturalidad” o “fidelidad” en comparación con el renderizado bajo luz incandescente o diurna. Se debe utilizar CRI, pero con la salvedad de que solo proporciona información general sobre el potencial de reproducción cromática. Ningún número puede encapsular completamente el problema multidimensional de la reproducción del color [15].

2.4. El color según la IES, TM-30-15

La norma americana TM-30, es un nuevo sistema de múltiples medidas y gráficos relacionados que pueden ser usados para evaluar y comunicar las propiedades de reproducción cromática de una fuente de luz. Si bien el índice CRI ha demostrado su utilidad en sus 50 años de uso continuo, sus limitaciones se vuelven cada vez más claras con el desarrollo de las fuentes LED. El objeto de esta norma, no es más sólo buscar maximizar la similitud a otra fuente de referencia (luz natural), sino la de cumplir un avanzado esquema de caracterización.

A continuación se puede en la tabla 2.3, una comparación entre las dos normas que se describirá velozmente.

Table 1. Comparison of the CIE Test-Colour Method (commonly known as CRI) and IES TM-30-15.

	CIE 13.3-1995 (CRI)	IES TM-30-15
Year of Issuance	1965, 1974 (Revision), 1995	2015
Color Space	CIE 1964 U*V*W*	CAM02-UCS (CIECAM02)
Number of Color Samples	8 general (for R_a) plus 6 special (for R_f s)	99
Color Volume Coverage	Limited	Full and equal
Saturated Samples	No	Yes
Sample Types	Munsell samples only (limited pigments)	Variety of real objects
Sample Spectral Uniformity	No	Yes
Reference Illuminants	Blackbody radiation, CIE D series	Blackbody radiation, CIE D series
Reference Transition	Sharp at 5000 K	Blended between 4500 K and 5500 K
Output Measures	General index, R_a (fidelity) 6 special indices, R_f (fidelity)	Fidelity index, R_f Gamut Index, R_g Color Vector/Saturation Graphics 16 hue-based fidelity indices 16 hue-based chroma indices 1 skin-specific fidelity index 99 individual fidelity values
Score Ranges	Max 100 with no lower limit, variable scaling	0 to 100, consistent scaling

Tabla 2.3: Tabla comparativa entre las normas CIE y IES

Primero, que las dos normas trabajan sobre definiciones del color diferentes, la norma IES trabaja sobre un nuevo espacio del color de 6 dimensiones más uniforme definido en 2002, mientras que la CIE toma el espacio de color ya visto en el capítulo ???. Por otro lado uno de los puntos más importantes, es que la norma CIE toma solo 8 colores como referencia para definir su índice, mientras que la norma IES toma 99 colores como referencia para definir su valor de R_f , además estos colores representan todo el espacio del color y de forma uniforme. Finalmente, la norma CIE brinda como resultado solamente un índice general R_a que nos dice que tan similar a la luz natural es esa fuente en un rango del 1 al 100 y otros seis índices especiales R_f , mientras que la norma IES nos brinda un abanico de resultados que se detallan en la tabla siguiente.

Antes de seguir adelante, se debe aclarar que es la gama del color. La gama del color de una fuente luminosa, es la proporción del espacio de color que se puede representar con ese dispositivo. Por ejemplo en la figura 2.16, se puede observar la gama de color de una fuente RGB típica.

El primer valor que tenemos en la tabla es el índice de fidelidad, que es similar al valor R_a de la norma CIE, también con un valor entre 0 y 100, pero evaluando la respuesta de 99 colores. Luego tenemos el índice de gama R_g , que compara la capacidad promedio de reproducir diferentes colores, valores por encima de 100 indican un aumento en la saturación de los colores mientras que valores por debajo del 100 indican una disminución en la saturación de los colores reproducidos.

Table 2. Description and use of the measures described in IES TM-30-15.

Measure	Abbreviation	Description
Fidelity Index	R_f	Analogous to CIE R_a (CRI). Characterizes the average color shift of the 99 CES to characterize the overall level of similarity between the test source and reference illuminant. Values range from 0 to 100.
Gamut Index	R_g	Compares the area enclosed by the average chromaticity coordinates in each of 16 hue bins to characterize the average saturation level of the test source compared to the reference illuminant. A neutral score is 100, with values greater than 100 indicating an increase in saturation and values less than 100 indicating a decrease in saturation. The range in values grows as fidelity decreases.
Color Vector Graphic		Provides a visual representation of hue and saturation changes based on the average rendering in each hue bin, relative to the reference. The graphic provides a quick understanding of how different hues are rendered in different ways.
Color Saturation Graphic		Provides a simplified visual representation of only saturation changes based on the average performance in each hue bin.
Hue Fidelity Indices	$R_{f,hj}$ ($j = 1$ to 16)	Provides a numerical characterization of color fidelity in each of 16 hue bins (j), which can be used to evaluate how similarly the test source renders reds, yellows, greens, blues, or in-between hues compared to the reference. Values range from 0 to 100. Specific values may be used to supplement average values if one hue type is of particular concern. Specifying limits for all values is also possible. These scores are analogous to the special indices of the CRI system (e.g., R_g), but are more robust because they combine several samples with different spectral features.
Chroma Change by Hue Indices	$R_{g,hj}$ ($j = 1$ to 16)	Provides numerical values for relative chroma change in each of 16 hue bins (j), which can be used to evaluate saturation (positive values) or desaturation (negative values) of reds, yellows, greens, blues, and in-between hues compared to the reference. Supplementary criteria could be set for all values, or just specific values, such as red (bin 1).
Skin Fidelity Index	$R_{f,skin}$	Characterizes the similarity of skin tones (CES15 and CES18) as rendered by the test source compared to the reference source. Values range from 0 to 100. $R_{f,skin}$ can be used to supplement other values when skin is an important consideration.
Sample Fidelity Indices	$R_{f,CESi}$ ($i = 1$ to 99)	Characterizes the similarity of each CES (i) as rendered by the test source compared to the reference source. Values range from 0 to 100. Individual values may have little predictive power for other objects, but examining the scores in a combined chart can indicate the source's object-to-object consistency.

Tabla 2.4: Tabla descriptiva de los resultados del test TM-30

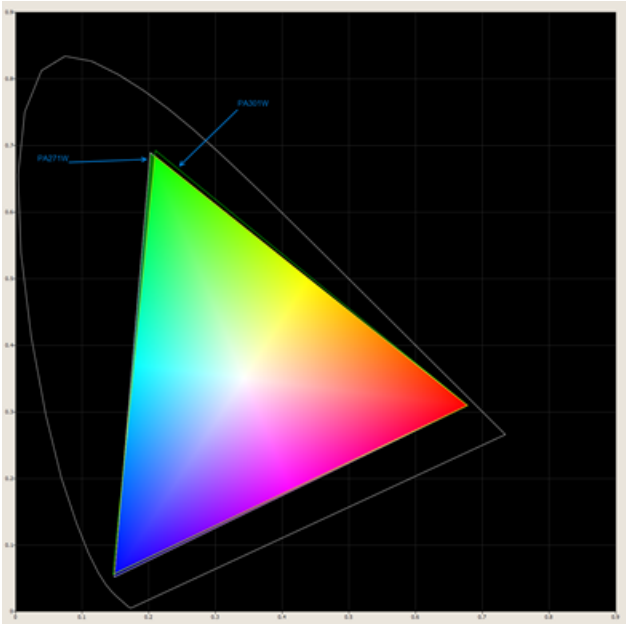


Figura 2.16: Gama de color de una fuente RGB típica

Bibliografía

- [1] The IESNA Lighting Handbook, 9^o edición (2000) ISBN 0-87995-150-8
- [2] CIE 38. 1977. Radiometric and photometric characteristics of materials and their measurement. Vienna, Austria: Commission Internationale de l'Éclairage.
- [3] Wright WD. 1928-1929. A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours. *Trans. Opt. Soc. London.* 30:141-164.
- [4] Guild J. 1931. The colorimetric properties of the spectrum. *Philos. Trans. Roy. Soc. London, Series A.* 230:149-187.
- [5] Hu X, Houser KW. 2006. Large-field color matching functions. *Color Res. Appl.* 31(1):18-29.
- [6] Schanda J. editor. 2007. *Colorimetry: understanding the CIE system.* Hoboken, NJ: Wiley Interscience. 459 p.
- [7] ASTM E308-08. 2008. Standard practice for computing the colors of objects by using the CIE system. West Conshohocken, PA: ASTM International. 34 p.
- [8] MacAdam DL. 1942. Visual sensitivities to color differences in daylight. *J. Opt. Soc. Am.* 32(5):246-274.
- [9] ANSI. 2001. ANSI C78.376-2001. American National Standard for electric lamp –specifications for the chromaticity of fluorescent lamps. Rosslyn, VA: National Electrical Manufacturers Association.
- [10] MacAdam DL. 1937. Projective transformations of ICI color specifications. *J. Opt. Soc. Am.* 27(8):294-299.
- [11] CIE 15:2004. *Colorimetry*, 3rd edition. Vienna, Austria: Commission Internationale de l'Éclairage. 79 p.
- [12] CIE 142:2001. 2001. Improvement to industrial colour-difference evaluation. Vienna, Austria: Commission Internationale de l'Éclairage. 15 p.
- [13] CIE 13.3. 1995. Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources. Vienna, Austria: Commission Internationale de l'Éclairage. 20 p.
- [14] CIE 177. 2007. Colour rendering of white LED light sources. Vienna, Austria: Commission Internationale de l'Éclairage. 14 p.
- [15] Guo X, Houser KW. 2004. A review of colour rendering indices and their application to commercial light sources. *Lighting Res. Technol.* 36(3): 183-199.
- [16] Thornton WA. 1972. Color-discrimination index. *J. Opt. Soc. Am.* 62(2):191-94.
- [17] Thornton WA. 1974. A validation of the color preference index. *J. Illum. Eng. Soc.* 4:48-52.
- [18] Duffy JF, Czeisler CA. Effect of Light on Human Circadian Physiology. 2009. *Sleep Medicine Clinics*, Volume 4, Issue 2, pp. 165-77.
- [19] Ko CH, Takahashi JS. Molecular Components of the Mammalian Circadian Clock. 2006. *Human Molecular Genetics*, Volume 18, Issue 2, pp. R271-R277.
- [20] Lucas RJ, Peirson SN, Berson DM, Brown TM, Cooper HM, et al. Measuring and Using Light in the Melanopsin Age. 2014. *Trends in Neuroscience*, Volume 31, Issue 1, pp. 1-9.
- [21] Mistlberger RE, Skene DJ. Nonphotic Entrainment in Humans? 2005. *Journal of Biological Rhythms*, Volume 20, pp. 339-52.
- [22] Wolf, E., and J. S. Gardiner. 1965. Studies on the scatter of light in the dioptric media of the eye as a basis of visual glare. *Arch. Ophthalmol.* 74(3):338-345.