

2. Estudio del color

1. El Color

1.1. Introducción

El color no es una propiedad intrínseca de los objetos. La materia es totalmente incorpórea y lo que hace que un objeto sea percibido con un determinado color, responde a diversos factores. En primer lugar, a las propiedades de la luz incidente en el objeto, es decir, a las características de la radiación visible necesaria para iniciar todo el proceso de la visión humana (ya sea cromática o no). En segundo lugar, a las propiedades químicas de la materia de la que están formados los cuerpos, algo que afectará sensiblemente a la interacción de la luz con estos últimos, y por último al sistema visual humano que será el que determine la sensación cromática final percibida por nuestro cerebro, según las ondas de luz transmitidas o reflejadas por el objeto que ha penetrado en el ojo humano (figura 2.1). Por este último factor, una determinada muestra de color no es percibida exactamente igual por dos observadores; consecuentemente, la obtención de un valor objetivo de la especificación del color, válido para una posible normalización de colores, debe basarse en un gran número de observadores cuidadosamente seleccionados.

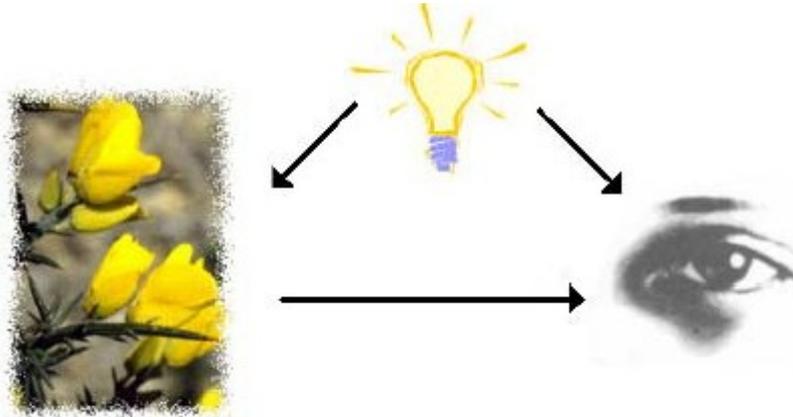


Figura 2.1: Factores que intervienen en la percepción del color: las fuentes de luz, los objetos, y el sistema visual humano.

El primer punto a desarrollar en el estudio del color, es la definición de la naturaleza de la luz. Sin la presencia de este fenómeno físico, no solo es prácticamente imposible percibir la sensación cromática, sino también los propios cuerpos u objetos que nos rodean.

2. La Luz

2.1. La luz como onda electromagnética

La luz es una pequeña zona del espectro de radiación electromagnética, comprendida entre la franja de infrarrojos y la de ultravioletas. La luz se distingue de otras ondas electromagnéticas por el hecho de ser sensible al ojo humano. El ojo humano sólo es capaz de distinguir radiaciones entre 400 y 700 nm; a este rango de longitudes de ondas se le conoce como *Espectro Visible*. Por debajo de los 400 nm entramos en la franja de las radiaciones ultravioletas, y por encima de los 700 nm, en la región del infrarrojo. A pesar de ser el *Espectro Visible* una zona muy pequeña, es muy importante, ya que todo lo que se ve es gracias a la luz.

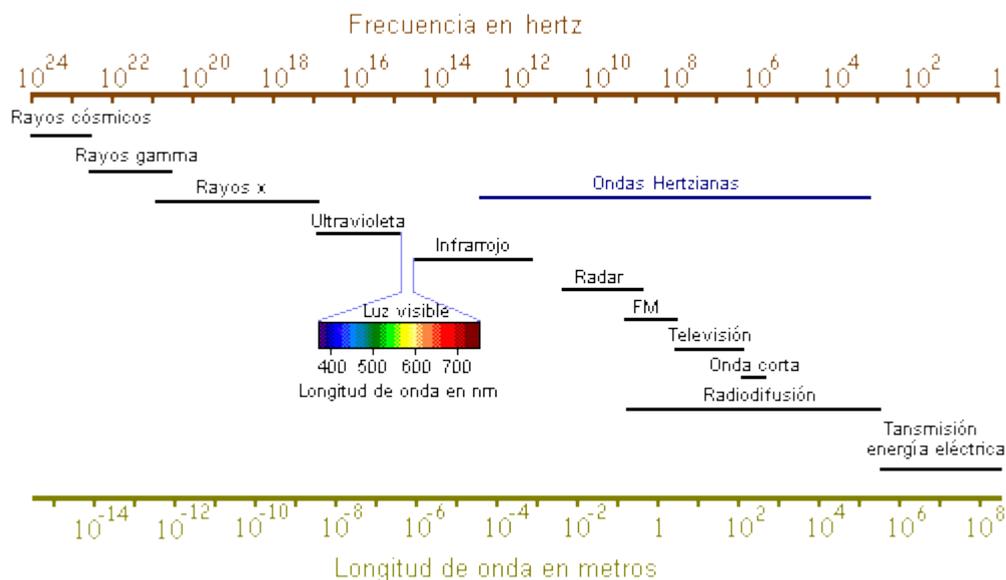


Figura 2.2: Espectro de radiación electromagnética

Una mezcla proporcionada de todas las longitudes de onda entre 400 y 700 nm, constituye la luz blanca.

La luz es una onda electromagnética, y como tal, transporta energía. Las radiaciones electromagnéticas se propagan en forma de ondas vectoriales mutuamente acopladas y perpendiculares entre sí; una onda para el campo eléctrico E y otra para el campo magnético B , tal y como puede observarse en la figura 2.3. Según la teoría ondulatoria, la luz se propaga en forma de ondas que viajan en el espacio libre con una velocidad constante $c=3 \times 10^8$ m/s. Para esta teoría, se considera fuente de luz a toda radiación electromagnética

cuya longitud de onda esté comprendida entre los 380nm y los 780nm, o cuya frecuencia oscila entre los 3.2×10^{14} y 7.7×10^{14} Hz.

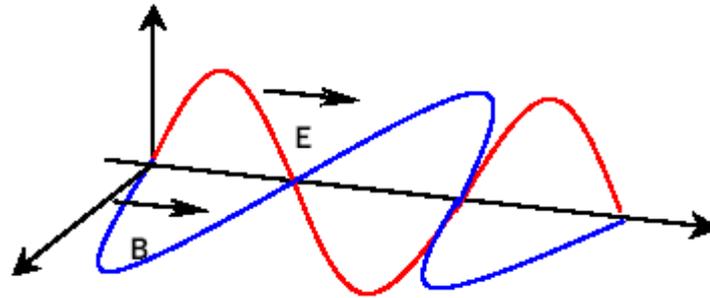


Figura 2.3: Radiación electromagnética

Fue Isaac Newton el que comprobó, cómo la luz blanca se podía descomponer en una serie de haces luminosos de colores diferentes cuando atravesaba un prisma óptico. Newton, con este experimento halló el espectro de la luz diurna mediante el fenómeno conocido como dispersión de la luz o dispersión cromática, cuya explicación física escapaba a su teoría corpuscular. Mediante la teoría ondulatoria, se sabe que cada color es una onda electromagnética de frecuencia o longitud de onda determinada, y que al parecer, al penetrar en el prisma óptico, se desvía en una dirección diferente debido a que el índice de refracción de este material, varía con la frecuencia de la onda penetrante, con lo que el haz diurno (luz blanca) se expande de tal forma que las radiaciones monocromáticas que éste incluye, pueden ser distinguidas y observadas por el ojo humano [2].



Figura 2.4: Dispersión cromática de la luz

2.2. Propiedades ópticas de la luz

Cuando la luz incide sobre un cuerpo, su comportamiento varía según sea la superficie, constitución de dicho cuerpo, y la inclinación de los rayos incidentes, dando lugar a los siguientes fenómenos físicos [3]:

- ◆ **Absorción:** Al incidir un rayo de luz visible sobre una superficie negra, mate y opaca, es absorbido prácticamente en su totalidad, transformándose en calor.

- ◆ **Reflexión:** Cuando la luz incide sobre una superficie lisa y brillante, se refleja totalmente en un ángulo igual al de incidencia. Si la superficie no es del todo lisa, y brillante, refleja sólo parte de la luz que le llega y además lo hace en todas las direcciones. A este fenómeno se le conoce con el nombre de *reflexión difusa*, y es la base de la Teoría del Color, según la cuál, al incidir sobre un objeto un haz de ondas de distinta longitud, absorbe unas y refleja otras, siendo estas últimas las que en conjunto determinan el color del objeto.

- ◆ **Transmisión:** Es el fenómeno por el cual la luz puede atravesar objetos no opacos. La transmisión es directa cuando el haz de luz se desplaza en el nuevo medio íntegramente y de forma lineal. A estos medios se les conoce como transparentes. La transmisión es difusa, si en el interior del cuerpo el rayo se dispersa en varias direcciones. A estos materiales se les denomina translucientes. Existe un tercer tipo de transmisión, la selectiva, que ocurre cuando los materiales, dejan pasar sólo ciertas longitudes de onda y absorben otras.

- ◆ **Refracción:** Es un fenómeno que ocurre dentro de la transmisión. Se produce cuando los rayos luminosos que inciden oblicuamente sobre un medio transparente, o pasan de un medio a otro de distinta densidad, experimentan un cambio de dirección que es en función del ángulo de incidencia (a mayor ángulo mayor refracción), de la longitud de onda incidente (a menor longitud de onda mayor refracción), y del índice de refracción de un medio respecto al otro.

- ◆ **Dispersión:** Como se acaba de ver, uno de los factores que afecta a la refracción, es la longitud de onda de la luz incidente. Como la luz blanca es un conjunto de diversas longitudes de onda, si un rayo cambia oblicuamente de medio, cada una de las radiaciones se refractará de forma desigual, produciéndose un separación de las mismas, desviándose menos las de onda larga como el rojo y más las cercanas al violeta.
- ◆ **Difracción:** Es la desviación de los rayos luminosos cuando inciden sobre el borde de un objeto opaco.

2.3. Fuentes de Luz

La luz diurna ha sido y seguirá siendo durante mucho tiempo una luz de referencia, utilizada como elemento de comparación y evaluación subjetiva para cualquier otra fuente luminosa diferente. Sin embargo, las condiciones ambientales y horarias (entre otras), hacen que esta fuente luminosa varíe su composición inaceptablemente para que pueda ser empleada como fuente en Colorimetría. Es necesario pues, definir una radiación que represente a una luz diurna normalizada, una distribución espectral constante para la medida del color, para ello la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) propuso el uso de iluminantes o blancos de referencia.

Un iluminante es una fuente de luz normalizada e imaginaria: una tabla estandarizada de valores que representan a emisores de luz típico (luz teórica que será o no realizable físicamente) [2]. Los iluminantes representan a blancos que parecen más anaranjados o azulados en función de lo que se conoce como temperatura de color: propiedad de color de una fuente de luz. La temperatura de color es la temperatura (en grados Kelvin) a la que hay que calentar un radiador de energía o fuente de radiaciones denominado cuerpo negro, para que emita radiaciones de determinadas longitudes de onda.

Así, a temperaturas bajas, este patrón radiará energía que se hace visible con longitudes de onda largas (rojos anaranjados), mientras que a altas temperaturas llegará a emitir radiaciones de frecuencias elevadas (azules), tal y como puede observarse en la figura 2.5.



Figura 2.5: Temperatura de color según el calentamiento del 'cuerpo negro'.

Según la temperatura del color, los blancos de referencias estandarizados y recomendados por la CIE son los siguientes:

- ◆ **Illuminante A:** Corresponde a la luz emitida por una lámpara de filamento de wolframio. Equivale a la luz emitida por el cuerpo negro a una temperatura de 2.856°K.
- ◆ **Illuminante B:** Corresponde a la luz solar de medio día. Su temperatura de color es de 4.874°K.
- ◆ **Illuminante C:** Luz del día en el hemisferio norte sin Sol directo (sin radiación ultravioleta). La temperatura para este iluminante es de 6.774°K.
- ◆ **Illuminante D:** Mezcla de luz solar y cielo nublado (con presencia ultravioleta). Temperatura de color de 6.500°K. Es el adoptado actualmente como blanco de referencia para la televisión en color.
- ◆ **Illuminante E:** Es el blanco equienergético y representa al blanco que se obtiene al estar presentes todas las longitudes de onda del espectro visible con igual energía. Su temperatura de color es de 5.555°K.

2.4. Características del color

El color de un cuerpo depende principalmente de la naturaleza de la superficie, y del tipo de luz que lo ilumina. Un objeto sólo se ve con su propio color si se ilumina con luz blanca o con luz de su mismo color. El color que emite la superficie de las sustancias coloreadas se llama color superficial. Parte de la radiación se refleja y parte es absorbida por el cuerpo.

La percepción humana de la luz está generalmente descrita en términos de brillo, tono y saturación (referido en la literatura inglesa como *brightness*, *hue* y *saturation*). El brillo da a entender la cantidad de energía que presenta la luz, es decir, cuantifica la luminosidad de una fuente de luz, lo brillante que es. El tono se refiere al color de dicha luz (rojo, verde, etc.), y la saturación a lo vivo o apagado que es un color.

Otros conceptos importantes son intensidad, luminancia y luminosidad. Se puede encontrar la definición de todos estos conceptos según[2]:

- ◆ **Matiz o tonalidad (*H*):** Se refiere al nombre del color y al tipo de longitud de onda de la radiación. Como no es una radiación concreta (un color es un conjunto de radiaciones próximas) no es un valor cuantitativo. Representa el color dominante tal y como es percibido por un observador; cuando se dice que un objeto es rojo, amarillo o naranja, se está especificando el tono.

- ◆ **Brillo (*Br*):** Es la intensidad subjetiva con la que se ve el color (captación de la intensidad luminosa reflejada) y depende del ángulo con que se mire la superficie. La luz blanca no tiene matiz (no tiene color), pero tiene brillo. El brillo es muy complejo y difícil de representar, por lo que la “Comisión Internationale de L’éclairage” (CIE) hizo otras definiciones, como la luminancia (*Y*).

- ◆ **Saturación (*S*):** Es la pureza del color. Dentro de un mismo color rojo se puede distinguir entre un rojo pálido o un rojo fuerte según su distinta saturación. Cuanto más blanco contiene menos saturado está el color: el rosa pálido está poco saturado.

- ◆ **Luminosidad (L^*):** Respuesta perceptiva no lineal a la luminancia que tiene la visión humana. La no linealidad es prácticamente logarítmica. Es el atributo por el cual, un campo parece tener más o menos cantidad de luz.
- ◆ **Intensidad (I):** Flujo de potencia radiado desde una superficie o incidente en ella (W/m^2).
- ◆ **Luminancia (L):** Potencia radiada ponderada por la función de sensibilidad espectral característica de la visión humana.



Figura 2.6: Variaciones de brillo, saturación y tono de cada uno de los colores primarios

No obstante estas magnitudes son parámetros perceptivos, es decir, dependen de factores que van más allá de la propia naturaleza de la luz, como por ejemplo la forma del espectro $c(\lambda)$.

Sin embargo, estos tres parámetros perceptivos pueden relacionarse con características específicas de $c(\lambda)$ de la siguiente forma.

● **Brillo \Leftrightarrow Medidas Fotométricas**

Las medidas fotométricas buscan describir cuantitativamente la percepción del brillo perteneciente a una energía electromagnética visible. La conexión entre las medidas fotométricas y las radiométricas es la *Función de Luminosidad Fotópica*. La mayor parte de los diseños de sistemas de imágenes se basan en esta función, también denominada *Función de eficiencia luminosa relativa*. Un flujo

radiante $c(\lambda)$ puede ser percibido con distinto brillo según la longitud de onda que se considere. Por esta razón, una simple integral de $c(x,y,t, \lambda)$ sobre la variable λ no representa bien la percepción del brillo. La sensación de brillo percibido de una fuente luminosa con una distribución espectral de energía $c(\lambda)$ se denomina flujo luminoso y se define como:

$$F = K_m \int_0^{\infty} c(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

donde $V(\lambda)$ representa la *Función de Eficiencia Luminosa Relativa* y K_m es una constante de escala. La unidad del flujo luminoso es el lumen (lm) y el valor de la constante K_m es de 685lm/W.

● Tono \Leftrightarrow Longitud de onda dominante

El tono se define como un atributo de color que nos permite distinguir un color de otro. En algunos casos, el matiz de un color puede relacionarse con características simples de $c(\lambda)$. Una luz que tiene, mas o menos constante $c(\lambda)$ en el rango de valores visibles, aparece blanca o sin color. En condiciones normales de visión, una luz monocromática aparece coloreada y su color depende de la longitud de onda. Por tanto, el tono puede relacionarse con la longitud de onda dominante de la luz que se está visualizando.

● Saturación \Leftrightarrow Ancho de Banda

La saturación se refiere a la pureza o viveza del color y puede relacionarse con el ancho de banda de la luz que se está visualizando. Una luz monocromática es una luz muy viva. Esto es así porque estas luces poseen componentes espectrales muy puras y están muy saturadas. A medida que el espectro de $c(\lambda)$ se va ensanchando el color se percibe menos vivo ya que está menos saturado.

Se interpretarán los colores basándose en su luminosidad, tono y saturación. Además, se tiene la posibilidad de agrupar tono y saturación en otra magnitud, combinación de ambas, llamada crominancia o *cromacidad*. La percepción de un color queda, por lo tanto, determinada por luminancia y cromacidad.

3. Sistema Visual Humano

En ciertas aplicaciones de procesamiento digital de imágenes, como en la compresión digital, es necesario entender el sistema visual humano. El comprender las características y las limitaciones del sistema ojo-cerebro, puede ayudar a maximizar la efectividad de las operaciones de la compresión digital de imágenes.

3.1. Estructura física del ojo

El sistema visual humano está compuesto por el ojo y una porción del cerebro que procesa las señales neurológicas que provienen de éste. Juntos, el ojo y el cerebro convierten la información óptica en una percepción de una escena visual. El ojo es la cámara del sistema visual humano. Éste, convierte la información visual en impulsos nerviosos usados por el cerebro.

El ojo en su conjunto, llamado globo ocular, es una estructura casi esférica de aproximadamente 22mm de diámetro. Está rodeado por varias membranas: la córnea y la esclerótica, que constituyen la cubierta exterior, la coroides, y la retina. La figura 2.7 muestra una sección del ojo derecho humano.

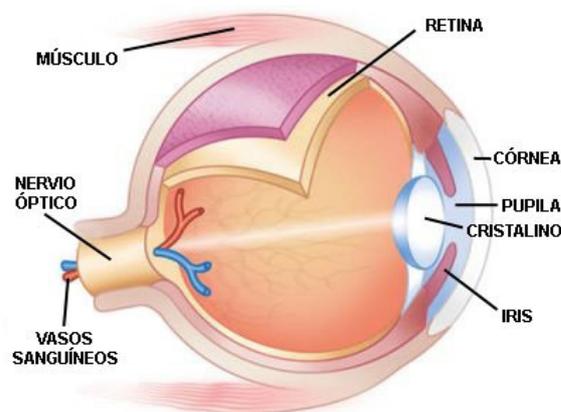


Figura 2.7: El ojo humano.

Los rayos de luz generados o reflejados por un objeto, primero golpean el ojo en la córnea. La córnea actúa como un lente convexo, refractando los rayos. Esta refracción forma el enfoque inicial de la luz que entra al ojo. Después de la córnea, los rayos pasan a través del iris y el cristalino. El iris actúa como una apertura variable que controla la cantidad de luz que puede pasar a través del cristalino. El iris es controlado por músculos

que lo abren y lo cierran basados en la intensidad promedio del objeto que es observado. En la noche el iris se abre ampliamente, mientras que en un día luminoso se cierra bastante.

El cristalino lleva a cabo el segundo enfoque de la luz, proyectando a ésta en la retina. El cristalino es controlado por músculos, los cuáles permiten variar la distancia focal del sistema óptico total dependiendo de la distancia del objeto observado. Los rayos de luz salen del cristalino y finalmente son enfocados en la retina.

En la retina hay dos tipos de células receptoras, los *conos* y los *bastones*, llamados así debido a su forma (figura 2.8).

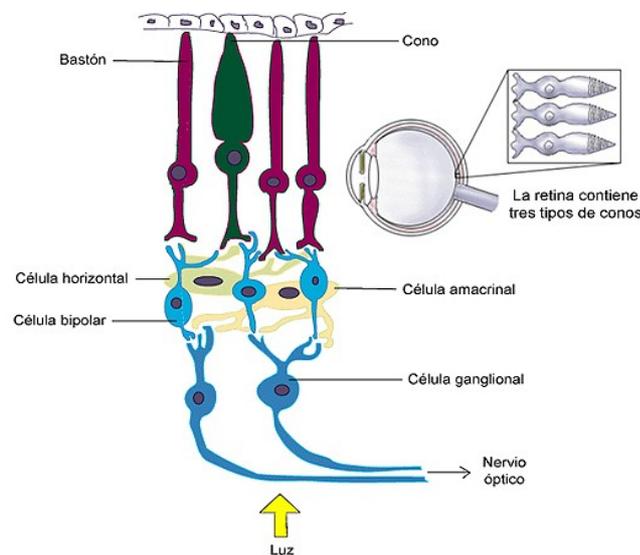


Figura 2.8: La retina y sus células receptoras: bastones y conos.

Los *conos* se concentran en una región cerca del centro de la retina llamada *fóvea*. Su distribución sigue un ángulo de alrededor de 2° contados desde la *fóvea*. La cantidad de conos es de 6 millones y algunos de ellos tienen una terminación nerviosa que va al cerebro. Los conos son los responsables de la visión del color y se cree que hay tres tipos de conos, sensibles al color rojo, verde y azul, respectivamente.

Los conos, dada su forma de conexión a las terminaciones nerviosas que se dirigen al cerebro, son los responsables de la definición espacial. También son poco sensibles a la intensidad de la luz y proporcionan *visión fotópica*.

Los *bastones* se concentran en zonas alejadas de la *fóvea* y son los responsables de la *visión escotópica* (visión a bajos niveles). Los bastones comparten las terminaciones

nerviosas que se dirigen al cerebro, siendo por tanto su aportación a la definición espacial poco importante. La cantidad de bastones se sitúa alrededor de 100 millones y no son sensibles al color. Los bastones son mucho más sensibles que los conos a la intensidad luminosa y son los responsables de la visión nocturna.

Las diferencias entre bastones, conos, y sus distribuciones a través de la retina, son responsables de diversos aspectos de la visión. Debido a que los conos que sensan el color están concentrados en la fovea, la percepción del color es mejor para los objetos que se ven directamente al frente. Recíprocamente, se tiene una mínima percepción del color para objetos en la visión periférica. Del mismo modo, como los bastones altamente sensitivos son abundantes por todas partes menos en la fovea, la percepción de luz de bajo nivel es mejor en la visión periférica. Así, durante la noche, los objetos confusos se pueden ver por la parte periférica de la retina cuando son invisibles para la fovea.

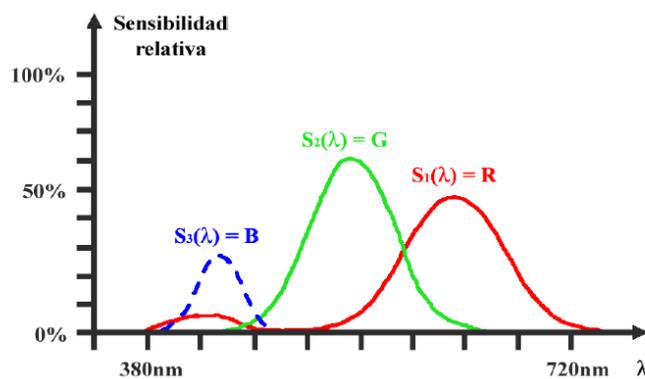


Figura 2.9: Sensibilidades de los tres tipos de conos en la retina

3.2. Respuesta a la iluminación y discriminación.

Debido a que las imágenes digitales se presentan como un conjunto de puntos brillantes, la capacidad del ojo de discriminar entre diferentes niveles de iluminación es una consideración importante para presentar los resultados del procesamiento de la imagen.

La relación entre la intensidad de la luz que entra al ojo y su brillo percibido no es una función lineal. Ésto significa que a medida que la intensidad de una fuente luminosa cambia, el observador no percibirá un cambio igual en el brillo.

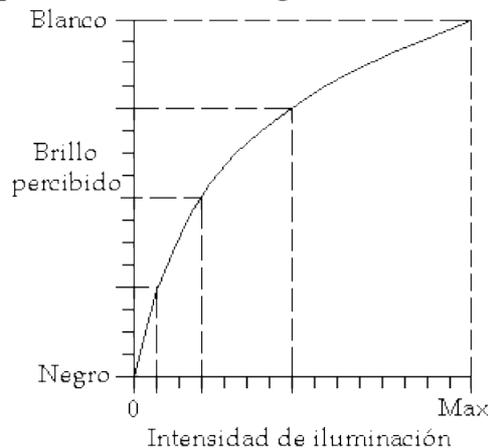


Figura 2.10: Respuesta logarítmica del ojo. Ley de Weber

La respuesta de la intensidad real del ojo es más logarítmica, similar a la curva de la figura 2.10. A esta relación que hay entre la intensidad de la iluminación y el brillo percibido, se le conoce como Ley de Weber.

3.3. Vision de color

La percepción del color sólo es posible si al ojo le llega cierta cantidad de energía electromagnética. Esta energía proviene de la luz reflejada por un objeto; el resto del espectro es absorbido. Por consiguiente, un objeto parece coloreado a causa de que sólo refleja parte del espectro visible y absorbe el resto. El color procede de la luz incidente. Sin embargo, el ojo no es uniformemente sensible a todo el espectro visible. La figura 2.11 muestra la respuesta relativa del “ojo medio” a la luz de luminancia constante proyectada en las varias longitudes de onda comprendidas en el espectro.

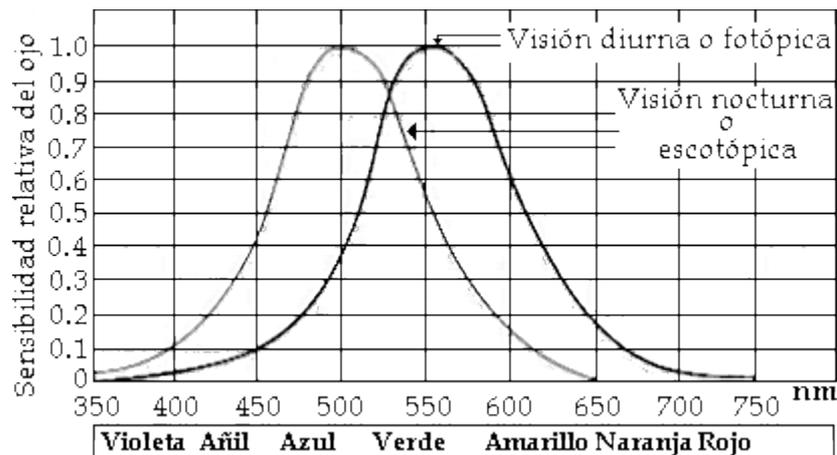


Figura 2.11: Sensibilidad relativa del ojo humano a diferentes longitudes de onda

Nótese que el pico máximo de la curva está en la región verde-amarillo y es interesante observar que una curva que represente la distribución de energía de luz solar o natural tiene su máximo en este área. La curva de línea gruesa representa la impresión subjetiva de brillo del observador medidos en condiciones de luz natural. Como muestra la segunda curva, en condiciones cercanas a la oscuridad, la curva de respuesta se desplaza hacia la izquierda.

4. Sistemas de Representación del Color

Los espacios de color proporcionan un método racional para especificar, ordenar, manipular y representar los objetos de color. Dependiendo de la aplicación, así será más adecuado el uso de un espacio de color u otro. El proceso de selección del mejor modelo para una aplicación dada, implica el conocimiento de cómo son generadas las señales de color y qué información se necesita de estas señales. Aunque los espacios de color imponen restricciones en la percepción y la representación del color, también ayudan a llevar a cabo importantes tareas. En particular, los modelos de color pueden ser usados para definir, discriminar o juzgar similitudes entre colores.

Un modelo de color no se puede utilizar para especificar todos los colores perceptibles en la porción visible del espectro electromagnético, sino sólo los de la gama de colores particular del modelo.

A continuación se presentan los distintos espacios de color [2].

4.1. Espacio de color RGB

El modelo RGB es el modelo propuesto por el National Television System Committee (NTSC) para su uso en monitores de televisión. Cada color aparece representado con tres valores, los cuales representan las proporciones de luz monocromática roja, verde y azul necesarias para la obtención de dicho color. Estas fuentes primarias espectrales están definidas a partir de un sistema inicial propuesto por CIE.

El modelo se suele representar en un sistema de coordenadas cartesiano, denominado *cubo de color*, del que se utiliza el octante positivo para representar los colores. Por conveniencia se supone que todos los colores han sido normalizados de forma que el cubo es unitario, es decir se supone que todos los valores de rojo, verde y azul están en el rango $[0,1]$. El negro queda así centrado en el origen $(0,0,0)$, y cada color puro en cada uno de los semiejes, quedando el rojo en el $(1,0,0)$, el verde en el $(0,1,0)$ y el azul en el $(0,0,1)$. En el $(1,1,1)$ queda representado el blanco. Por lo tanto, si seguimos la diagonal que va del origen de coordenadas al vértice opuesto $(1,1,1)$ vamos obteniendo la escala de grises desde el negro al blanco (Figura 2.12).

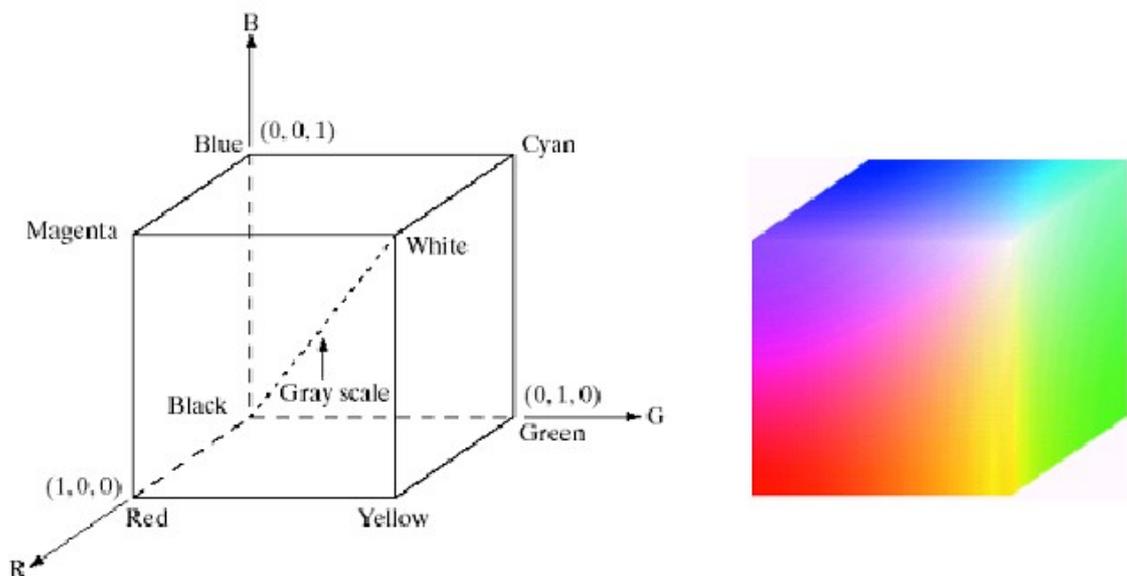


Figura 2.12: Modelo RGB: Cubo de Color.

Las imágenes del modelo RGB consisten en tres planos, un plano de imagen independiente por componente. Por lo tanto, para cada *píxel*, cada componente de color compone la medida exacta para excitar, por ejemplo, las celdas de un monitor de TV.

Igualmente, las cámaras de color captan el color también separando los planos del rojo, verde y azul. Así, el empleo del modelo RGB para el procesamiento de imágenes tiene sentido cuando las propias imágenes están expresadas de forma natural en términos de estos tres planos de color.

El espacio de color RGB es la elección más corriente para gráficos por ordenador ya que los monitores usan fósforo rojo, verde y azul para crear el color deseado. Sin embargo, este espacio no es la forma más eficiente de describir las tres componentes de color, ya que la sensibilidad de la componente de color del ojo humano es menor que la de la luminancia.

A continuación se muestran los diferentes tipos de RGB primarios.

4.1.1. RGB C.I.E.

En 1931 la C.I.E., elaboró un sistema de referencia primario. Las unidades de los Coeficientes Triestímulo de este sistema son tales que los tres coeficientes, R(Rojo), G (Verde) y B (Azul) se igualan cuando se adapta un blanco con distribución espectral de energía uniforme en todo el espectro visible.

A continuación se muestran las bases de este sistema de coordenadas, así como el comportamiento espectral de cada uno de los colores básicos.

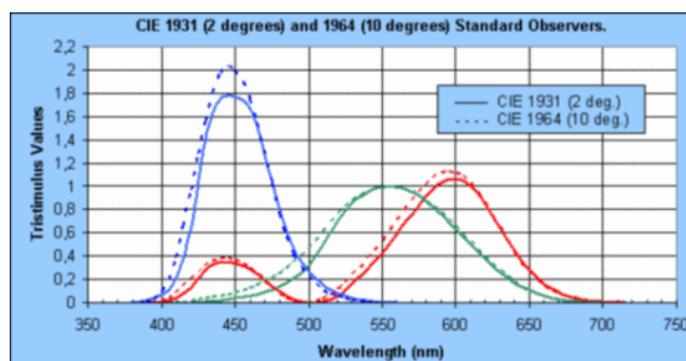


Figura 2.13: Coeficientes triestímulo B_{CIE} , R_{CIE} y G_{CIE}

4.1.2. RGB N.T.S.C.

Definido por la NTSC (*National Television Standard Committee*) y empleado por la televisión americana. Ambos sistemas se relacionan mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.167 & -0.146 & -0.151 \\ 0.114 & 0.753 & 0.159 \\ -0.001 & -0.059 & 1.128 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{NTCS} \\ G_{NTCS} \\ B_{NTCS} \end{bmatrix}$$

4.2. Espacio de color cromático XYZ

El espacio XYZ fue introducido por la CIE para evitar los inconvenientes de los coeficientes triestímulos espectrales R, G y B. Estos valores son siempre positivos y finitos. Sin embargo, algunos colores sólo pueden reproducirse con cantidades negativas de los coeficientes triestímulo.

El espacio XYZ es un sistema de coordenadas artificial en el que todos los valores de los coeficientes triestímulos necesarios para realizar la adaptación de un color son positivos.

Este sistema se ha elegido de tal forma que el valor del coeficiente Y sea igual a la luminancia del color que se quiere adaptar.

Las coordenadas de cromaticidad usadas para generar el diagrama de cromaticidad de la figura 2.14 son:

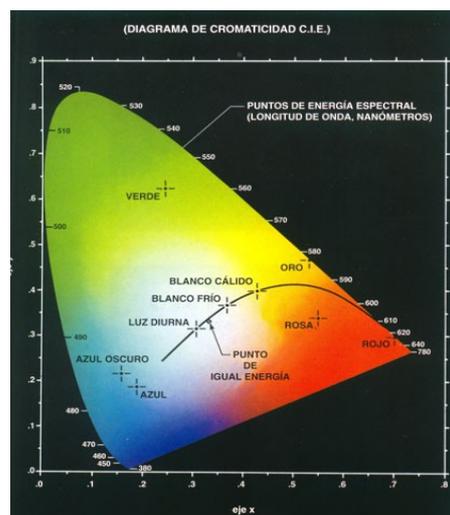


Figura 2.14: Diagrama de cromaticidad de CIE.

A partir de las componentes R,G,B podemos obtener X,Y,Z, mediante la siguiente transformación:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.490 & 0.310 & 0.200 \\ 0.177 & 0.813 & 0.011 \\ 0 & 0.010 & 0.990 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{CIE} \\ G_{CIE} \\ B_{CIE} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} R_{CIE} \\ G_{CIE} \\ B_{CIE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.167 & -0.146 & -0.151 \\ 0.114 & 0.753 & 0.159 \\ -0.001 & -0.059 & 1.128 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

En el diagrama de cromaticidad, si se une un color frontera con el blanco, y se prolonga la recta hasta la frontera opuesta, se obtiene su color complementario. Además es posible trazar pequeñas elipses que encierran colores indistinguibles para el ojo humano. Es por ésto, que el sistema dado por (x,y) no es eficiente para evaluar diferencias de color.

4.3. Espacio de color CMY

Este modelo se define a partir de los colores secundarios de la luz, cyan, magenta y amarillo, y es usado generalmente para describir la salida de color de los dispositivos de copia hardware.

Un ejemplo común es la impresora, que produce una imagen en color cubriendo un papel con pigmentos de color. Por lo tanto, en este modelo se obtienen los colores por luz reflejada, lo cuál es un proceso sustractivo.

Por ejemplo, cuando se refleja luz blanca sobre un objeto que es cyan (verde-azul) la luz reflejada no debe tener componente roja, es decir, la luz roja es absorbida por el objeto. De forma análoga, para obtener el magenta, se resta la componente verde de la luz incidente y el amarillo sustrae la componente azul.

En el modelo CMY, el punto (1,1,1) representa el negro, ya que todas las componentes de la luz blanca incidente se sustraen. El origen representa la luz blanca. Cantidades iguales de cada uno de los colores primarios producen grises a lo largo de la diagonal principal del cubo.

El modelo sustractivo puede expresarse en términos del espacio RGB como:

$$\begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

4.4. Espacio de color HSI

Las diferentes variantes de modelos de color RGB solucionan eficientemente el problema de la especificación de color de forma que sea compatible con el hardware disponible. Sin embargo, un usuario humano no puede especificar fácilmente un color en el modelo RGB, debido a su no uniformidad perceptual.

La ventaja del modelo de espacio de color HSI (*Hue–Saturation–Intensity*) es doble, por un lado conseguimos separar la componente de intensidad de la imagen de su información de color, y por otro lado conseguimos otras dos componentes que están muy relacionadas con la forma en la que el ojo humano percibe los colores.

El proceso matemático para obtener la representación HSI partiendo de especificaciones RGB se realiza a partir de un modelo intermedio denominado(I, V_1, V_2). Este modelo intermedio se obtiene a su vez a partir del RGB lineal mediante una rotación de ejes, de forma que el eje I queda orientado según la diagonal $R=G=B$, tal y como se expone a continuación:

$$\begin{bmatrix} I \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}/3 & \sqrt{3}/3 & \sqrt{3}/3 \\ 0 & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 2/\sqrt{6} & -1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Finalmente, para la obtención del sistema completa HSI, basta con una conversión de las coordenadas cartesianas V_1 y V_2 polares:

$$H = \tan^{-1}\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

$$S = \sqrt{V_1^2 + V_2^2}$$

Por tanto, se puede decir que matemáticamente, el modelo HSI es equivalente al giro y polarización de un sistema RGB original.

El espacio de color HSI está constituido como un sistema de coordenadas cilíndricas, donde el eje del sistema ofrece la variación de intensidad, desde el negro al blanco; la distancia al eje representa el valor de saturación, y el tono viene dado por la diferencia angular entre un tono de referencia (rojo en estándar, que me da lugar al tono de fase 0°) y el tono del color en consideración. En la figura 2.15(a) podemos observar la representación de este sistema, y algunos ejemplos de colores para ciertos ángulos de tono en la figura 2.15 (b).

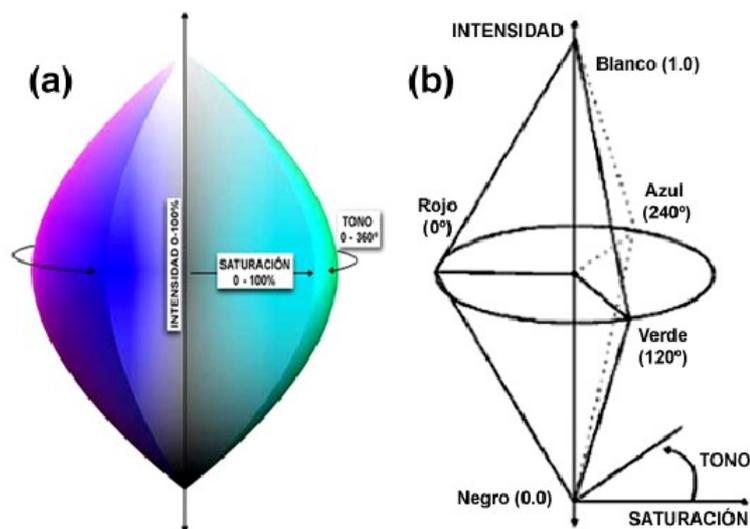


Figura 2.15: Modelo HSI (a) y Ejemplos de tonos (b)

4.5. Espacio de color YUV y YIQ

Los modelos de color YIQ YUV, son los empleados actualmente en la radiodifusión de la señal de televisión. Tiene su origen en una recodificación del sistema RGB para responder a una características de la vision humana, más sensibles a los cambios de luminancia que a las modificaciones en matrices y saturaciones. La reformulación del modelo RGB logra una transmisión más eficiente de la señal al destinar más ancho de banda a la luminancia que a la crominancia y permite a su vez, una total compatibilidad con los monitores monocromos (blanco y negro). En estos dispositivos sólo la información de luminancia Y es procesada. Las otras dos componentes, puramente cromáticas, solo se emplean en receptores a color. Este modelo, al igual que el de $L^*a^*b^*$, se basa en la teoría de los colores opuestos.

El modelo YIQ es el utilizado por el comité televisivo que desarrollo el sistema de televisión en color en los Estados Unidos de América, NTSC. Por el contrario los sistemas europeos PAL Y SECAM, emplean la codificación YUV. La diferencia entre ellos es que el ancho de banda de las señales IQ, del modelo YIQ, puede ser reducido en mayor grado que el ancho de banda de las señales UV, para un nivel igual de visión.

Asumiendo un rango de valores cromáticos RGB, YIQ, y YUV , se tiene la siguiente conversión lineal entre los modelos:

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.275 & -0.321 \\ 0.212 & -0.523 & 0.311 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.147 & -0.289 & 0.436 \\ 0.615 & -0.515 & -0.100 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Para obtener los valores de RGB a partir de YIQ y YUV, sólo hay que calcular las inversas de las matrices de transformación anteriores. En representación discreta, la señal Y se distribuye en [0,255], mientras que la cromaticidad suele oscilar en [-160,160].

Los sistemas YIQ y YUV también admiten representación en cilíndrica. El nuevo sistema se identifica como YSH, donde S se corresponde con la saturación y H con el matiz. Los valores de saturación y matriz, pueden calcularse como:

$$H_{YIQ} = \tan^{-1} \left(\frac{Q}{I} \right)$$

$$S_{YIQ} = \sqrt{I^2 + Q^2}$$

4.6. Espacio de color $L^*a^*b^*$ y $L^*u^*v^*$

Los modelos de color $L^*a^*b^*$ y $L^*u^*v^*$, son espacios estandarizados por la CIE, en 1.976 para lograr una representación perceptualmente uniforme del color. De esta manera, los colores se representan en espacio a unas distancias proporcionales a las diferencias visuales entre ellos. Es por tanto, un sistema recomendado para mediciones industriales del color de los objetos.

La uniformidad del color entre ambos espacios es equivalente. Centrando el estudio en el espacio CIELAB, se puede comentar que se basa en el modelo de los colores opuestos. La variable L^* , es una medida de luminancia, mientras que a^* y b^* , definen señales de color magenta-verde y amarillo-cyan, respectivamente. Un valor negativo de a^* , define un color mas verde que magenta, mientras que un valor positivo de b^* , define un color mas amarillo que cyan. La representación espacial del modelo CIELAB, se ilustra en la figura 2.16

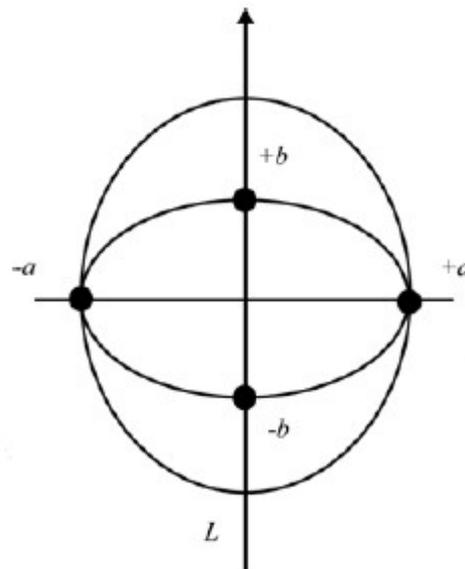


Figura 2.16: Representación espacial del modelo CIELAB

La transformación del modelo RGB a los espacios CIELAB Y CIELUV no es inmediata. Los valores de L^* , a^* y b^* se calculan mediante transformaciones no lineales, haciendo uso del espacio XYZ.