

# Tema 1

## Luz y sistema visual humano

### 1.1 Luz, luminancia y brillo

La luz es la radiación electromagnética que estimula nuestra respuesta visual. La luz ocupa una región estrecha del espectro electromagnético situado entre 389 nm (violeta) y 780 nm (rojo). La figura 1.1 muestra el espectro de la radiación electromagnética y la figura 1.2 la distribución espectral de algunas luces.

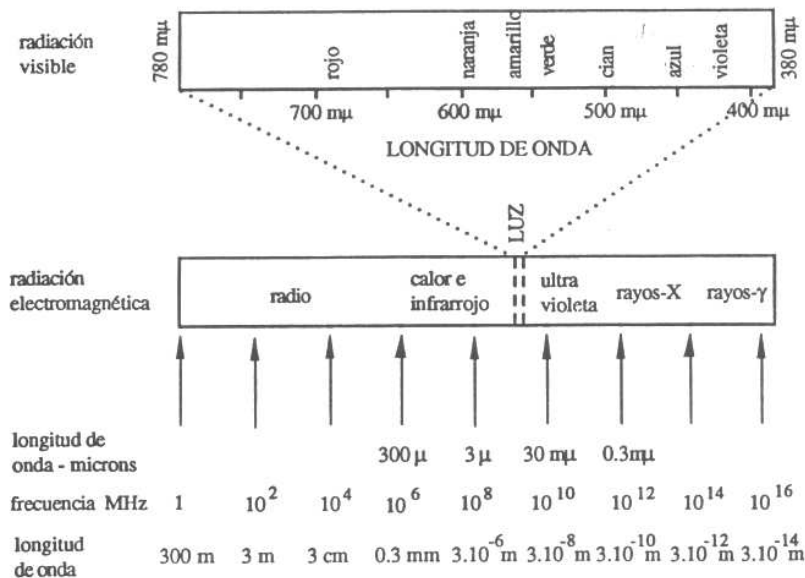


Figura 1.1: Espectro de la radiación electromagnética

La distribución de energía de una onda electromagnética que atraviesa un cierto plano espacial se puede representar por  $C(x, y, t, \lambda)$ , donde  $x$  e  $y$  son variables espaciales,  $t$  es la variable temporal y  $\lambda$  es la longitud de onda. La función  $C(x, y, t, \lambda)$  se llama “flujo radiante/(área, longitud de onda)” o irradiancia por longitud de onda. Las unidades asociadas son de energía/(área, tiempo, longitud de onda). La luz se distingue de otras ondas electromagnéticas por el hecho de que es sensible al ojo. Consideremos un punto espacial fijo  $(x', y')$  en un instante determinado de tiempo  $t'$ . Podemos escribir  $C(x, y, t, \lambda)$  como función únicamente de la  $\lambda$ ,  $C(\lambda)$ .

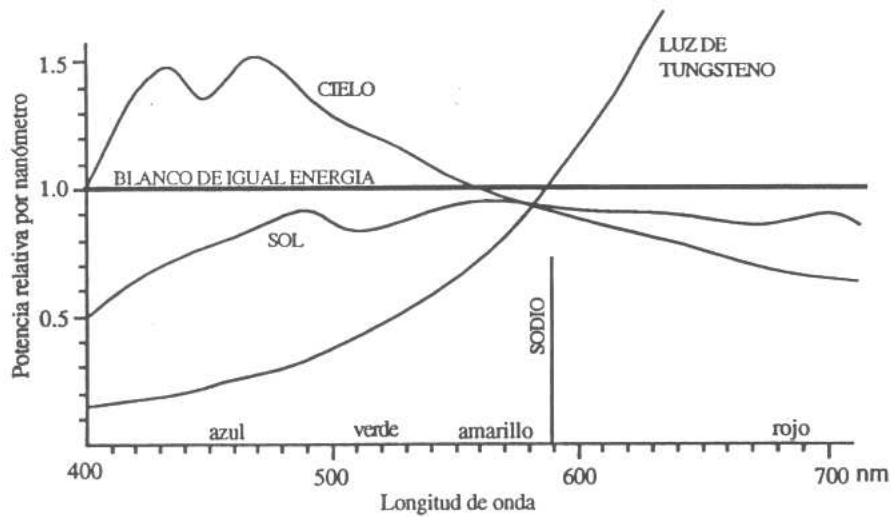


Figura 1.2: Distribución de energía espectral de algunas luces.

La percepción humana de la luz se describe generalmente en términos de brillo, tinte y saturación. El brillo se refiere a la cantidad de luz percibida, el tinte al color (rojo, verde...) y la saturación a la viveza de dicho color. Los tres son parámetros perceptuales, lo que significa que dependen de factores tales como la forma específica de  $C(\lambda)$ , la exposición previa del espectador a otros estímulos anteriores, el entorno, etc. Sin embargo, es posible relacionar dichos factores a características de  $C(\lambda)$ .

Las cantidades asociadas a  $C(\lambda)$ , tales como el flujo radiante, la irradiancia, etc., se denominan cantidades *radiométricas*. Estas cantidades se definen independientemente del observador. Las contribuciones que  $C(\lambda_1)$  y  $C(\lambda_2)$  aportan a la percepción de brillo por un observador son en general bastante diferentes para  $\lambda_1 \neq \lambda_2$ , incluso aunque  $C(\lambda_1)$  sea la misma que  $C(\lambda_2)$ . Por esta razón, una simple integral de  $C(\lambda)$  con respecto a  $\lambda$  no se relaciona de forma adecuada con la percepción de brillo. Las cantidades que tienen en cuenta las características del sistema visual humano se denominan cantidades *fotométricas*. La fotometría es la ciencia que relaciona el brillo percibido por un observador con la energía radiante. La cantidad fotométrica básica es la luminancia (establecida por el CIE<sup>1</sup> en 1948).

## 1.2 Colorimetría aplicada a TV en color

La utilización del color en la visualización de imagen no es únicamente más agradable, sino que nos permite apreciar más información visual. A continuación veremos los distintos modos que existen de mezclar colores, lo que nos llevará a poder formular un color como una suma de colores primarios.

### 1.2.1 Mezcla sustractiva de colores

Llamamos *poder transmisor de un filtro* a una longitud de onda  $\lambda$ , al cociente entre la intensidad de luz que transmite partido por la intensidad de luz que incide. Lo representamos por  $T_\lambda$ .

<sup>1</sup>Comisión Internacional de Iluminación

Sean dos filtros con curvas de transmisión  $T_\lambda$  y  $T'_\lambda$ . Si se colocan simultáneamente, el poder de transmisión es el producto de ambos ( $T_\lambda \cdot T'_\lambda$ ), tal como se muestra en la figura 1.3. Los colores que se obtienen por mezcla de pinturas y tintas siguen el método sustractivo.

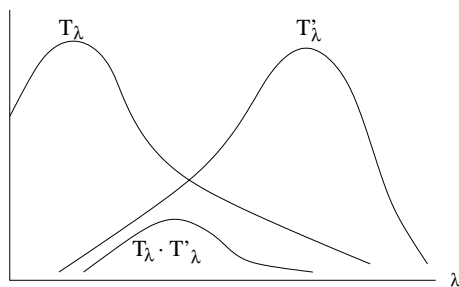


Figura 1.3: Mezcla sustractiva de colores

### 1.2.2 Mezcla aditiva de colores

Es la que obtenemos al iluminar una pantalla blanca con dos luces coloreadas  $S_1$  y  $S_2$ . Si iluminamos con luz roja y amarilla, veremos el color naranja. Sin embargo, un análisis espectral arrojaría que realmente lo que hay son dos luces, con las longitudes de onda correspondientes al rojo y al amarillo, y no hay una luz naranja. Sin embargo, nosotros la vemos. La sensación de este color, es por lo tanto un fenómeno imputable al receptor.

Para la obtención de cualquier color del espectro por el método aditivo, se requiere el aporte de 3 componentes, que denominamos *colores primarios*. En TV estos colores son el rojo (R), el verde (G) y el azul (B).

### 1.2.3 Leyes de Grassmann

Se debe a Maxwell y a Grassmann la demostración de que toda sensación de color se puede obtener por suma de tres fuentes,  $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ , de colores seleccionados a los que denominamos primarios. Según Grassmann, dos radiaciones son cromáticamente equivalentes si producen igual sensación de brillo, matiz y saturación (aunque no tengan la misma composición espectral). Grassmann formuló una serie de leyes al respecto:

1. *Trivarianza*. Un color cualquiera  $X$ , de luminancia  $L$ , se puede igualar mediante tres luminancias R, G, B, o cantidades adecuadamente dosificadas de tres luces RGB.

$$X = R \cdot P_R + G \cdot P_G + B \cdot P_B \quad (1.1)$$

2. *Luminancia*. La luminancia de  $X$  es la suma de las luminancias de sus componentes.

$$L_X = L_R + L_G + L_B \quad (1.2)$$

3. *Proporcionalidad*. Si se multiplican los dos miembros de la eq. (1.1) por un número, la igualdad no se altera. (El ojo tiene característica lineal).

$$\alpha \cdot X = \alpha \cdot R \cdot P_R + \alpha \cdot G \cdot P_G + \alpha \cdot B \cdot P_B \quad (1.3)$$

4. *Aditividad.* La luminancia del color resultante de una mezcla de colores es la suma de sus primarios.

$$\begin{aligned}
 L_X &= L_R + L_G + L_B \\
 L'_X &= L'_R + L'_G + L'_B \\
 L''_X &= L_X + L'_X \\
 &= L_R + L_G + L_B + L'_R + L'_G + L'_B \\
 &= (L_R + L'_R) + (L_G + L'_G) + (L_B + L'_B)
 \end{aligned}$$

#### 1.2.4 Determinación de coeficientes. El Colorímetro

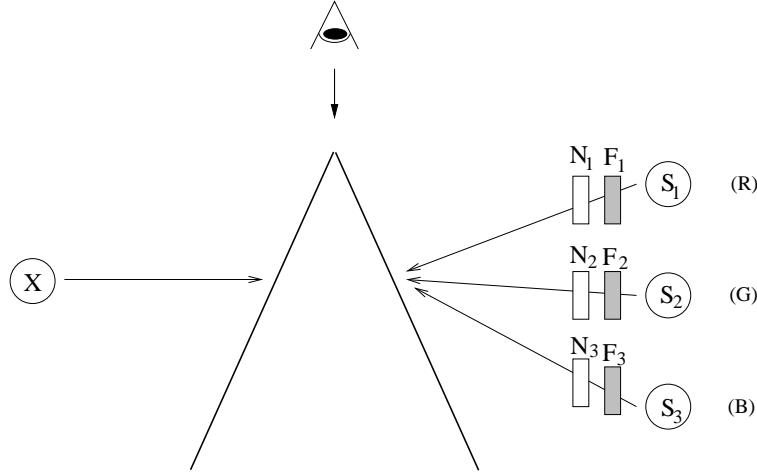


Figura 1.4: Colorímetro

Para la determinación de los coeficientes que forman cada color, usamos el *colorímetro* (figura 1.4). Sean  $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ , tres fuentes de luz roja, verde y azul respectivamente. Sean  $F_1$ ,  $N_1$ ,  $F_2$ ,  $N_2$ ,  $F_3$ ,  $N_3$ , tres parejas de filtros neutros regulables (absorben por igual todo el espectro) que interceptan los haces de luz.

Desde el otro lado del colorímetro se proyecta una luz *pura*. Un observador mira a las dos pantallas simultáneamente. Antes de empezar es necesario calibrar el colorímetro. Para ello desde  $X$  se emite luz blanca (se usa un “blanco de referencia”, como el luminante D6500). Colocamos los filtros  $N_i$  abiertos al máximo, y ajustamos los filtros  $F_i$  hasta lograr la misma sensación de color en las dos pantallas. Una vez logrado, fijamos los filtros  $F_i$  y no los modificaremos más en el experimento. Los filtros quedan abiertos al 30% para el rojo, al 59% para el verde y al 11% para el azul. De aquí se obtiene la ecuación que “convierte” parámetros RGB en luminancia:

$$Y = 0.30R + 0.59G + 0.11B \quad (1.4)$$

Sustituimos la luz blanca por la luz coloreada ( $C$ ) que deseamos analizar. Para lograr en ambos lados la misma sensación de color, modificamos ahora los filtros  $N_i$  (sin tocar  $F_i$ ). Para luz blanca, los filtros  $N_i$  estaban abiertos al máximo, por lo que sus componentes serán  $(1, 1, 1)$ . El rojo puro va a tener como componentes  $(1, 0, 0)$ .

Si cierro a la vez los 3 filtros  $N_i$  se van obteniendo sucesivos niveles de gris, hasta llegar a  $(0, 0, 0)$  que se corresponderá con el negro.

Si representamos en un sistema cartesiano todos los experimentos realizados, tendremos que la luz  $X$  se puede entender como un vector con componentes RGB. Dado un color  $C_1 = R_1 + G_1 + B_1$  su representación es la que se muestra en la figura 1.5. El módulo del vector  $OC_1$  nos da la luminancia del color.

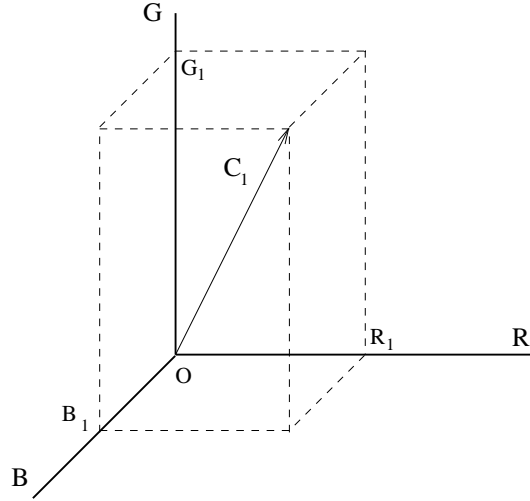


Figura 1.5: Descomposición en componentes de un color

### 1.2.5 Representación del color mediante parámetros $r$ y $g$

Si nos movemos en un plano en el que la luminancia (módulo del vector  $OC_1$ ) sea constante, y únicamente nos interesan las diferencias de matiz, nos basta con dos parámetros para determinar el color. Definimos en  $OC_1$ :

$$r_1 = \frac{R_1}{R_1 + G_1 + B_1} \quad g_1 = \frac{G_1}{R_1 + G_1 + B_1} \quad b_1 = \frac{B_1}{R_1 + G_1 + B_1}$$

donde se verifica que

$$r_1 + g_1 + b_1 = \frac{R_1 + G_1 + B_1}{R_1 + G_1 + B_1} = 1$$

Esto nos indica que basta conocer dos de estas coordenadas reducidas, ya que la tercera se obtiene por diferencia. Se han adoptado  $r$  y  $g$  como parámetros de este sistema. El plano formado por las dos componentes se conoce como *carta rg* (figura 1.6). El blanco estaría representado por las coordenadas  $(1/3, 1/3)$  y el rojo por  $(1, 0)$ .

Desgraciadamente la experiencia dice que hay tonos que no se pueden obtener en el colorímetro como suma de colores RGB. Es necesario poner una luz al otro lado; dado que no podemos restar colores, se suma al otro lado:  $C_1 + R_1 = G_1 + B_1$ . En el plano  $rg$  esto daría lugar a  $r = \frac{-R_1}{-R_1 + G_1 + B_1}$ , lo que obliga a considerar valores negativos.

### 1.2.6 Componentes tricromáticas internacionales

Con objeto de que todo color se halle representado por un punto situado en el primer cuadrante (esto es, sin componentes negativas) el CIE reformó en 1931 el sistema de parámetros  $r$ ,  $g$  y  $b$  adoptando ciertas funciones lineales de ellos a las que llamó  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

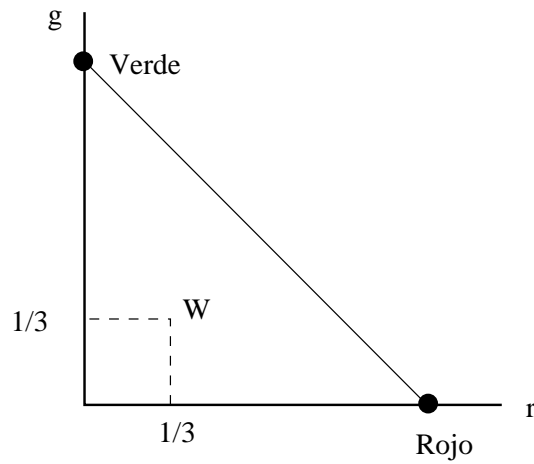


Figura 1.6: Carta rg

En realidad lo que se hizo fue tomar nuevos patrones primarios *ficticios* que cumplieran las condiciones requeridas. A las componentes de color referidas a tales patrones se les denominó *coordenadas tricromáticas* o *valores triestímulo*  $X, Y, Z$ :

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

donde  $x + y + z = 1$ , por lo que basta conocer  $x$  e  $y$ .

Las coordenadas  $x, y$  calculadas para todos los colores del espectro, arrojan una gráfica llamada *curva lugar del espectro* (spectral locus) que representa la frontera de todos los colores reales existentes (fig. 1.7).

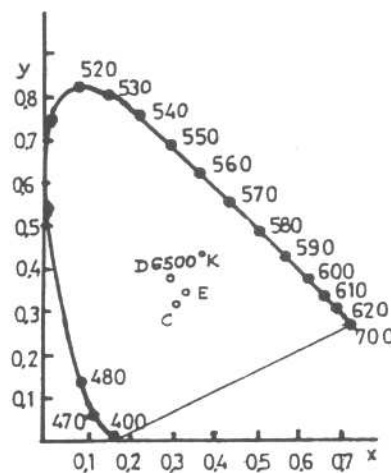


Figura 1.7: Spectral locus, carta cromática xy CIE

El centro de gravedad del pseudotriángulo que resulta de unir con una recta los dos

extremos de la curva lugar des espectro, lo ocupa el llamado *blanco CIE de idéntica energía*, que es aquel blanco conseguido por un espectro de igual energía. Tiene por coordenadas  $(1/3, 1/3)$ . Muy próxima a este blanco se encuentra el *iluminante C* que sustituye con mucha aproximación a la luz media diurna, siendo éste otro de los blancos de referencia. En televisión sin embargo se ha adoptado el iluminante  $D_{6.500^{\circ}k}$ .

La mezcla aditiva de dos colores se encuentra situada sobre el segmento que los une, a una distancia que depende de la proporción. Los colores que pueden combinarse de forma aditiva para obtener blanco se denominan complementarios.

### 1.3 Sistema visual Humano

A partir del conocimiento del sistema visual humano se pueden diseñar de forma más eficiente los sistemas de procesado de imagen; podemos mejorar la restauración, transmisión y almacenamiento, adquisición y visualización, y en general todos los sistemas que tengan como objetivo final al presentación de una imagen a un espectador.

#### 1.3.1 El ojo

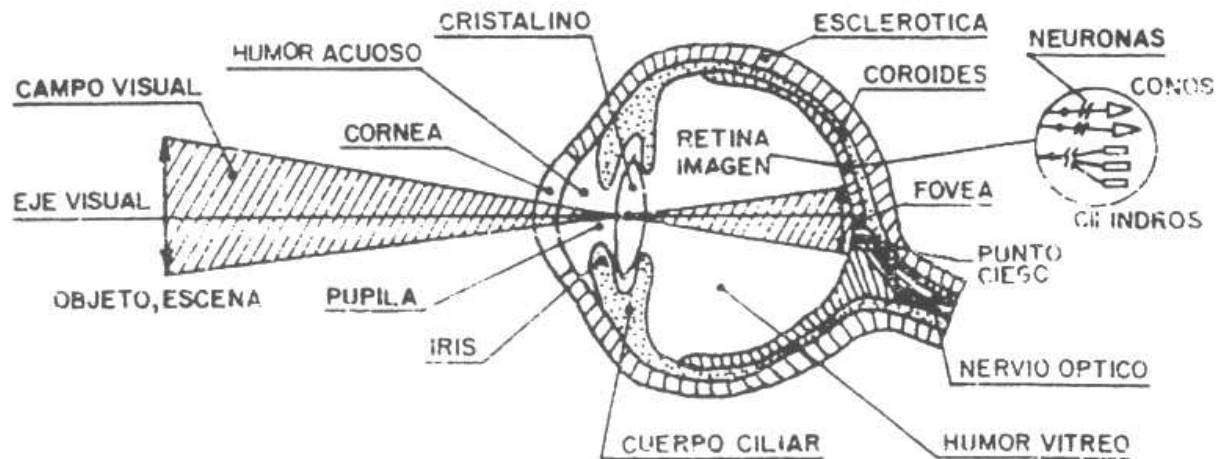


Figura 1.8: Corte transversal de un ojo

El ojo es un mecanismo fisiológico muy complejo, sensiblemente esférico. La existencia de dos globos oculares implica que cada uno se encuentre alojado en su cavidad cónica correspondiente, órbita provista de ligamentos, tejidos y músculos que le mantienen en suspensión y permiten libertad de movimientos en la dirección visual deseada. La figura 1.8 muestra un corte esquemático. Los principales elementos son:

**Esclerótica** Capa formada por fibras rígidas. Es blanca y opaca, pero se vuelve transparente en la córnea, frente a la pupila. Esta es la abertura de un diafragma, el **iris**, y por ella van a penetrar los fotones del espectro visible.

**Cristalino** Situado detrás del diafragma, es una lente biconvexa de foco variable. La **pupila** opera en función del número de fotones incidentes, en forma involuntaria. Su diámetro puede variar entre 2 y 8 mm.

**Coroides** Capa formada por vasos capilares que proporcionan el riego sanguíneo necesario para mantener el ojo en acción. Es negro, y se transforma frente a la córnea en el *cuerno ciliar*, músculo en anillo que a manera de pinza circunda el cristalino. Su función es variar la convexidad de éste. A fin de enfocar voluntariamente sobre la **retina** los objetos situados a diferentes distancias.

**Retina** Capa interna fotosensible.

**Humores acuoso y vítreo** Medios líquidos ópticos que contribuyen junto con la esclerótica a mantener turgente el globo ocular.

Córnea, humor acuoso, diafragma, cristalino y humor vítreo forman un sistema dióptrico complejo, de lentes gruesas de distinto índice de refracción que va a enfocar el objeto sobre la retina.

En la retina existen dos tipos de células fotosensibles. A causa de su forma se las denomina *conos* y *bastoncitos*. Los conos se concentran en una región cerca del centro de la retina llamada *fóvea*. Su distribución sigue un ángulo alrededor de  $2^\circ$  contados desde la fóvea. La cantidad de conos es de unos 6 millones, y tienen una terminación nerviosa que va al cerebro. Son los responsables de la visión del color, y se cree que hay tres tipos de conos, sensibles a los colores rojo, verde y azul respectivamente. Los conos, dada su forma de conexión a las terminaciones nerviosas que van al cerebro, son los responsables de la definición espacial. Son poco sensibles a la intensidad de luz y proporcionan visión fotópica (visión a altos niveles).

Los bastoncitos se concentran en zonas alejadas de la fóvea y son los responsables de la visión escotópica (visión a bajos niveles). Los bastoncitos comparten las terminaciones nerviosas que van al cerebro, siendo por tanto su aportación a la definición espacial poco importante. La cantidad de bastoncitos se sitúa alrededor de 100 millones, y no son sensibles al color. Son mucho más sensibles que los conos, y son los responsables de la visión nocturna. Estas características explican, por ejemplo, que en ambientes de baja iluminación el ojo no distinga los colores ni que tampoco resuelva detalles finos. La distribución de conos y bastoncitos en la retina se muestra en la figura 1.9.

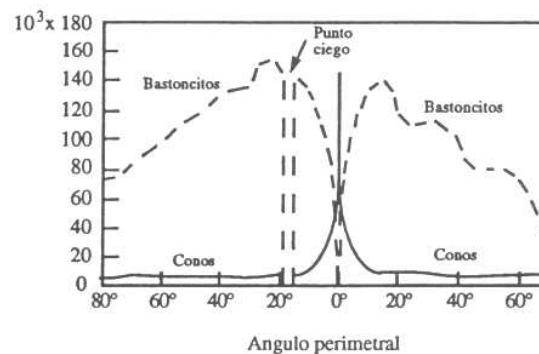


Figura 1.9: Distribución de conos y bastoncitos en la retina



Una vez la luz incidente se ha convertido en señal de neurona, esta señal se dirige al cerebro, donde se convierte en información visual. Este proceso de conversión es muy poco conocido.

### 1.3.2 Respuesta del sistema visual humano

**Iluminación de la retina** Lo que vemos no es solamente fruto de la excitación de conos y bastoncitos por la luz, sino que hay un procesado posterior, que se realiza en el cerebro, que hace que muchas veces se vean cosas distintas a las que realmente hay. La escena que vemos tiene un determinado brillo ( $Y$ ). Existe una relación entre el brillo real de la imagen y la iluminación producida en la retina:

$$E = K \times Y \times S_p \quad (1.5)$$

siendo  $K$  una constante con un valor aproximado de 0.003, y  $S_p$  la superficie de la pupila en  $mm^2$ . De aquí se desprende que la cantidad de luz que llega a la retina depende de la apertura de la pupila, que a su vez depende del nivel de luz ambiente existente. Es por eso que hablamos de *iluminación de adaptación* ( $Y_a$ ). En la figura 1.10 se muestra la variación de esta iluminación de adaptación con distintos parámetros.

La sensibilidad de la retina puede variar debido a dos factores:

1. La mayor o menor apertura de la pupila.
2. La variación de la sensibilidad de la retina propiamente dicha

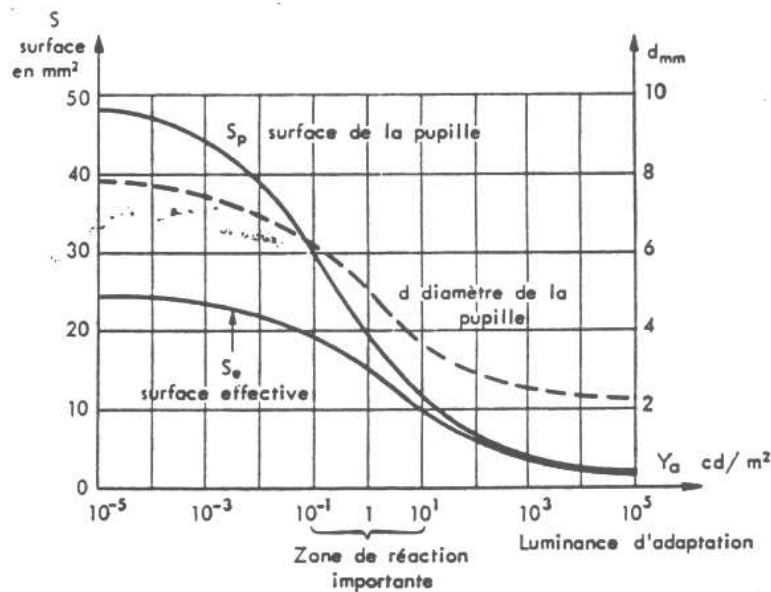


Figura 1.10: Acción de la luz sobre la pupila y la sensibilidad del ojo

**Umbral de diferencia de luminancia. Sensibilidad al contraste** Se sabe que la respuesta del ojo a los cambios de intensidad de iluminación es no lineal. Consideremos una zona iluminada con intensidad  $I + \Delta I$  rodeada de un fondo de intensidad  $I$ , tal como se muestra en la figura 1.11-a. El momento en que la diferencia  $\Delta I$  comienza a

ser notada se determina como función de  $I$ . Sobre un rango amplio de intensidades, se ha encontrado que la tasa  $\Delta I/I$  (llamada la fracción de Weber) es prácticamente constante para un valor de aproximadamente 0.02. Este resultado no se mantiene para intensidades muy bajas o muy altas, tal como se ve en la figura 1.11-a. Consideremos ahora el experimento de la figura 1.11-b, en el que hay dos regiones iluminadas, una con  $I$  y la otra con  $I + \Delta I$ , con un fondo de intensidad  $I_0$ . Los resultados de la fracción de Weber en función del fondo están en la misma figura. El rango en que la fracción de Weber permanece constante se reduce considerablemente respecto al experimento anterior. Sin embargo la envolvente de las curvas obtenidas es equivalente a la curva del primer experimento.

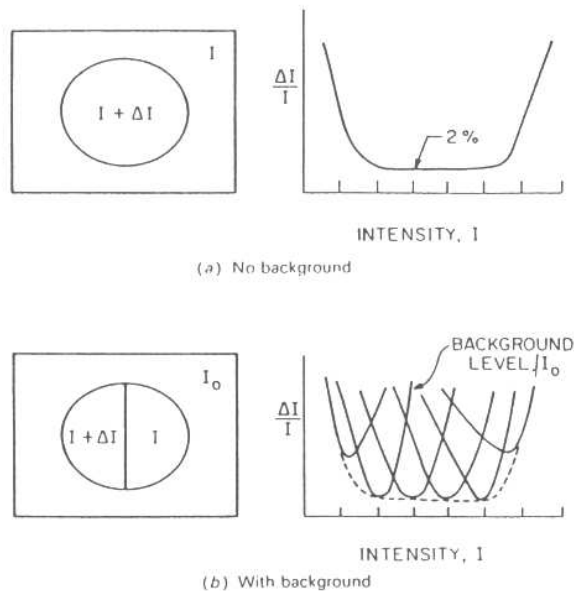


Figura 1.11: Medidas de sensibilidad al contraste

**Agudeza visual** Es la capacidad de distinguir objetos muy pequeños. Un experimento clásico consiste en alternar líneas negras y blancas. Hay un momento en que el ojo no es capaz de distinguirlos. La agudeza visual se define como

$$V = \frac{1}{\alpha} \quad (1.6)$$

donde  $\alpha$  es el *poder separador del ojo*, es decir, el ángulo en que el ojo empieza a distinguir las rayas blancas de las negras. El valor medio para el ojo humano es de  $\alpha = 1$  min.

**Umbral diferencia de crominancia** En el colorímetro fijamos un color  $C$  con una luminancia fija, y vamos variando su color,  $C + \Delta C$  hasta que percibamos un cambio de color. Si representamos en la carta cromática los umbrales de variación de cada color, obtenemos lo que se conoce como elipses de Mac Adam (fig. 1.12). Las curvas representan los umbrales en los que un cambio de color empieza a percibirse. Como se puede ver, los umbrales no son iguales para todos los colores.

**Flicker** (parpadeo). Iluminamos una escena con destellos de luz con una frecuencia de  $N$  destellos por segundo. Si  $N$  es pequeña, los destellos de luz se aprecian separados.

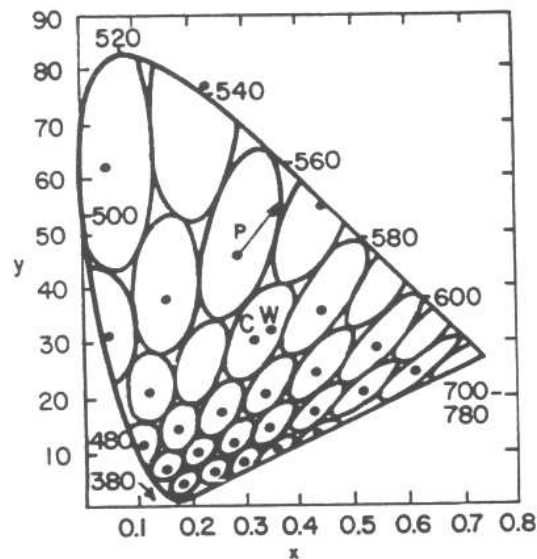


Figura 1.12: Elipses de Mac Adam

Si se incrementa la frecuencia, aparece el fenómeno denominado *parpadeo*. Es una sensación visual muy desagradable para el ojo. Si seguimos aumentando la frecuencia, se hace cada vez menos molesto hasta que a partir de una frecuencia se aprecia como si fuera luz continua. Esta frecuencia se denomina frecuencia crítica de flicker, depende de la intensidad, y va de 37 a 100 Hz (para objetos muy iluminados). En cine se suelen utilizar 24 imágenes por segundo, utilizando cada fotograma 2 veces, logrando así una frecuencia de 48 fotogramas/seg.

**Integración espacial** Un grupo de puntos suficientemente próximos entre sí, de tal modo que no puedan ser distinguidos por la estructura discontinua de la retina, serán percibidos como si fueran una fuente puntual, cuyo espectro resultante es la suma de los espectros componentes de la radiación de cada uno.

**Mezcla aditiva temporal** La respuesta de los elementos sensores de la retina a un impulso luminoso instantáneo rectangular, es prácticamente inmediata en el flanco anterior, pero al flanco posterior le corresponde como respuesta una curva exponencial de caída, para un ojo medio, de 50 ms. Dicho tiempo es el límite de la memoria visual o persistencia de la visión, y durante él se produce la integración temporal. Si el tiempo de separación es superior a 50 ms, es cuando se produce el parpadeo.

Otros fenómenos visuales que tienen relación con el diseño de sistemas de comunicación visual son

**Tiempo de recuperación** La retina tiene tiempos de reacción finitos. Este tiempo es de 1/6 a 1/10 de segundo para el paso de blanco a negro, y de aproximadamente 1/2 seg. para el paso de un color a otro de la misma intensidad. Cuanto más intenso es el estímulo, más tiempo necesita la retina para estar en disposición de recibir otro. A esto se llama *tiempo de recuperación*.

**Percepción logarítmica** Weber-Fecher descubrieron que la percepción visual es logarítmica.

**Percepción del color** Debido a la gran diferencia de número entre conos y bastoncitos, el ojo posee una gran definición para percibir las variaciones de brillo o luminancia y baja respecto a las variaciones cromáticas.

**Principio del contraste sucesivo.** Al desaparecer un color súbitamente, en la retina aparece su complementario.

**Principio del contraste simultáneo .** Dos superficies cromáticas modifican su saturación y extensión cuando se sitúan una en el entorno de la otra.

**Principio de la constancia de la forma .** El espectador añade una gran cantidad de información completando el resto de lo que percibe.

**Enmascaramiento visual.** Reducción visual de un cierto estímulo cuando dicho estímulo está rodeado por grandes cambios espaciales de luminancia. (Por ejemplo, el ruido es más visible en las zonas uniformas que en las de gran contraste).

**Sensación de movimiento** No debe ser confundido con el flicker. Se ha demostrado de forma experimental que el número de imágenes que se deben presentar a un espectador para que el movimiento aparezca de forma continua debe ser mayor de 15. Las frecuencias suficientemente altas para evitar el flicker, son suficientes para dar sensación de movimiento.