

Capítulo 2

Luz, Color y Visión

Elisa Colombo y Beatriz O`Donell

1. Magnitudes fotométricas

2. Magnitudes colorimétricas

3. Instrumentos de medición

4. Características funcionales del sistema visual humano

5. Efectos de las condiciones de iluminación sobre las capacidades del sistema visual

5.1. El estímulo visual y sus características

5.2. Agudeza visual

5.3. Contraste umbral y Función Sensibilidad al contraste

5.4. Función de sensibilidad temporal

5.5. Discriminación de color

5.6. Alternativas para mejorar la eficiencia visual umbral

Bibliografía

La luz es la parte de la energía radiante evaluada visualmente, es decir, la energía que, al interactuar con alguna superficie, se refleja o se trasmite hacia el sistema visual y produce la respuesta de los fotorreceptores, dotando al ser humano del sentido de la visión. Una comprensión integral de la luz implica, además de una aproximación desde la física, la consideración de la respuesta del ser humano, tanto psicológica como fisiológica, ya que la iluminación tiene un propósito más amplio que el de asegurar que los objetos sean vistos.

La naturaleza de los vínculos y relaciones existentes entre las condiciones de iluminación y las características del objeto visual, así como los requerimientos que deben cumplirse para optimizar la habilidad y capacidad humana, son complejos y no existen “fórmulas mágicas” para resolver una dada situación. Esto se pone de manifiesto en la complejidad de estos estudios y la cantidad de variables involucradas, la mayoría de ellas no controlables. El análisis se hace más complejo si se tienen en cuenta las diferencias individuales, que pueden deberse a la edad de las personas o a las condiciones de la visión, y el peso que tiene la componente visual en la totalidad de la tarea.

Mientras la eficiencia visual se cuantifica a través de la velocidad y la precisión con que se realiza una tarea, el confort visual es una medida del grado en que las condiciones de iluminación predisponen favorablemente a las personas para realizar la tarea. Los aspectos que afectan a la eficiencia están relacionados con la tarea y su entorno inmediato, mientras que aquellos que influyen sobre el confort involucran aspectos más generales del medio ambiente iluminado. Por ejemplo, puede ocurrir que en una oficina el nivel de iluminación corresponda al valor recomendado pero la fuente luminosa presente un parpadeo molesto, o la presencia de una ventana dentro del campo visual del usuario constituya un foco de distracción debido al deslumbramiento.

En resumen, una buena solución en el diseño de un sistema de iluminación debe asegurar eficiencia visual, confort visual y un medio ambiente apropiado a las personas que utilizarán ese espacio, así como consideraciones energéticas, condiciones térmicas, acústicas y visuales, ya que todas en conjunto conducirán a una mayor productividad en los usuarios de ese espacio.

1. Magnitudes fotométricas

Las fuentes de luz emiten energía en forma de ondas electromagnéticas. Esta radiación se cuantifica con la ayuda de las **magnitudes radiométricas**. Si interesa cuantificar solamente la radiación a la que es sensible el ojo humano estas magnitudes radiométricas se transforman en **magnitudes fotométricas**.

La luz corresponde a la pequeña parte del espectro electromagnético comprendida entre las longitudes de onda de 380nm (nm: nanometros; $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$) y 760nm, aproximadamente, cuya energía es absorbida por los fotorreceptores del sistema visual humano, iniciando así el proceso de la visión (Figura 1).

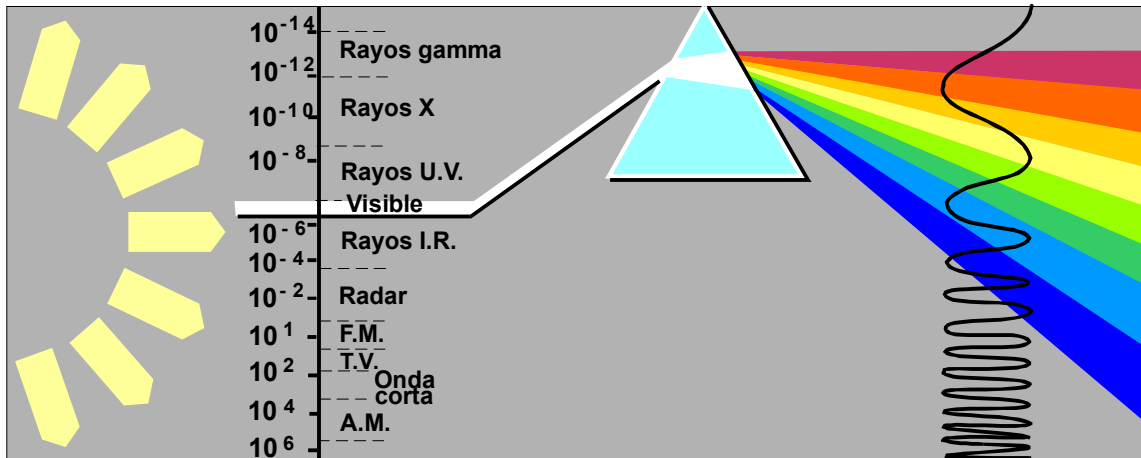


Figura 1.- Pequeña parte del espectro electromagnético que al incidir en el ojo humano provoca las sensaciones de claridad y color

El efecto visual de la radiación, en el rango visible, depende fuertemente de la longitud de onda. Las magnitudes fotométricas se obtienen mediante factores de peso que corresponden a la sensibilidad espectral relativa del sistema visual humano, basada en la diferente percepción de claridad para cada longitud de onda en la región visible. Debido a las diferencias individuales, y a la dependencia de esta curva de sensibilidad espectral de las condiciones experimentales, y en especial del nivel de iluminación, ha sido necesario lograr acuerdos internacionales entre representantes de los distintos países, los que han sido canalizados por la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE: Commission Internationale de l'Eclairage). La CIE (1970, 1978) adopta dos curvas de sensibilidad espectral relativa, $V(\lambda)$, para el observador CIE estándar, en condiciones fotópicas, es decir para niveles de iluminación altos, en el año 1924, y en condiciones escotópicas, es decir para niveles de iluminación bajos, en el año 1951. En la Figura 2 se muestran estas dos curvas, que están relacionadas a los dos sistemas de fotorreceptores que tiene el sistema visual humano, el de los conos, que opera fundamentalmente en condiciones fotópicas, y el de los bastones, que opera en condiciones escotópicas. El ojo muestra su máxima sensibilidad para 555nm en condiciones fotópicas, mientras que para condiciones escotópicas este máximo se desplaza hacia los 507nm.

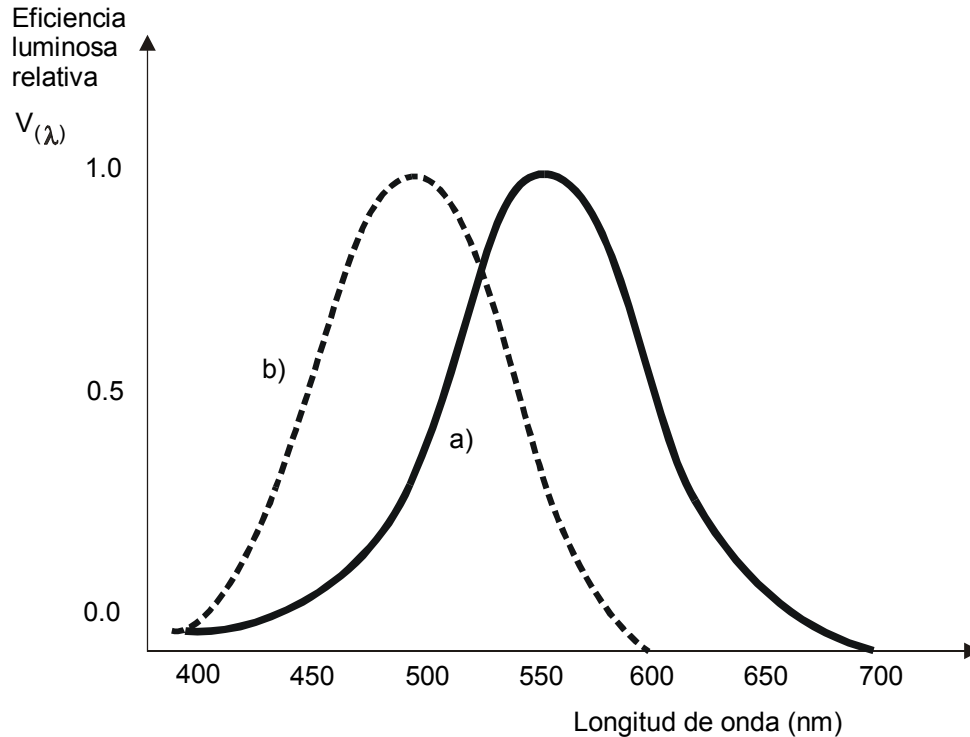


Figura 2.- Curvas de sensibilidad espectral para (a) el observador CIE en condiciones fotópicas (b) el observador CIE en condiciones escotópicas (CIE, 1970, 1978)

La medida fundamental de la radiación electromagnética emitida por una fuente es el **flujo radiante** (ϕ_{rad}), es decir, la cantidad de energía emitida por unidad de tiempo, y se mide en watt (W). La magnitud fotométrica derivada, usada para medir el efecto de la luz, es el **Flujo Luminoso** (ϕ_{lum}), que se esquematiza en la Figura 3a, es decir la cantidad de energía radiante por unidad de tiempo multiplicada por la sensibilidad espectral relativa del sistema visual humano integrada sobre el rango de longitudes de onda del visible, y se mide en lúmenes (lm). Así, el flujo luminoso se expresa por la ecuación:

$$\phi_{lum} = K_m \int_{380}^{760} V_{\lambda} \phi_{rad} d\lambda \quad (1)$$

donde $\phi_{rad} d\lambda$ es el flujo radiante en un pequeño intervalo de longitud de onda $d\lambda$, medido en watt, y ϕ_{lum} el flujo luminoso expresado en lúmenes. El valor de $V(\lambda)$ depende del observador estándar apropiado al nivel de iluminación, lo mismo que el valor de la constante K_m , que corresponde a 683 lm W^{-1} para condiciones fotópicas y 1699 lm W^{-1} para condiciones escotópicas. La relación entre el flujo luminoso y el flujo radiante, que define la eficiencia luminosa, depende del tipo de fuente, por ejemplo, el flujo luminoso de una lámpara incandescente de 100W es 1380lm y el de una lámpara fluorescente compacta de 20W con balasto electrónico es de 1200lm.

El *Flujo Luminoso* caracteriza la cantidad de luz total emitida por una fuente luminosa en todas direcciones. Sin embargo, para aplicaciones prácticas muchas veces es necesario cuantificar el flujo luminoso emitido en una dada dirección, para lo cual se define la **Intensidad Luminosa (I)** (Figura 3b) como el flujo emitido por unidad de ángulo sólido en una dirección especificada. La misma deriva de la magnitud radiométrica denominada **Intensidad de Radiación**. La unidad de medida de la intensidad luminosa es la *candela*, que es equivalente a un lumen/estereorradián. Esta magnitud fotométrica se usa para describir la distribución de luz proveniente de una fuente o una luminaria. El modo en como se distribuye la intensidad luminosa, de una lámpara o una luminaria, se indica mediante gráficas de isocandelas, es decir curvas de igual valor de intensidad. Estos diagramas, representados en coordenadas polares o cartesianas, permiten elegir una luminaria de acuerdo a las funciones para las cuales se utilizará.

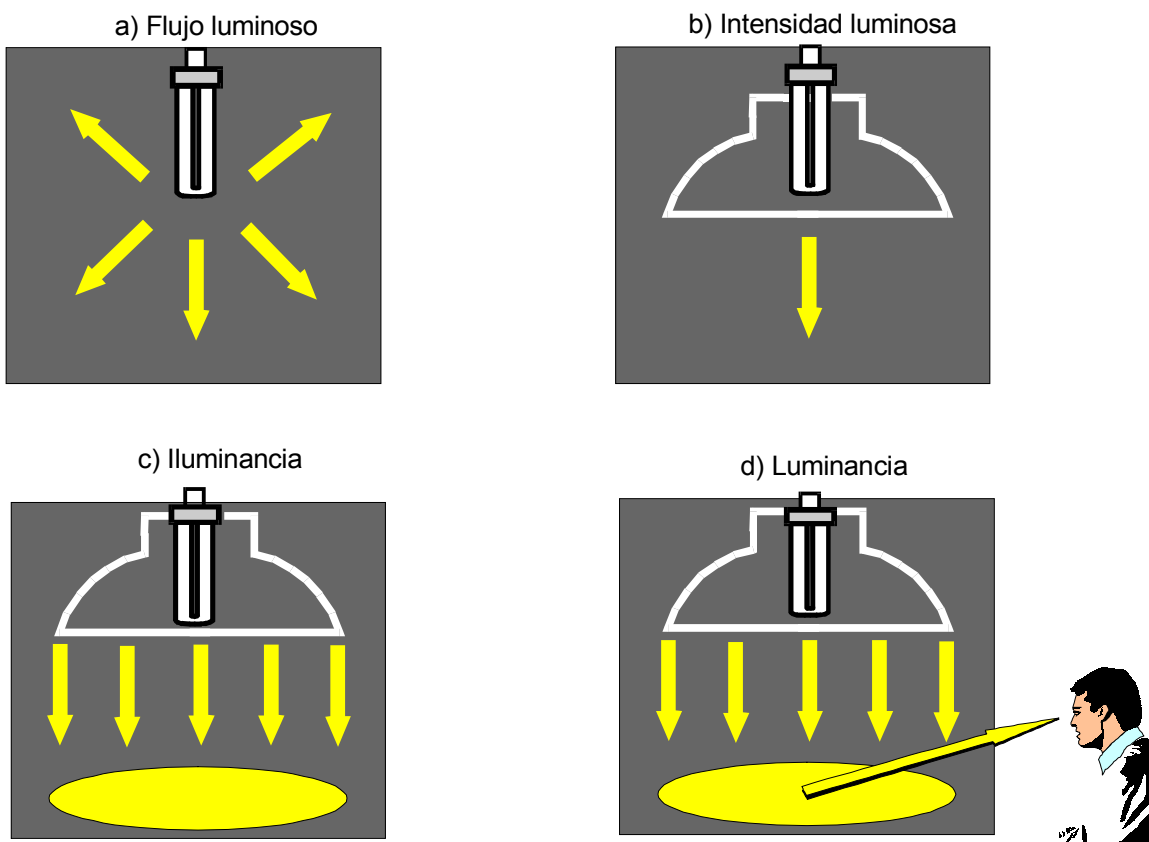


Figura 3.- Gráficos ilustrativos de los conceptos de (a) flujo luminoso, (b) intensidad luminosa, (c) iluminancia v (d) luminancia.

Si una lámpara fluorescente compacta con balasto convencional de 7W que emite 400lm fuera una fuente puntual, iluminando por igual en todas las direcciones, su intensidad sería 400lm/ $(4\pi \text{ sr})$, es decir 33 candelas, ya que el flujo luminoso total se divide por el ángulo sólido total subtendido por una esfera, 4π estereorradián.

Las otras dos magnitudes fotométricas fundamentales son: iluminancia (Figura 3c) y luminancia (Figura 3d). La **Iluminancia (E)**, que deriva de la **Irradiancia**, se define como el flujo luminoso que incide por unidad de área de una superficie dada. Se mide en lux (lx) = lm/m²). En general, cuando se mide la iluminancia sobre el plano de trabajo o **Iluminancia Horizontal**, se fija convencionalmente una altura de 0,85m. Cuando se necesita especificar la iluminancia sobre paredes o pantallas de video, las mediciones se hacen sobre planos verticales, lo que se conoce como **Iluminancia Vertical**. Su aplicación práctica es cuantificar la cantidad de luz que llega a una superficie y por la simplicidad de su medición es la magnitud que más se usa. La iluminancia sigue la ley inversa de los cuadrados, que en el caso de una fuente puntual toma la forma:

$$E = I / d^2 \quad (2)$$

donde d es la distancia desde la fuente luminosa a la superficie a la que llega el flujo luminoso y la superficie es perpendicular a la dirección de propagación de la radiación incidente (Figura 4a). Cuando la superficie no es perpendicular a la dirección de propagación del flujo luminoso (Figura 4b) la ecuación debe ser modificada y se obtiene:

$$E = (I / d^2) \cos \theta \quad (3)$$

donde θ es el ángulo de inclinación de la superficie.

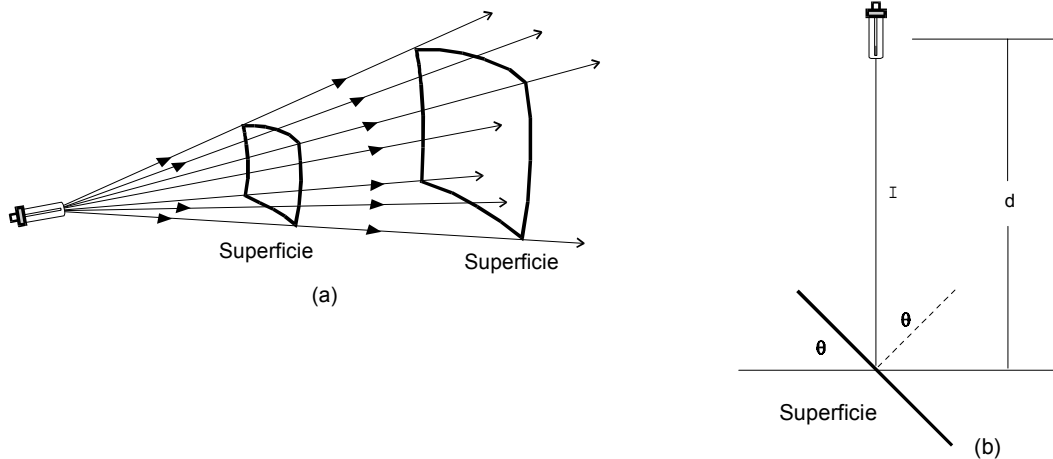


Figura 4.- Cálculo de la iluminancia para el caso de a) una superficie perpendicular a la dirección de la intensidad y b) una superficie que forma un ángulo θ con la dirección de la intensidad.

La **luminancia (L)**, que deriva de la **radiancia**, de una fuente o de una superficie, se define como la intensidad luminosa emitida, por la fuente o la superficie, en la dirección de un observador, dividida por el área de la fuente o la superficie vista por el observador, es decir por unidad de área proyectada. Su unidad es la candela por metro cuadrado (cd / m^2). Esta magnitud se ilustra en la Figura 5a para el caso de una lámpara fluorescente compacta. La línea de visión, desde el observador a la lámpara, forma un ángulo α con la línea perpendicular al frente de la lámpara. La luminancia en la dirección del observador (L_α) se calcula de la siguiente manera:

$$L_\alpha = I_\alpha / A \cos \alpha \quad (4)$$

donde I_α es la intensidad de la fuente en la dirección del ángulo α y el producto de A por $\cos \alpha$ es el área proyectada perpendicular a la dirección de visión. En la Figura 5b se ilustra un ejemplo similar para una superficie que refleja luz.

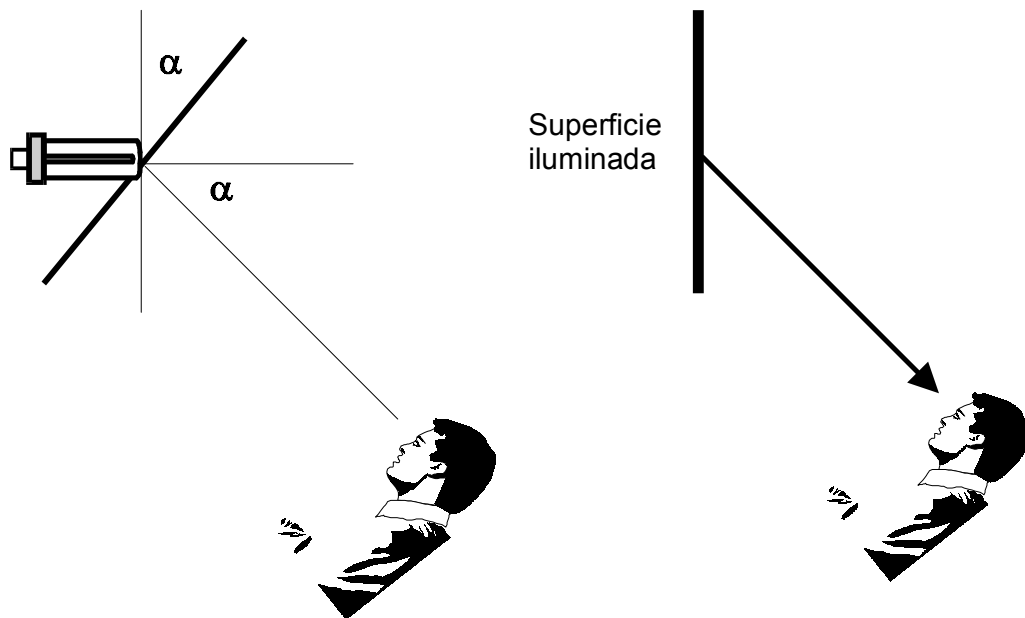


Figura 5.- La dirección de visión del observador forma un ángulo α con la normal (a) una lámpara fluorescente compacta y (b) superficie que refleja luz

En el caso de una superficie difusora perfecta la luminancia es independiente de la dirección de observación. Si se simboliza con I_0 a la intensidad según la normal, y con I_α a la que presenta en la dirección α de observación, se tiene que:

$$I_\alpha = I_0 \cos \alpha \quad (5)$$

Es decir que, en los emisores y difusores perfectos, la intensidad varía con el coseno del ángulo que forma la dirección de emisión con la normal, y se dice que emite según una ley del coseno o ley de Lambert. Los metales fundidos cumplen con la ley del coseno con bastante aproximación por lo que se suele usar como difusor patrón al óxido de magnesio. También son buenos difusores los vidrios esmerilados, las porcelanas blancas esmeriladas, el yeso, etc. Cuando se supone un emisor o un difusor perfecto se emplea para el valor de luminancia

constante el símbolo L , sin necesidad de especificar el ángulo. En la Figura 6 se representan las distintas posibilidades, en a) la situación de una superficie que refleja en forma especular, en b) el caso de un difusor perfecto y en c) la de un reflector que en parte es especular y en parte difusor.

En el caso de una superficie que refleja perfectamente en forma difusa se puede demostrar que, si su factor de reflectancia es ρ , la relación entre la iluminancia, es decir la radiación de

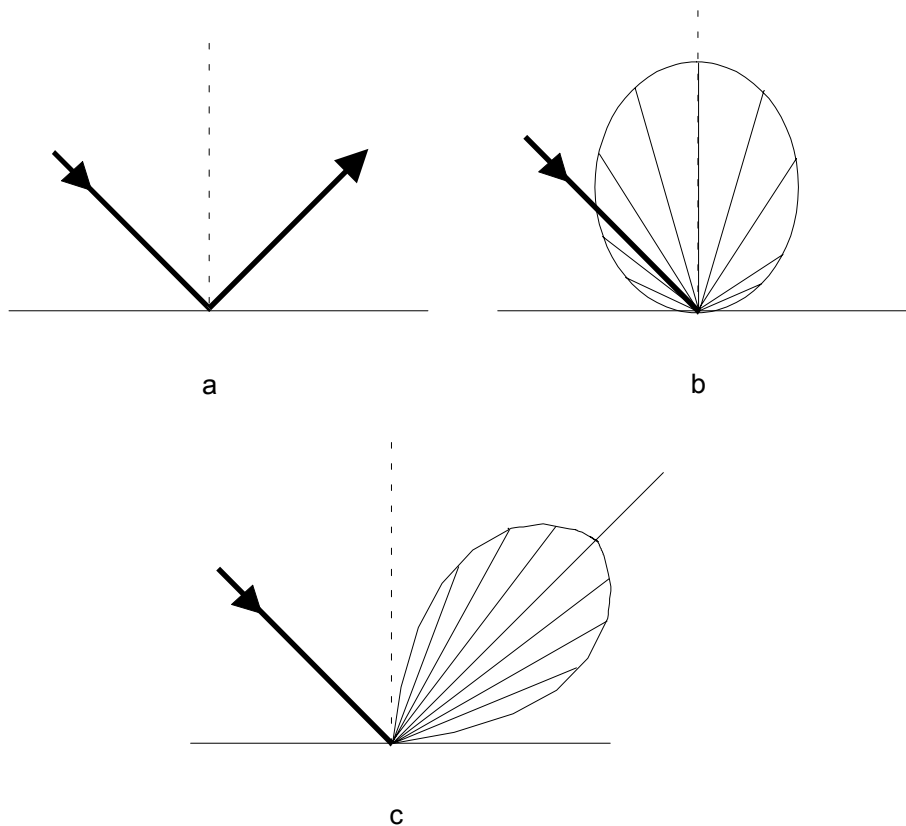


Figura 6.- a) reflector especular, b) reflector difuso, c) reflector en parte especular y en parte difusor

luz incidente, y la luminancia, es decir la reflejada desde ella, viene dada por la expresión:

$$L = \rho E / \pi \quad (6)$$

Si la superficie no es perfectamente difusora en lugar del factor de reflectancia se usa el factor de luminancia q que es el cociente entre la luminancia de la superficie reflectora, vista desde una dada dirección, a la luminancia de una superficie blanca difusora iluminada idénticamente, en este caso la ecuación es:

$$L = q E \quad (7)$$

La luminancia es una magnitud fotométrica de excepcional importancia por ser la variable que aprecia el ojo. La luminancia de una superficie tiene su correlato perceptual en la claridad de la misma, aunque la relación no es directa ni independiente de otras variables, como la composición espectral de la radiación o las condiciones de adaptación. Es la magnitud que

mejor permite indicar la calidad de la iluminación desde el punto de vista del usuario, la cual, junto a la iluminancia son las dos magnitudes más usadas por los diseñadores de sistemas de iluminación para cuantificar fotométricamente el medio ambiente visual.

En la Tabla 1 se resumen las definiciones de las magnitudes fotométricas.

Tabla 1.- Magnitudes fotométricas

Magnitud fotométrica	Definición	Unidades
Flujo luminoso: cantidad de flujo radiante que produce sensación visual	$\phi_{lum} = K_m \int_{380}^{760} V_{\lambda} \phi_{rad} d\lambda$	lumen (lm)
Intensidad luminosa: flujo luminoso emitido en un pequeño cono que contiene una dirección dada dividido por el ángulo sólido del cono	$I = d\phi_{lum} / d\omega$	candela (cd)
Iluminancia: flujo luminoso sobre una determinada área	$E = d\phi_{lum} / dS$	lux (lumen/m ²)
Luminancia: flujo luminoso emitido en una dada dirección dividido por el producto del área proyectada de una fuente puntual perpendicular a la dirección y el ángulo sólido que contiene esa dirección	$L = d\phi_{lum} / d\omega dS \cos\alpha$	cd/ m ²

2. Magnitudes colorimétricas

Las cantidades fotométricas descritas hasta aquí no tienen en cuenta la composición espectral de la luz recibida por el ojo. Dos campos con igual luminancia pero con diferentes combinaciones de longitudes de onda se diferenciarán por su color. El color depende de la distribución espectral de la luz. Si prevalecen longitudes de onda largas del espectro visible, la luz se percibirá roja, si prevalecen las del medio el espectro la luz se percibirá amarilla/verde o si esta concentrado en las bajas longitudes de onda se percibirá un azul. Si se combinan todas las longitudes de onda del espectro visible, en aproximadamente cantidades iguales, el ojo percibe una luz color blanca, como la del sol.

La suma de tres luces de colores, roja, azul y verde, en proporciones apropiadas, da blanco, verde con rojo da amarillo, verde con azul el cian y finalmente rojo con azul el color magenta, es decir púrpura, un color no espectral. Dos colores que, sumados dan blanco se llaman colores complementarios. Así el azul y el amarillo, el rojo y el cian, y el verde con el magenta, son complementarios. En la Figura 7 se muestran curvas de distribución de intensidad para fuentes de distintos colores, a) azul, b) verde, c) rojo, luego suma de luces, d) el amarillo, e) el cian y en f) el púrpura, para mostrar finalmente el blanco como la suma de las tres luces en el diagrama g).

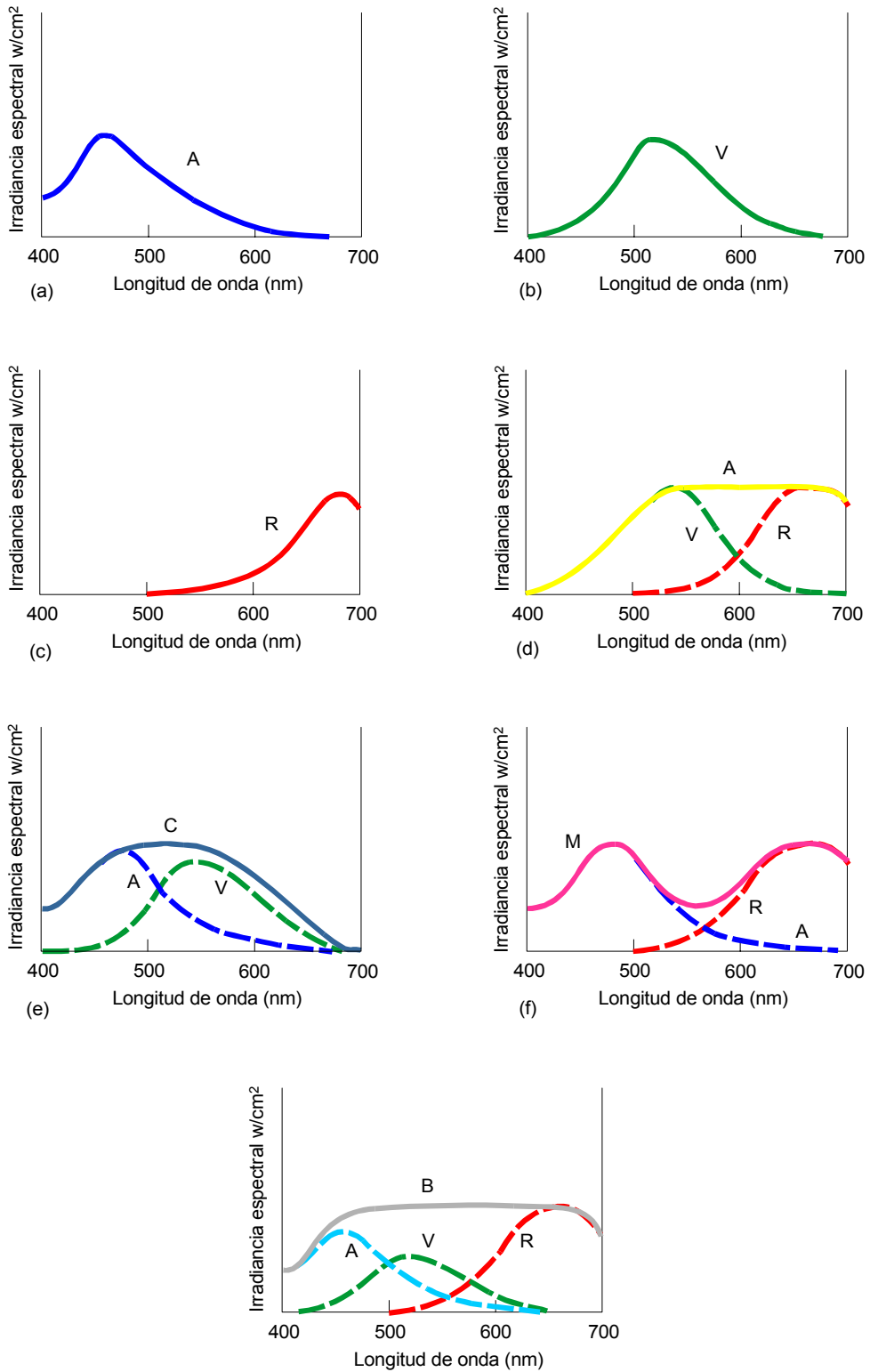


Figura 7.- Luces de colores. Curvas de distribución de intensidad de a) luz azul, b) luz verde, c) luz roja, d) mezcla aditiva de verde y rojo dando amarillo, e) mezcla aditiva de azul y verde, dando cian f) mezcla aditiva de rojo y azul, dando magenta g) mezcla aditiva azul, verde y rojo, obteniéndose el blanco.

La apariencia de un campo iluminado coloreado puede ser descrito por tres atributos perceptuales: **tono**, **saturación** y **claridad** . Las Figuras 8 ejemplifican estos conceptos

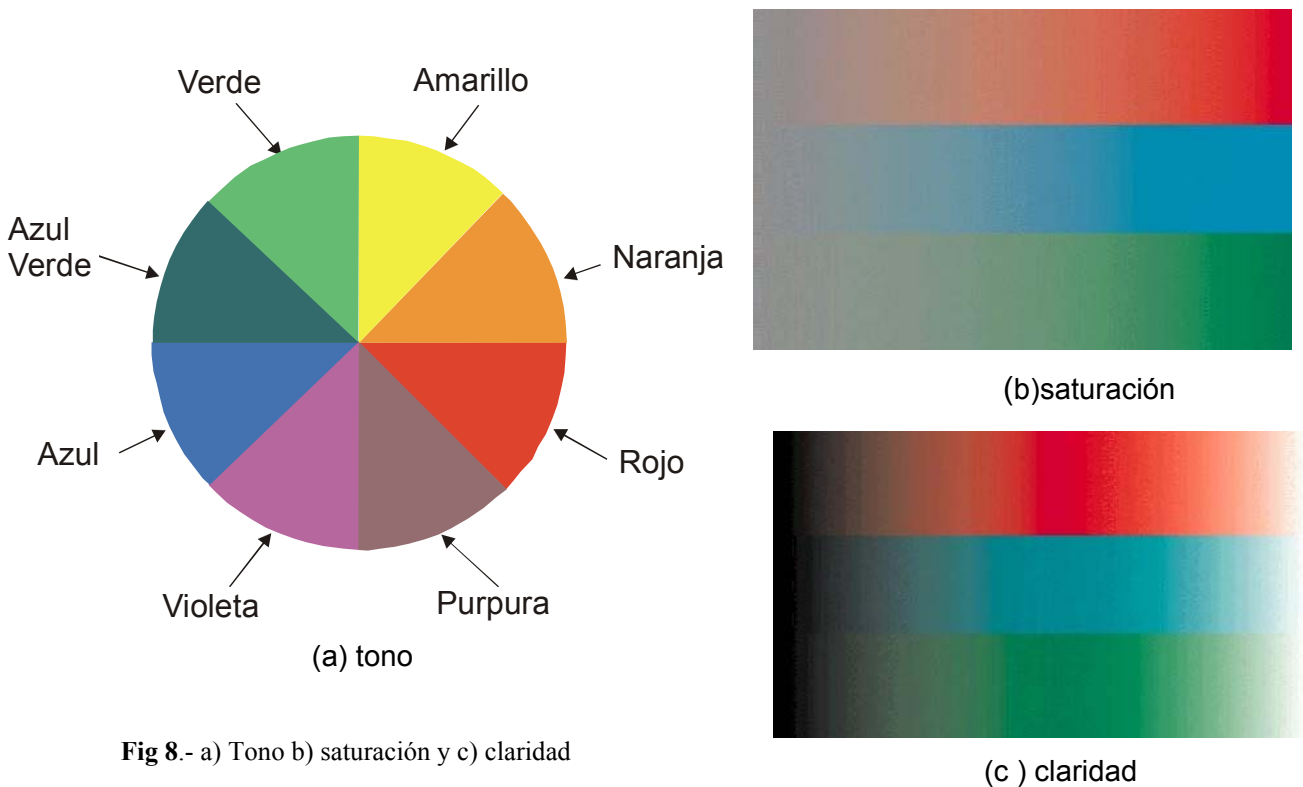


Fig 8.- a) Tono b) saturación y c) claridad

El color está definido, en buena medida, por la composición espectral de la radiación que llega al ojo. Decimos en buena medida pues, además, hay que tener en cuenta los procesos de adaptación del sistema visual que conducen a los fenómenos de contraste simultáneo y efectos posteriores.

Comparar diferentes distribuciones espectrales no es una tarea sencilla, dos colores iguales desde el punto de vista perceptual, es decir dos colores que el ojo no es capaz de diferenciar, pueden tener composiciones espectrales distintas. Dos colores que parecen iguales, pero cuyas composiciones de intensidad espectral son diferentes, se denominan **metámeros**. En la Figura 9 se muestran tres distribuciones de intensidad espectral que podrían percibirse como iguales a un amarillo. En (a) se trata de la distribución espectral de una fuente amarilla monocromática, en (b) la mezcla aditiva de dos fuentes monocromáticas, una verde y otra roja y en (c) la mezcla aditiva de dos fuentes roja y verde no monocromáticas.

El **tono** está asociado al color predominante, sea este espectral o no, es decir es el atributo asociado con el nombre de los colores básicos: rojo, amarillo, naranja, verde, azul o púrpura. En general, se describe el tono por la longitud de onda del color dominante, aunque como en las Figuras 9b y c no esté presente. En el caso de un color no espectral como el púrpura, que resulta de una suma de luces rojas y azules, que no se corresponde con una longitud de onda, el tono se describe como la longitud de onda de su color complementario.

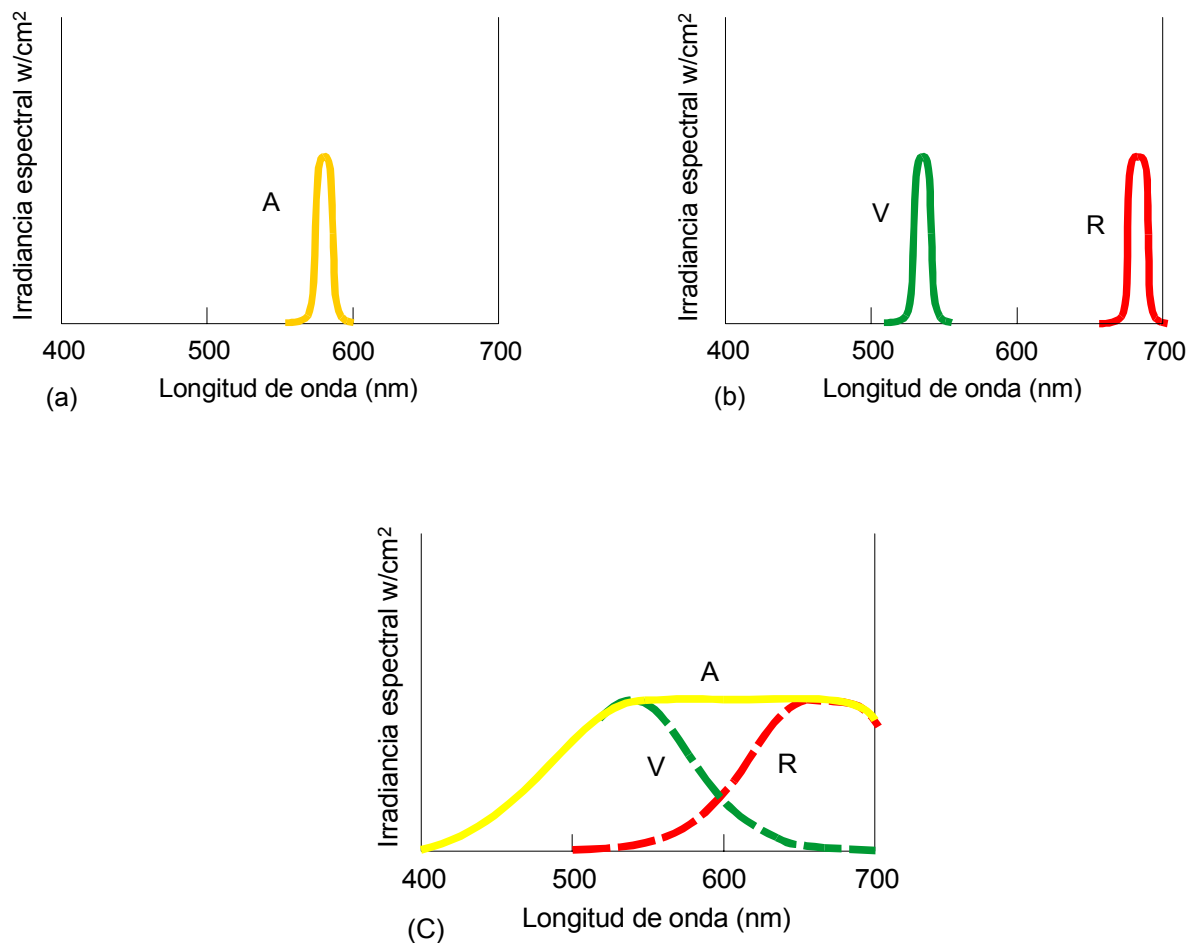
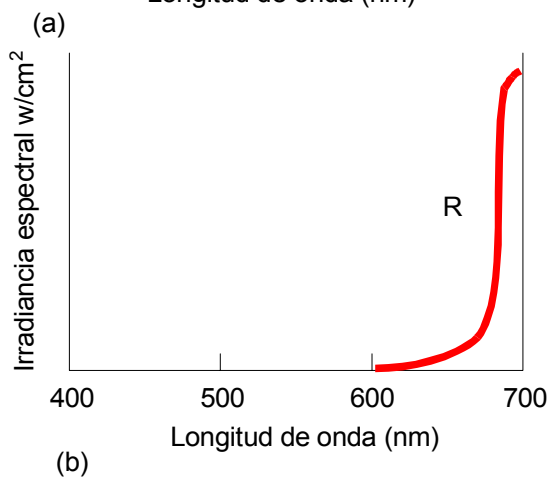
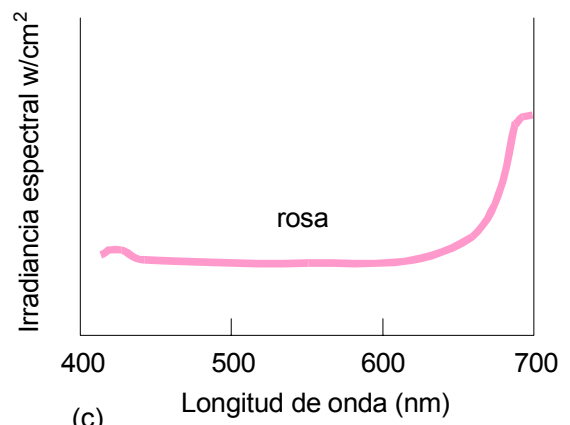
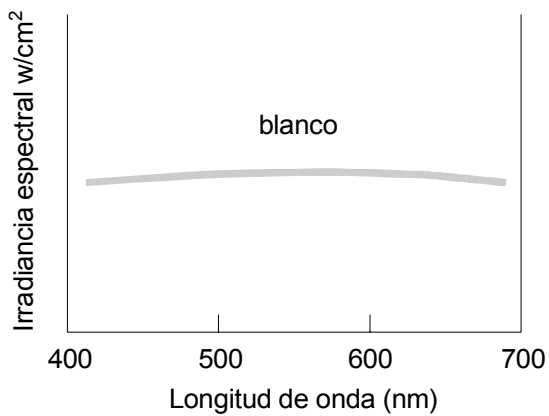


Figura 9.- Curvas de distribución de intensidad a) fuente amarilla monocromática, b) mezcla aditiva de dos fuentes monocromáticas, una verde y otra roja, c) mezcla aditiva de dos fuentes no monocromáticas, verde y roja.

La **saturación** corresponde a la pureza del color que determina el tono. Un color monocromático espectral tiene la mayor saturación, mientras la luz blanca, es una luz completamente no saturada, como se indica en la Figura 10a. En la Figura 10b se muestra una luz roja saturada, y en la Figura 10c se muestra una mezcla de esta luz roja con blanco obteniéndose un color rojo muy poco saturado, es decir un color rosa.

El tercer atributo del color, la **claridad** , se refiere a la cantidad de luz. Un mismo objeto puesto al sol o a la sombra solamente se diferencia por su claridad. Es una magnitud perceptual asociada al nivel de la intensidad que emite una fuente de luz (Figura 11a), o a la proporción de la luz incidente que es reflejada en el caso de objetos (Figura 11b). La claridad está asociada con la luminancia.



Figuras 10.- Saturación: a) luz blanca, completamente no saturada, b) luz roja saturada, c) luz roja menos saturada

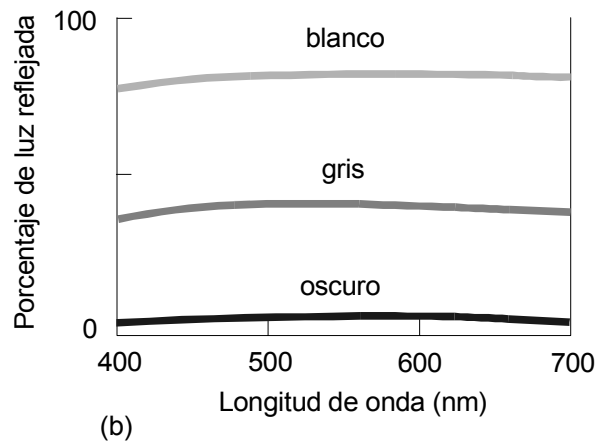
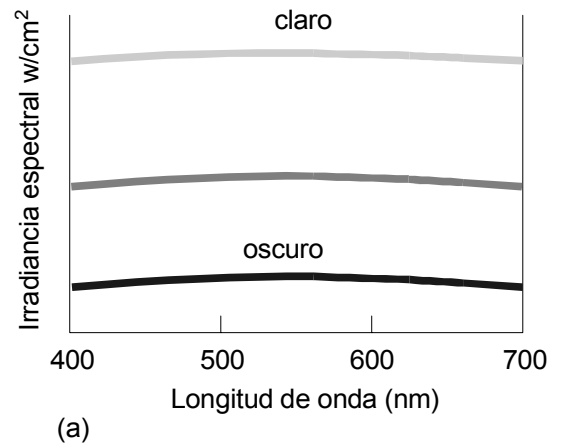


Figura 11.- a) Curvas de distribución de intensidad de una fuente para tres niveles distintos, b) curvas que representan el porcentaje de luz reflejada por tres superficies distintas, en función de la longitud de onda.

Existen dos maneras de representar el color de la luz: **el atlas de color y el sistema colorimétrico de la CIE**. La primera, el atlas de color, es una representación en las tres dimensiones del espacio de color, asociadas a los tres atributos perceptuales mencionados y su objetivo es clasificar los colores de manera que puedan ser evaluados y comunicados.

Si bien hay distintos atlas de color propuestos, posiblemente el más conocido es el Sistema de color Munsell (IES, 1993). En el mismo la posición de cualquier color se identifica con un código alfanumérico que tiene tres términos que indican el tono, un valor de claridad y un nivel de saturación. La escala de los tonos consiste de 100 divisiones en un círculo que contiene cinco tonos principales (rojo, amarillo, verde, azul y púrpura), cinco intermedios (rojo/amarillo, amarillo/verde, verde/azul, azul/púrpura, púrpura/rojo). La escala de claridad en el eje vertical va desde 1, que corresponde al negro, hasta el 10, que indica el blanco. Finalmente, la escala de saturación, que se indica radialmente, crece desde el centro con un valor de cero, saturación neutral, hasta alcanzar la saturación máxima, que se indica con el valor 20 (Figura 12).

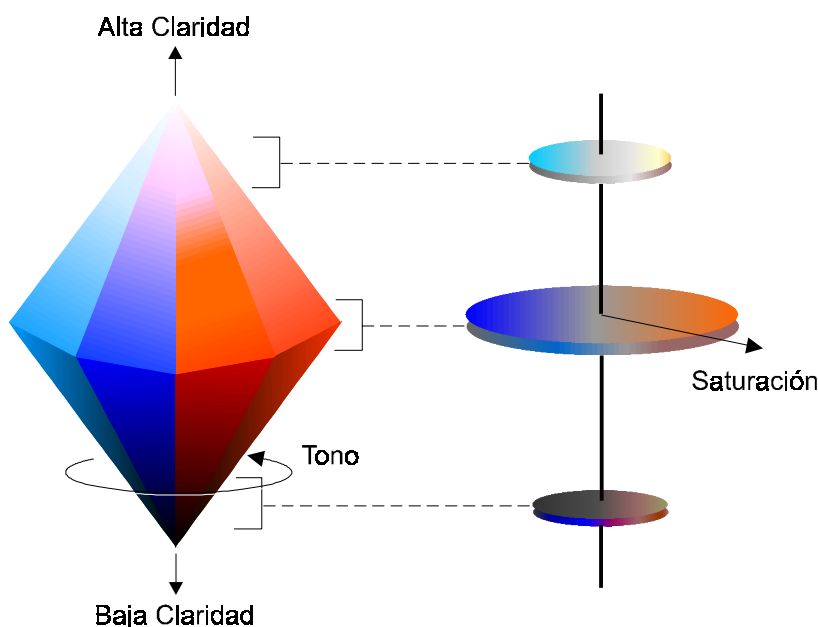


Figura 12.- Diagrama de representación del color en tres dimensiones.

Se podría pensar en tener un catálogo de colores derivado del sólido de color mencionado, y con tantas subdivisiones de sus escalas como sea necesario, entonces, si se quisiera especificar un color bastaría comparar la muestra con los del catálogo y asignarles las coordenadas de su igual. Esto es lo que se hace corrientemente en la industria cuando no se requiere gran exactitud. En general, para identificar pinturas, materiales de construcción, plásticos, cerámicos se usa un atlas del tipo descripto. Sin embargo, sería imposible hacer un catálogo con todos los colores diferentes que puede distinguir el observador humano normal,

pues subdividiendo las tres escalas del atlas en todos los escalones perceptibles, se calcula que el hombre puede distinguir hasta 10 millones de colores.

Por ello, cuando se quiere caracterizar el color de una luz o una superficie, de manera que se le pueda asignar una denominación inequívoca, y que esta denominación permita reproducirlo con toda exactitud, se recurre a las mediciones del color a partir del método de las mezclas, que conducen a los diagramas de cromaticidad. El sistema colorimétrico CIE, desde el más complejo al más simple (CIE, 1971, 1972, 1978a), se basa en que la mayoría de la gente tiene respuestas al color muy similares y que casi cualquier color puede ser igualado por una combinación de no más de tres longitudes de onda que descansan en las regiones del azul, el verde y el rojo. Si bien, el desarrollo completo de este sistema es complicado (Wyszecki y Stiles, 1982; IES 1993) haremos una presentación simplificada.

Dados tres colores monocromáticos: un rojo ($\lambda = 650\text{nm}$), un verde ($\lambda=530\text{nm}$) y un azul ($\lambda=460\text{nm}$), la Figura 13 da las cantidades relativas que se necesitan para igualar cualquier color monocromático. Nótese que en algunos puntos se necesitan cantidades negativas, lo que en realidad implica sumar estas cantidades al color que se busca. Por ejemplo, para obtener un amarillo con $\lambda=570\text{nm}$, debe agregársele una pequeña cantidad de azul (un valor negativo en el gráfico) y entonces, sumando un porcentaje de rojo y de verde, se obtendrá el color buscado. Estos porcentajes pueden extraerse de la figura, obteniéndose: 36% de rojo, 66% de verde y 2% negativo para el azul para igualar al particular amarillo seleccionado.

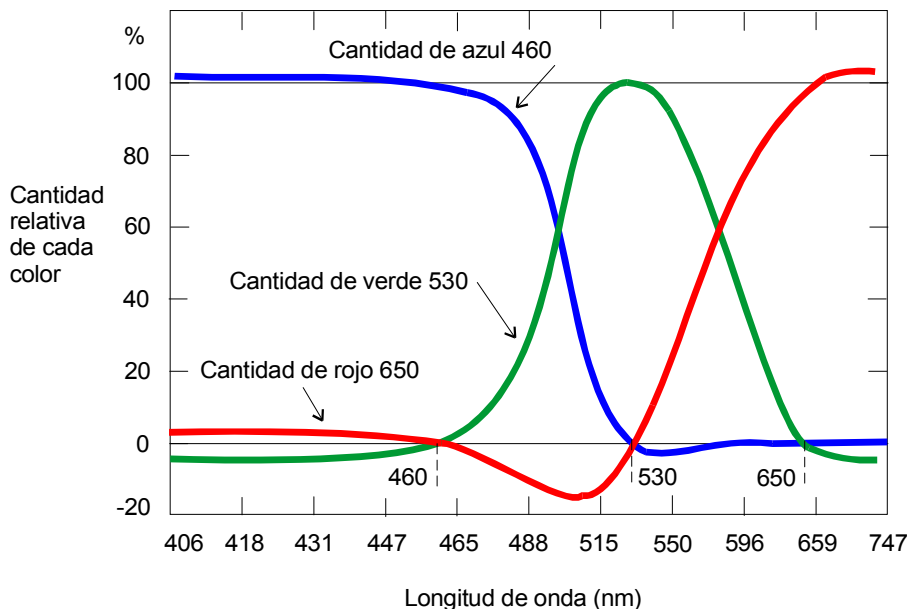


Figura 13.- Cantidades relativas de tres colores ($\lambda = 460\text{nm}$ azul, $\lambda = 530\text{nm}$ verde, $\lambda = 650\text{nm}$ rojo) necesarias para igualar cualquier color monocromático (espectral). Son curvas estandarizadas pues los datos reales varían según el observador y la intensidad de la luz.

En realidad, bastaría con conocer dos de estas curvas, pues la suma tiene que dar 100%. La Figura 14 muestra otra manera de graficar la cantidad relativa de un rojo de 650nm –representada en el eje horizontal– y un verde de 530nm –representada en el eje vertical– necesarias para igualar cualquier color. A su vez, de estos valores se puede calcular la

cantidad relativa del azul de 460nm. Los puntos sobre la herradura corresponden a la ubicación de los colores espectrales y eligiendo uno cualquiera, por ejemplo el mismo amarillo de $\lambda=570\text{nm}$, se tienen sus componentes: en el eje horizontal se encuentra el valor de 0.36 (36% del rojo) y en el eje vertical el valor de 0.66 (66% del verde), obteniéndose un valor negativo del 2% para el azul. Esta curva contiene toda la información de la Figura 13. Se elige esta representación, que puede parecer más complicada, pues en este nuevo diagrama las reglas aditivas del color son fácilmente expresadas: **“las mezclas aditivas de dos colores descansa sobre una línea recta que une los mismos”**. Las regiones dentro de la herradura corresponden a los colores no saturados. Además, la mezcla de rojo con azul, que da, como ya se mencionó, el color no espectral púrpura, corresponde a la parte transversal en la base inferior de la herradura.

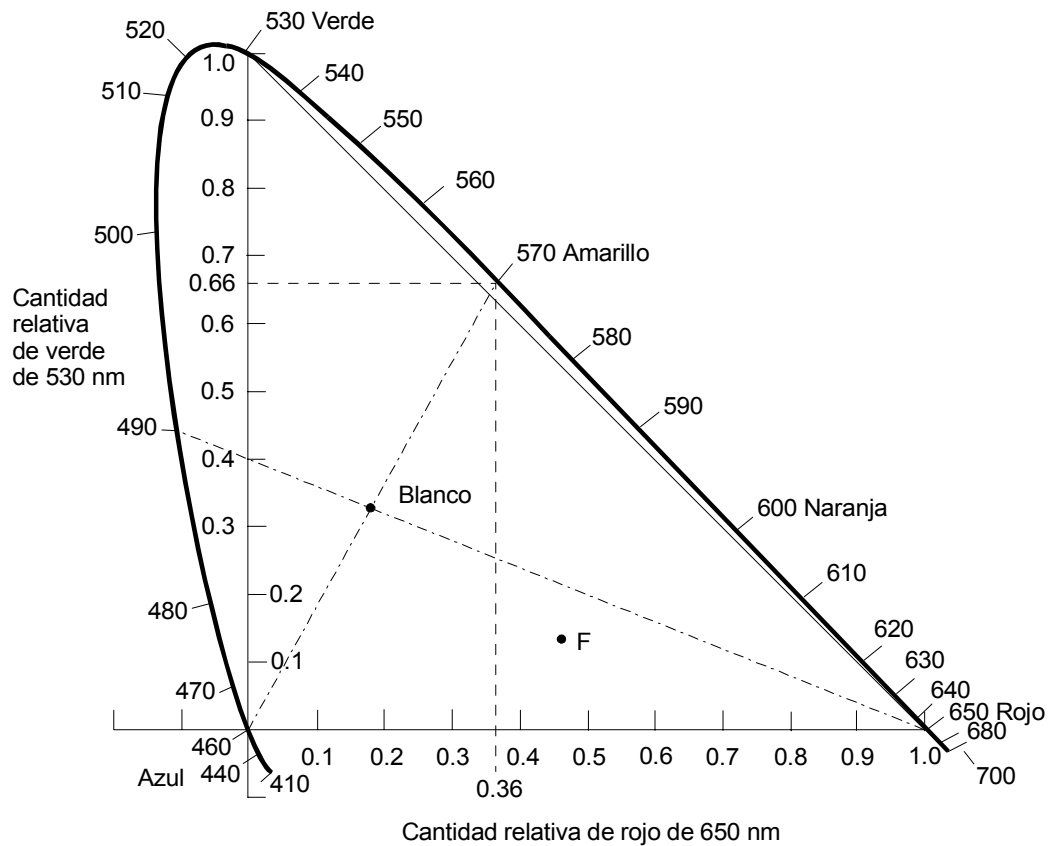


Figura 14.- Curva con forma de herradura de caballo que muestra la ubicación de los colores espectrales y no espectrales a ser igualados.

Supongamos que a partir de un amarillo de $\lambda = 570\text{nm}$ se va sumando un azul de $\lambda = 460\text{nm}$. El color resultante descansa en la línea recta que une estos dos puntos y depende de la proporción de cada uno. En algún lugar entre estos dos puntos descansa el punto correspondiente al blanco, ya que amarillo y azul son **complementarios**. Por lo tanto, una mezcla apropiadamente balanceada de los dos da el blanco, que de esta manera descansa en la zona central del diagrama.

Conociendo la ubicación del blanco, podemos encontrar el complementario de cualquier color con la siguiente regla: **“el complementario de cualquier color se encuentra en el lado opuesto de la herradura siguiendo la línea que pasa por el blanco”**. El punto blanco descansa aproximadamente donde los tres colores, el rojo, el verde y el azul, contribuyen igual, y, su exacta ubicación depende del blanco elegido. Para superar cualquier tipo de ambigüedad se elige un iluminante blanco estándar. Para ello se ha establecido un acuerdo internacional sobre los iluminantes patrones (CIE, 1972, 1978a). Por ejemplo, si se quiere conocer el tono de un color F en el diagrama, se dibuja una línea recta desde el blanco, a través del F, hacia la zona espectral de la herradura. La intersección de aquella línea con la herradura es la ubicación del color saturado correspondiente, **la longitud de onda dominante o tono**. Si el tono de F es púrpura, siguiendo la línea a través del blanco, cortará a la herradura en el verde, y dará la ubicación de la longitud de onda del complementario, el que define el tono del color púrpura.

Es interesante notar que cualquier color dentro del triángulo, inscripto en la herradura, se puede obtener, usando los tres colores, 650nm rojo, 530nm verde y 460nm azul, sin usar contribuciones negativas. En este sentido el rojo, el azul y el verde constituyen la mejor elección de un conjunto de tres colores para obtener físicamente la mayor cantidad de colores pues dan el triángulo más grande que se puede obtener dentro de la herradura, de manera de tener la mayor variedad de colores sin contribuciones negativas. Esta es la explicación de por qué los colores rojo, azul y verde se llaman los **colores primarios aditivos**. Esta es la razón también por la que se eligen estos colores para los fósforos de la TV, ya que trabaja por mezcla aditiva de colores, tan saturados como los fósforos lo permiten. Por supuesto, aún usando los colores primarios, no se pueden igualar todos los colores espectrales. Sin embargo, para la mayoría de los propósitos esto no es importante, porque la mayoría de los colores de la naturaleza son no saturados.

A partir de estas ideas la CIE (1971) ha desarrollado el sistema colorimétrico CIE basado en tres “colores” imaginarios, posibles matemáticamente aunque no físicamente, llamados “valores triestímulos”, en lugar del rojo, el azul y el verde. Con ellos se puede obtener el diagrama de la Figura 15, correspondiente al mostrado en la Figura 13 usando los tres colores primarios. La característica fundamental de este nuevo sistema es que permite igualar cualquier color con combinaciones positivas de estos tres nuevos primarios \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} , sin tener que recurrir a porcentajes negativos.

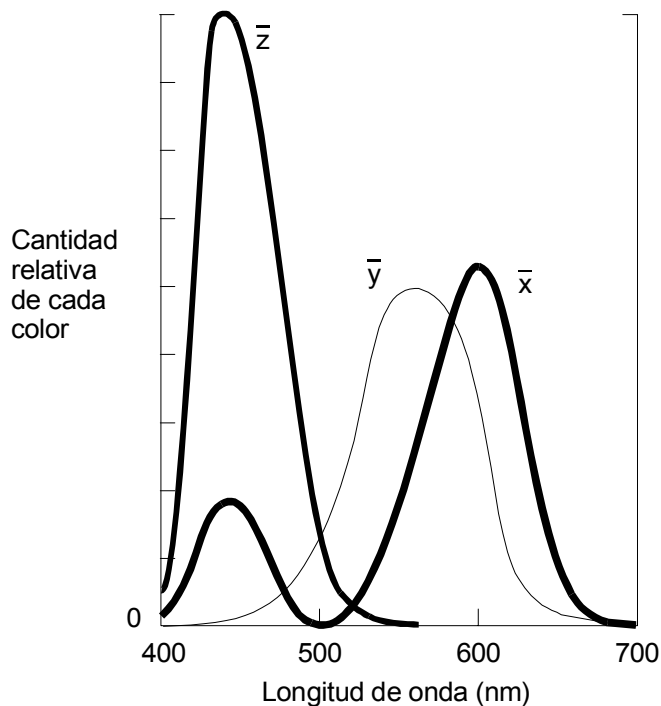


Fig 15.- Valores triestímulo para igualar un dado color espectral.

Con estos tres colores imaginarios se obtiene el diagrama de cromaticidad de la CIE, que se muestra en las Figuras 16 y 17, en cuyos ejes horizontal y vertical se representan las cantidades relativas x e y , de dos de los primarios, necesarios para igualar cualquier color. Este par de valores (x,y) es llamado “cromaticidad del color” y a partir de ellos se puede calcular la cantidad relativa, z , del tercer primario. Dejando de lado estos detalles, el diagrama presentado en las Figuras 16 y 17 tiene las mismas propiedades que el de la Figura 14:

1. el blanco se encuentra en la vecindad del punto equienergético, dependiendo su ubicación exacta del estándar elegido,
2. las mezclas de colores se encuentran en la línea recta que une los dos colores de interés,
3. los colores complementarios se encuentran extendiendo una línea desde el color en cuestión hacia el lado opuesto de la herradura espectral pasando a través del blanco,
4. los colores saturados están sobre el perímetro de la herradura
5. los colores no saturados están en la zona interior de la herradura
6. los colores púrpuras saturados están en la línea que cierra en la base a la herradura

Este diagrama, además, brinda reglas precisas de mezcla de colores, a través de los índices x e y . Queda por especificar la claridad del color. Un diagrama de cromaticidad está dibujado para un dado valor de claridad, y la identificación de puntos con colores específicos dependerá de la claridad del diagrama particular.

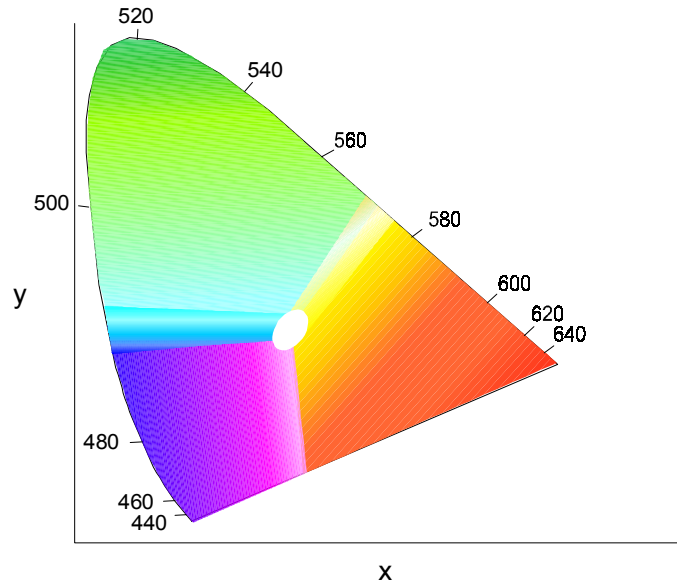


Fig 16.- Diagrama de cromaticidad de la CIE.

Además, la CIE, con el propósito de proveer una caracterización precisa del color, ha desarrollado dos espacios del color de tres dimensiones (CIE, 1978a) basados en relaciones matemáticas aplicadas a las distribuciones espectrales, que se simbolizan por L_{ab} y L_{uv} , que permiten cuantificar el color. El primero se usa para cuantificar el color de objetos y el segundo para fuentes luminosas u objetos autoluminosos. Si dos colores tienen las mismas coordenadas en uno de estos espacios de color ellos se percibirán iguales. La distancia entre dos colores en este espacio está relacionada con la facilidad con que estos dos colores pueden ser diferenciados.

La apariencia de color de las fuentes luminosas se describe convencionalmente por su temperatura de color correlacionada, es decir, la temperatura de color de un cuerpo negro (radiador caliente) cuyas coordenadas están más cerca en el diagrama de cromaticidad de la CIE 1931 (Wyszecki y Stiles, 1982). En la Figura 17 se muestra la ubicación de los colores de fuentes incandescentes para distintas temperaturas y se muestran las ubicaciones de tres fuentes estándares blancos: A: incandescente de tungsteno (2.854°K), B: luz del sol al mediodía (4.870°K) y C: filamento de tungsteno filtrado a “luz día” (6.770°K). Esta es una manera conveniente de estandarizar las fuentes de luz. En general aquellas fuentes con temperaturas de color altas, mayores de 5000°K se consideran con bajo rendimiento de color y se consideran fuentes “frías”, como las lámparas fluorescentes luz día. En cambio aquellas fuentes con temperaturas de color menores de 3000°K son fuentes “cálidas” como las lámparas incandescentes, con mayor presencia de longitudes de onda más largas, los rojos y los naranjas. Por ejemplo, en un estudio de TV las cámaras se balancean para una temperatura del flujo luminoso de 3.200°K, si uno quisiera oscurecer la iluminación del estudio, no puede hacerlo simplemente “enfriándola” pues cambiaría el balance de color haciéndose más rojiza. Aunque estas variaciones podrían no ser evidentes para los actores, pues sus ojos se adaptan, sí lo serían para los usuarios de TV en sus casas que compararían este color con el de la iluminación de sus casas. Consecuentemente las luces en un estudio de filmación de TV se controlan usando diafragmas neutros delante de las fuentes de luz. Para filmaciones en exteriores las cámaras de color deben balancearse en forma diferente.

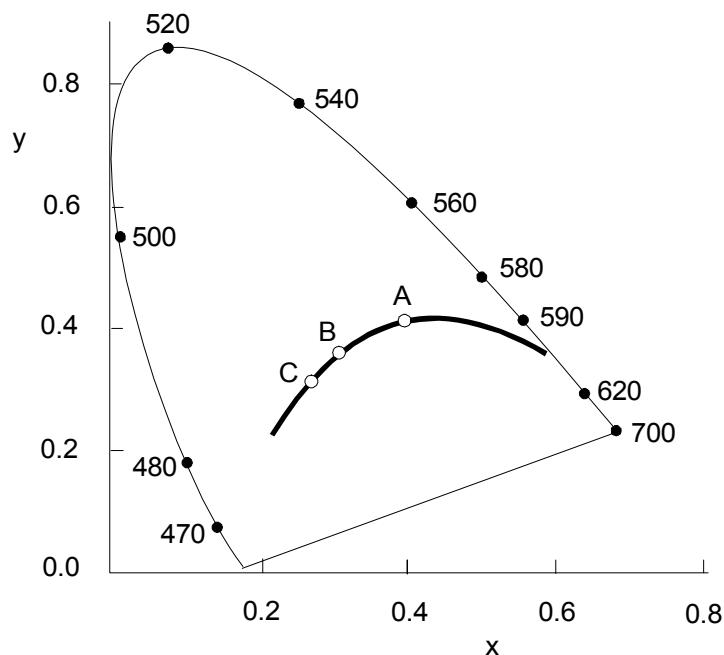


Figura 17.- Ubicación de diferentes fuentes luminosas en el espacio de color: A) incandescente de tungsteno B) luz del sol a mediodía C) filamento de tungsteno filtrado para simular luz diurna

El efecto de la luz sobre la apariencia del objeto se indica mediante un “Índice General de Rendimiento de Color CIE”, el cual es un número simple que indica, para una fuente de luz, con qué precisión reproduce los colores con relación a una fuente estándar (CIE, 1974). Específicamente, se calculan las posiciones en un espacio de color de 8 colores de prueba, bajo una fuente de luz de referencia y bajo la fuente de luz de interés. Luego se calcula la separación entre las dos posiciones correspondientes al mismo color de prueba, se suman las separaciones para los ocho colores de prueba y se escalan para dar un valor de 100 cuando no hay separación para ninguno de los colores de prueba, lo que indica un índice de reproducción de color perfecto. Este es un sistema muy rudimentario y, es sabido que, dos fuentes de luz que tengan un mismo índice general de rendimiento de color pueden reproducir en forma distinta dos colores, sin embargo, este índice es muy usado para clasificar el rendimiento de fuentes de luz, en relación con la reproducción del color.

3. Instrumentos de medición

Los instrumentos para medir cantidades fotométricas o colorimétricas se dividen en instrumentos de laboratorio y de campo (CIBSE, 1994; IESNA, 1993). Los primeros son mas sofisticados y por tanto más caros, mientras los segundos son pequeños y manuales. El flujo luminoso y las propiedades de color de una fuente de luz, así como la distribución de intensidad luminosa de una luminaria, se miden generalmente en un laboratorio ya que implican la disponibilidad de equipamiento sofisticado y del desarrollo de metodologías complejas. De todos modos, las cantidades que en general se necesitan medir en trabajos de

campo son la *iluminancia* y la *luminancia*, las cuales se miden con el *luxímetro* y el *luminancímetro*.

Un medidor de iluminancia (luxímetro) tiene tres características importantes: sensibilidad, corrección de color y corrección coseno. La sensibilidad se refiere al rango de iluminancia que cubre, dependiendo si será usado para medir luz natural, iluminación interior o exterior nocturna. Corrección de color se refiere a que el instrumento tiene un filtro de corrección $V(\lambda)$, para que el instrumento tenga una sensibilidad espectral igual a la del Observador Standard Fotópico de la CIE. La corrección coseno significa que la respuesta del medidor de iluminancia a la luz que incide sobre él desde direcciones diferentes a la normal sigue la ley de coseno.

El luminancímetro está diseñado para medir la luminancia media sobre un área especificada. Posee un sistema óptico que enfoca la imagen sobre un detector. Mirando a través del sistema óptico el operador puede identificar el área sobre la que está midiendo la luminancia, y usualmente muestra la luminancia promedio sobre esta área. Las características más importantes de los luminancímetros son su respuesta espectral, su sensibilidad y la calidad de su sistema óptico. Al igual que un luxímetro, un buen luminancímetro tiene una respuesta espectral acorde con la curva de sensibilidad espectral del observador standard de la CIE. La sensibilidad exigida al instrumento depende de las condiciones bajo las cuales se usará el mismo. La calidad de su sistema óptico puede ser medido por su sensibilidad a la luz del área exterior al área de medición (CIE, 1987).

Recientemente han comenzado a aparecer luminancímetros basados en cámaras de video que capturan la imagen en forma digitalizada (Rea y Jeffrey, 1990). Si bien estos instrumentos todavía son caros proveen una manera de medir luminancias de escenas que cambian espacialmente y en el tiempo.

4. Características funcionales del sistema visual humano

La iluminación es importante para el hombre, no solamente porque altera el estímulo que llega al sistema visual, sino porque, al mismo tiempo, modifica el estado de operación del sistema visual. Por lo tanto, para comprender los efectos de la iluminación, es necesario conocer cuáles son las capacidades del sistema visual y cómo varían con la iluminación.

El sistema visual está compuesto del ojo y del cerebro operando en forma conjunta. La luz que llega al ojo es enfocada sobre la retina por el efecto combinado de la córnea y el cristalino del ojo (Figura 18). La retina, considerada por algunos autores como una extensión del cerebro, consiste de dos tipos diferentes de fotorreceptores y numerosas interconexiones nerviosas. En los fotorreceptores, los fotones de luz incidentes son absorbidos y convertidos en señales eléctricas. La imagen, luego de una primera etapa de procesamiento básico realizado por las interconexiones nerviosas, es transmitida a través del nervio óptico de cada ojo al quiasma óptico, donde las fibras nerviosas provenientes desde los dos ojos son combinadas y transmitidas a las partes izquierda y derecha a la corteza visual. En la corteza visual, estas señales son interpretadas en términos de la experiencia pasada.

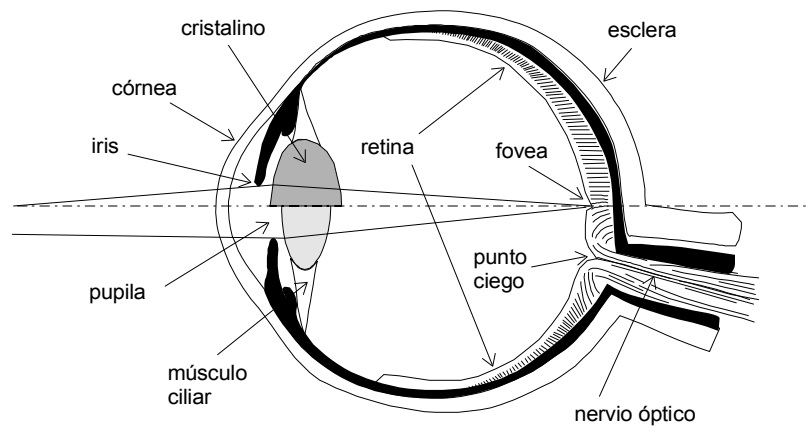


Figura 18.- Sección del ojo donde se muestran sus distintos componentes y el cristalino modificado para visión cercana y distante

Muchas capacidades del sistema visual pueden ser comprendidas conociendo la organización de la retina. Los dos tipos de fotorreceptores, llamados bastones y conos por su apariencia anatómica, tienen diferentes sensibilidades a la longitud de onda, diferentes sensibilidades absolutas a la luz y poseen diferente distribución en la retina.

Los bastones tienen mayor sensibilidad absoluta a la luz y en consecuencia son los responsables de la visión nocturna. Los conos, menos sensibles a la luz, se clasifican, según su sensibilidad espectral a diferente longitud de onda, en tres tipos diferentes identificados por "rojos", "verdes" y "azules", según estén asociados a longitudes de onda "largas", "medias" o "cortas". Estos tres tipos de conos son los responsables de la percepción del color.

Los conos están concentrados fundamentalmente en una pequeña área central de la retina llamada fovea, por donde pasa el eje visual del ojo, y subtiende un diámetro de aproximadamente 5° . Los bastones, ausentes de la fovea, alcanzan su concentración máxima alrededor de los 20° desde la fovea. Esta variación en concentración de los conos y los bastones con respecto a la fovea parece aún mayor por la cantidad de receptores conectados a cada fibra óptica nerviosa. En la fovea, la relación de fotorreceptores a las fibras ópticas nerviosas es próxima a uno pero aumenta rápidamente a medida que nos alejamos de la fovea. Esta estructura es responsable de las diferentes funciones de la fovea y la periferia. La fovea es la parte de la retina que provee una fina discriminación de detalles, mientras el resto de la retina está destinado primariamente a detectar cambios en el medio visual hacia los cuales se requerirá luego la atención de la fovea, para un examen detallado. Para que un estímulo fuera del eje visual atraiga la visión foveal tiene que diferenciarse del fondo, en luminancia o en color, o cambiar sus características, en espacio o tiempo, es decir, tendría que estar moviéndose o parpadeando.

Como ya dijimos, los conos y los bastones tienen diferentes sensibilidades espectrales absolutas. El pico de sensibilidad de los conos se encuentra a unos 555nm, mientras que el de

los bastones está desplazado hacia valores menores de longitudes de onda, se obtiene a los 507nm. Estas sensibilidades espectrales constituyen las bases de los observadores estándares de la CIE y de aquí, las magnitudes fotométricas discutidas anteriormente en la sección de magnitudes fotométricas.

Ajustando la emisión espectral de una fuente luminosa para que caiga en la zona más sensible de la respuesta espectral del sistema visual, los fabricantes de lámparas pueden variar la eficacia luminosa de sus fuentes luminosas, es decir, modificar la cantidad de lúmenes emitidos por cada watt de potencia energética utilizado.

El sistema visual puede operar sobre un rango de alrededor de 12 unidades logarítmicas, desde una luminancia de 10^{-6} cd/m² hasta unos 10^6 cd/m², es decir desde la luz tenue de una estrella hasta la luminancia medida sobre un papel blanco iluminado por la luz del sol. En la tabla 2 se muestran los órdenes de magnitud de iluminancias y luminancias en casos de importancia en la práctica, es decir en situaciones comunes de la vida diaria. Valores mayores, como los que surgen de la visión directa de la luz del sol, deben evitarse siempre, pues son dañinas a la retina.

Tabla 2.- Valores de iluminancia y luminancia en condiciones específicas

Situación	Iluminancia sobre una superficie horizontal [lux]	Superficie sobre la que se mide la luminancia	Luminancia [cd/m²]
Luz solar	100.000	Papel blanco	$10^5 - 10^6$
Cielo cubierto	10.000	Césped	3000
Puesto de trabajo con pantalla de video	500	Pantalla con fondo gris	10 a 50
Puesto de trabajo en oficina	500	Papel blanco	100
Zona de circulación	100	Superficie de cemento	10
Alumbrado de calles	10	Superficie de asfalto	1
Noche con luna	1	Papel blanco	0.01

Sin embargo, este amplísimo rango en el cual el sistema visual es capaz de adaptarse, no se cubre simultáneamente, pues en cada momento, el sistema visual solamente puede cubrir un rango de 2 o 3 unidades logarítmicas de luminancia. Los valores de luminancias que están por encima de este limitado rango son vistos como deslumbrantes y aquellos valores que estén por debajo quedan simplemente oscuros sin ser diferenciados. Las capacidades del sistema visual dependen de la luminancia de adaptación. Por convención se identifican tres rangos funcionales diferentes: el fotópico, el mesópico y el escotópico. La tabla 3 sintetiza las capacidades del sistema visual en cada uno de estos rangos funcionales.

Tabla 3.- Rangos funcionales de las capacidades del sistema visual humano

Nombre	Rango [cd/m^2]	Capacidades	Fotoreceptor activo
Fotópico	> 3	Visión de color Buena discriminación de detalles	Conos
Mesópico	$>0,001$ y < 3	Visión de color disminuida Reducida discriminación de detalles Corrimiento en la sensibilidad espectral	Conos y bastones
Escotópico	$< 0,001$	Sin visión de color Muy pobre discriminación de detalles	Bastones

La iluminación interior es casi siempre suficiente para que el sistema visual pueda operar en condiciones fotópicas, incluso, la iluminación exterior, en calles y en áreas urbanas, es usualmente suficiente para mantener el sistema visual operando en condiciones fotópicas. La velocidad de adaptación es importante cuando ocurre un cambio en la luminancia. Ejemplos de situaciones en las que esto ocurre son la entrada a los túneles durante el día, el encendido de la luz de emergencia cuando se corta la luz, el deslumbramiento que sufre un conductor en una ruta de noche, los cambios de adaptación en un puesto de trabajo, etc. Estos problemas son superados o mitigados, con distintas estrategias, favoreciendo que los cambios en luminancia sean graduales, permitiendo mayores tiempo de adaptación, modificando los rangos de variación, etc.

Cuando el sistema visual está adaptado fotópicamente puede discriminar muchos miles de colores. Debido a que la visión de color está mediada por los fotoreceptores conos, la habilidad para discriminar colores se reduce cuando la luminancia de adaptación disminuye hacia la región mesópica y se desvanece en la visión escotópica.

Como ya se dijo, las distintas fuentes de luz emiten con composiciones espectrales diferentes y, por lo tanto, tienen un rendimiento de color diferentes. Para asegurar una buena discriminación de color es necesario usar una fuente de luz que tenga, no solamente, un Índice de Rendimiento de Color General CIE alto, sino, que además produzca luz suficiente para asegurar que el sistema visual opere en la región fotópica. Sin embargo, es importante notar que dos fuentes de luz pueden tener el mismo Índice de Rendimiento de Color CIE y no reproducir los colores de la misma manera. Por ejemplo, una lámpara incandescente y una fluorescente, ambas con el mismo índice, por ejemplo del orden de 90, hacen que los colores azul y verde parezcan diferentes. Por lo tanto, para asegurar una buena apariencia de color tanto como buena discriminación de color, se necesita no solamente un Índice de Rendimiento de Color alto sino también una fuente de luz intensa.

5. Efectos de las condiciones de iluminación sobre las capacidades del sistema visual

5.1. El estímulo visual y sus características

Para describir las capacidades del sistema visual se necesitan diferentes tipos de datos, y cada uno de ellos relacionados a diferentes aspectos de lo que el sistema visual puede hacer, lo que es expresado en términos de cantidades cuantificables en el mundo físico, y por lo tanto asociadas con tareas reales.

Los descriptores del sistema visual humano son afectados no solamente por la iluminación sino también por otros aspectos relacionados a las condiciones visuales, por ejemplo la parte del campo visual sobre el cual el estímulo es visto, el tiempo de presentación del estímulo, las características del estímulo usado, su nitidez, su composición espectral y el fondo sobre el cual es visto, si es estacionario o se está moviendo, etc.

Cualquier estímulo puede ser descrito básicamente por cinco parámetros: tamaño visual, contraste en luminancia, contraste cromático, calidad de la imagen retiniana e iluminación retiniana. Estos parámetros son importantes para determinar el grado por el cual el sistema visual puede detectar o identificar un estímulo.

El **tamaño visual** de un estímulo se especifica en términos angulares. Si el objetivo de la tarea es de detección, el tamaño visual corresponde al ángulo sólido que el estímulo subtende en el ojo (el ángulo sólido está dado por el cociente del área del objeto y el cuadrado de la distancia desde la cual es visto). Cuánto más grande es el ángulo sólido, más fácil es detectar el estímulo. El tamaño visual para una tarea de resolución se especifica por el ángulo subtendido por el ojo correspondiente a la dimensión crítica del estímulo. Cuanto más grande es el tamaño visual del detalle en un estímulo, más fácil es resolver la tarea. Para estímulos complejos la medida usada está basada en el ángulo que subtende un detalle crítico y está medido en términos de las veces que esta dimensión se repite en un ángulo de 1° y se expresa en unidades de ciclos por grados (frecuencia espacial). La iluminación puede aumentar o disminuir el tamaño de un estímulo tridimensional a partir de la formación de sombras, de manera de aumentar o disminuir el tamaño visual del estímulo.

El **contraste de luminancia** de un estímulo (CIE, 1992) es una medida de su luminancia relativa al fondo sobre el cual es visto. Cuánto más grande es el contraste de luminancia, más fácil es detectar el estímulo. Hay, en términos generales, dos formas diferentes de definir el contraste de luminancia. Para estímulos que son vistos sobre un fondo uniforme, el contraste de luminancia se define por convención como:

$$C = (L_o - L_f) / L_f \quad (8)$$

donde C representa el contraste de luminancia, L_f la luminancia del fondo y L_o la luminancia del detalle. Esta ecuación es ampliamente usada para estímulos que tienen detalles más oscuros que el fondo, como por ejemplo para textos impresos, y se obtienen valores de contrastes entre 0 y 1. Cuando los detalles son más claros que el fondo esta definición de contraste da valores desde 0 hasta infinito. Para estímulos que tienen patrones periódicos de luminancias, por ejemplo redes, el contraste de luminancia o modulación, en general se define por:

$$C = (L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max} + L_{\min}) \quad (9)$$

Donde L_{\max} es la luminancia máxima y L_{\min} es la luminancia mínima. Esta fórmula da valores de contrastes de luminancia que varían desde 0 a 1. La iluminación puede cambiar el contraste de luminancia de un estímulo si produce deslumbramiento fisiológico en el ojo, o reflexiones de velo sobre el estímulo, o modificando la radiación espectral incidente cuando están involucrados estímulos de colores.

Un estímulo con contraste de luminancia cero o muy bajo, puede ser detectado si difiere en color del fondo, es decir, si tiene **contraste cromático**. La iluminación puede acentuar, o disminuir, el contraste cromático de un estímulo, según la composición espectral de la emisión de la fuente de luz utilizada.

Como todos los sistemas que procesan imágenes, el sistema visual trabaja mejor cuando la imagen es clara y nítida. La nitidez del estímulo puede ser cuantificado por la distribución de frecuencia espacial del estímulo - una imagen nítida presenta componentes de frecuencias espaciales altas, mientras que una imagen borrosa las ha perdido. La nitidez de la imagen retiniana está determinada por el estímulo mismo, por tres factores: las características del estímulo, la dispersión de la luz en el medio que la trasmite y por la habilidad del sistema visual para enfocar la imagen sobre la retina. La iluminación puede afectar muy poco cualquiera de estos factores, aunque se ha mostrado que las fuentes de luz que son ricas en longitudes de onda cortas producen tamaños de pupilas más pequeñas y, en este sentido, se tiende a mejorar la visión de detalles para objetos de bajos contrastes. La explicación que se sugiere es que con pupilas de menor tamaños se obtiene mayor profundidad de campo y por lo tanto mejor **calidad de la imagen retiniana** (Berman *et al.*, 1993).

La **iluminación retiniana** determina el estado de adaptación del sistema visual y por lo tanto altera sus capacidades. La iluminación retiniana está determinada por el producto de la luminancia en el campo visual y el tamaño de la pupila. La iluminación retiniana se mide en *trolands*, unidad definida cuando una superficie cuya luminancia es de 1 cd/m^2 es vista a través de una pupila del ojo de área igual a 1 mm^2 (Wyszecki y Stiles, 1982). La luminancia del campo visual está determinada por los valores de iluminancias y por las reflectancias de las superficies del medio. El tamaño de la pupila está determinado por el valor de luminancia y por el contenido espectral de la luz que llega al ojo.

Variando el estímulo físico es posible explorar la relación particular entre estímulo y respuesta del sistema visual, desde condiciones de operación en que la tarea no es visible hasta condiciones en las que el estímulo siempre se ve. Esta relación se expresa en forma simple a través del valor umbral. Cualitativamente el valor umbral de contraste, tamaño o velocidad, por ejemplo, es aquel valor de la variable de interés para la cual la tarea apenas puede realizarse, o se realiza con dificultad. Cuantitativamente, y como resultado de una conversión, es el valor de la variable para la cual el rendimiento de la tarea a realizar, detección de un estímulo o discriminación de una dirección de movimiento, por ejemplo, corresponde a un valor de 0.5, lo que quiere decir que la tarea puede ser realizada correctamente el 50% de las veces que es presentada.

5.2. Agudeza visual

Se define la *agudeza visual* como habilidad del sistema visual humano para resolver detalles. Se define como el ángulo subtendido en el ojo por el tamaño del detalle que puede detectarse, discriminarse o reconocerse, de acuerdo a la exigencia de la tarea, en el 50% de las ocasiones en que es presentado. Indistintamente se utiliza para la definición el recíproco del ángulo.

La Figura 19 muestra la agudeza visual en términos de la luminancia de adaptación para

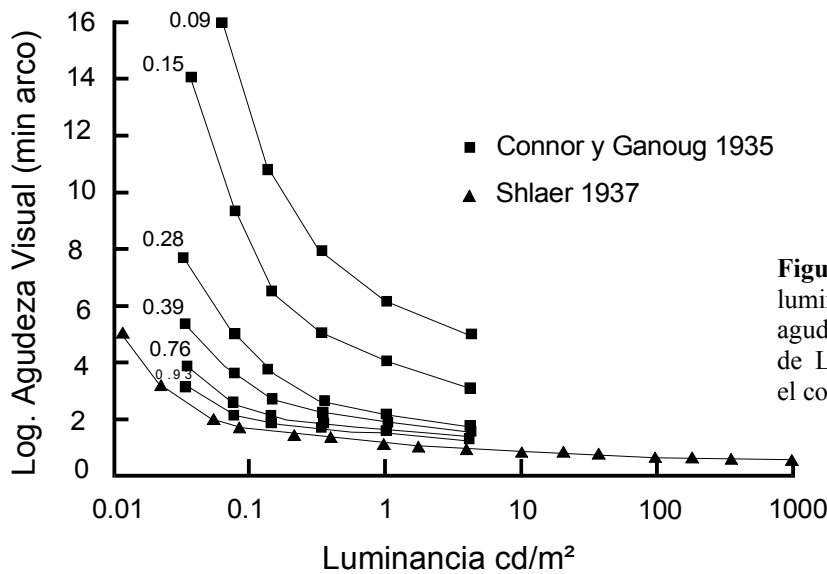


Figura 19.- Los efectos de la luminancia de adaptación sobre la agudeza visual en pruebas con anillos de Landolt tomando como parámetro el contraste (CIE, 1989)

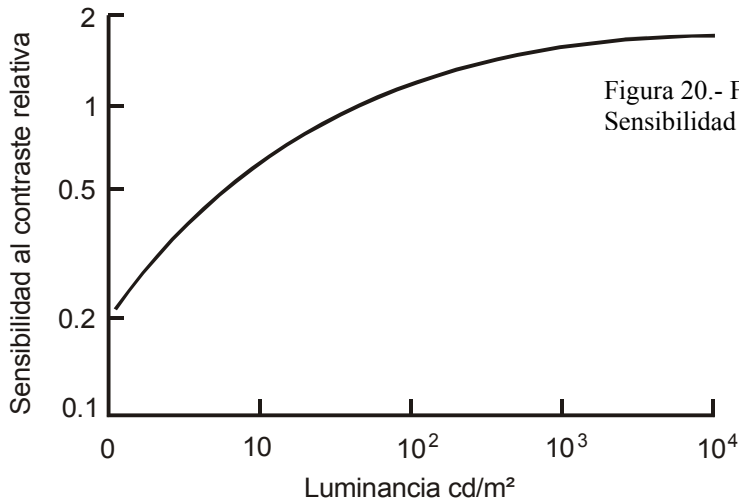
diferentes contrastes. Se observa que a medida que la luminancia de adaptación aumenta, desde condiciones escotópicas a fotópicas, la agudeza visual mejora, es decir el sistema visual es capaz de detectar, discriminar o reconocer tamaños de detalles cada vez más pequeños. Asimismo se observa que la agudeza visual tiende a un valor asintótico para altas luminancias, y que el cambio de agudeza visual en el rango de luminancias considerado es menos marcado para contrastes altos. A partir de un valor de luminancia típicamente encontrado en instalaciones de iluminación en interiores o exteriores, la Figura 19 puede usarse para determinar si un detalle de un determinado tamaño puede resolverse.

La agudeza visual depende, además de la luminancia de adaptación y del contraste, de la excentricidad, del tiempo de presentación, del movimiento del estímulo y de la edad del observador. Sin embargo, es poco dependiente de la composición espectral de la fuente, a menos que el rango de emisión de la misma sea muy angosto. La agudeza visual se mide convencionalmente usando estímulos con un contraste de luminancia alta, pero, como ya se mencionó, cuando el contraste de luminancia del objeto disminuye, la agudeza visual también empeora.

Una regla práctica y útil para el diseño de iluminación es que los detalles necesitan ser cuatro veces más grandes que el límite de agudeza visual para ser resuelto en forma rápida sin afectar la respuesta visual (Bailey, Clear y Berman, 1993).

5.3. Contraste Umbral y Función Sensibilidad al Contraste

El *contraste umbral* se refiere a la habilidad del sistema visual para detectar, discriminar o reconocer diferencias de luminancias entre el estímulo y el fondo contra el cual es presentado. Se define como el valor de contraste de luminancias para el cual un estímulo puede detectarse, discriminarse o reconocerse en el 50% de las veces en que es presentado.



La Figura 20 muestra la dependencia de la función sensibilidad al contraste, que es la inversa del contraste umbral, con la luminancia de adaptación. Se encuentra que a medida que la luminancia aumenta la capacidad del sistema visual para detectar diferencias de luminancias mejora, hasta alcanzar un valor asintótico, al igual que en el caso de agudeza visual. Esta representación ha sido obtenida con una población de referencia entre 20 y 30 años, a partir de mediciones de visibilidad de una tarea de referencia (CIE, 1981) que consiste en un disco de 4min de arco presentado durante 0,2s cada segundo, fijando el valor 1 para una luminancia de 100cd/m², con iluminación difusa y no polarizada, uniformidad en los alrededores de la tarea y temperatura de color de 2.850°K.

Se encuentra que el contraste umbral depende del tiempo de presentación y de la excentricidad o posición del estímulo respecto del eje foveal. Asimismo, a iguales cambios de las variables intervinientes los cambios en el contraste umbral son cada vez menos efectivos (ley de respuesta disminuida). Por otro lado, Guth y Mc Nelis en 1969 (CIE, 1989) mostraron que estos resultados se mantienen para un gran rango de estímulos, tales como redes, letras impresas, etc. Por lo tanto, es razonable sugerir que los resultados expresados son representativos para una gran variedad de estímulos.

Una regla práctica y útil en el diseño de iluminación es que, para que una tarea sea fácilmente visible, es necesario que el contraste de luminancia sea al menos dos veces el contraste umbral (Boyce, 1997).

Cuando se mide el contraste umbral usando como estímulo un patrón de luminancia simple que tiene un perfil espacial sinusoidal (Figura 21), se obtiene la *función de sensibilidad al contraste*, determinado la inversa del contraste umbral en función de la frecuencia espacial de la red sinusoidal presentada. La frecuencia espacial de una red de este tipo es la cantidad de

veces que se repite el ciclo en una unidad de longitud, que por tratarse de la visión se expresa en unidades angulares, por lo tanto la unidad de frecuencia es ciclos por grado.

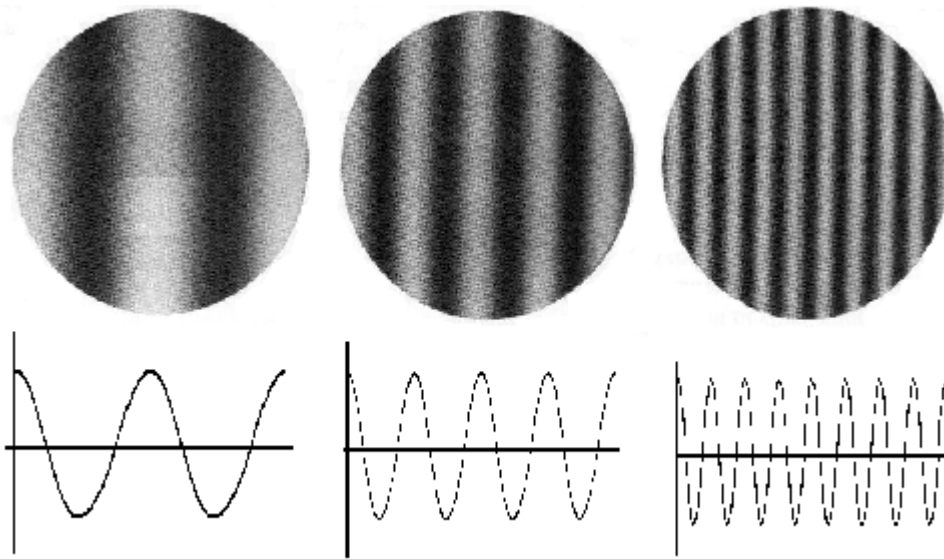


Figura 21.- Redes sinusoidales de tres frecuencias espaciales. Abajo se representa el perfil de luminancias.

En cualquier estímulo se puede asociar el tamaño del detalle crítico en términos cuantitativos con la separación entre dos bandas de luminancia por cada grado de ángulo visual subtendido en el ojo.

La función de sensibilidad al contraste integra los resultados provenientes de agudeza visual y contraste umbral de luminancias. Una manera efectiva de estudiar el camino de procesamiento del sistema visual frente a una imagen compleja es usando como estímulos este tipo de patrones periódicos de luminancia, tales como redes sinusoidales. Mediciones de esta función mostraron que el sistema visual posee canales de procesamiento sensibles a determinadas bandas de frecuencias espaciales. En general se puede decir que los detalles de una imagen están asociados al contenido de altas frecuencias mientras los rasgos generales se asocian a bajas frecuencias.

La Figura 22 muestra la *función de sensibilidad al contraste* versus frecuencia espacial. La misma indica que el sistema visual es más sensible al contraste para frecuencias espaciales de alrededor de dos o tres ciclos por grado. La sensibilidad al contraste decae fuertemente tanto en altas como en bajas frecuencias espaciales. Cuando la luminancia de adaptación aumenta desde condiciones escotópicas a fotópicas, la sensibilidad al contraste aumenta para todas las frecuencias espaciales, aumenta también la frecuencia espacial a la cual se presenta el pico de la sensibilidad al contraste y la frecuencia espacial más alta a la cual puede ser detectada.

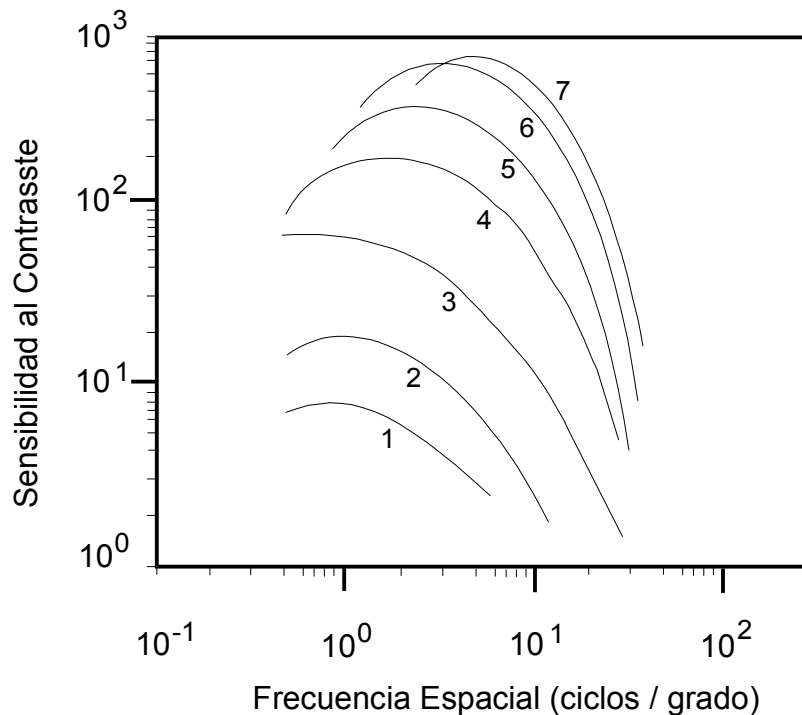


Figura 22.- Función de sensibilidad al contraste para diferentes valores de luminancia de adaptación: (1) 0,003 cd/m²; (2) 0,003 cd/m²; (3) 0,03 cd/m²; (4) 0,3 cd/m²; (5) 3 cd/m²; (6) 30 cd/m²; (7) 300 cd/m²

Si una dada tarea o imagen se descompone en sus componentes de frecuencias espaciales y, al menos una de ellas está contenida dentro del límite establecido por la función de sensibilidad al contraste, entonces la misma será visible (Sekuler y Blake, 1994), aunque la apariencia del estímulo será diferente según la componente o las componentes que sean visibles, es así que si una imagen contiene en su mayoría frecuencias espaciales bajas se verá borrosa, mientras que si posee frecuencias altas se verá nítida.

Si bien la función sensibilidad al contraste varía mucho con el nivel de luminancia no hay evidencia experimental de que dependa del contenido espectral de la luz utilizada para iluminar la tarea, supuesto que se compare el efecto de fuentes con las cuales las luminancias de la tarea son aproximadamente las mismas.

5.4. Función de Sensibilidad Temporal

La *función de sensibilidad temporal* brinda información sobre la habilidad del sistema visual para separar eventos en el tiempo, es decir se refiere a su capacidad de resolución temporal. Se construye a partir de mediciones de la amplitud de modulación porcentual umbral en función de la frecuencia de la modulación temporal del estímulo.

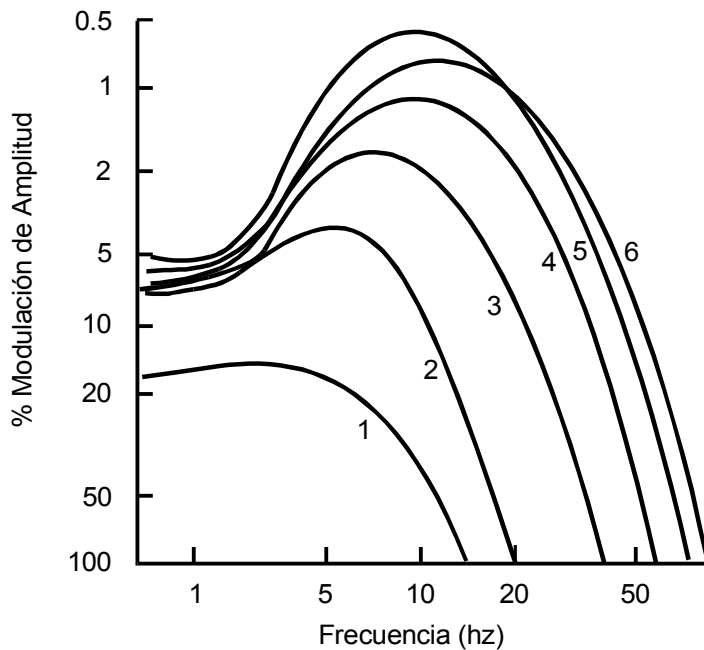


Figura 23.- Amplitud de modulación porcentual en función de frecuencia (Hz) para diferentes niveles de iluminación retiniana: (1) 0,06 trolands; (2) 0,65 trolands; (3) 7,1 trolands; (4) 77 trolands; (5) 850 trolands; (6) 9300 trolands

La Figura 23 muestra la función de modulación temporal en función de la frecuencia temporal. Cuando la luminancia de adaptación aumenta desde condiciones mesópicas a fotópicas, la sensibilidad temporal aumenta para todas las frecuencias, la frecuencia a la cual se tiene el pico de sensibilidad temporal aumenta y la frecuencia más alta que puede ser detectada también aumenta. Del mismo modo que para la función de sensibilidad espacial, si la onda que representa la fluctuación de luz se descompone en sus frecuencias componentes, la fluctuación sólo será visible si al menos una de sus frecuencias componentes cae dentro del límite establecido por la función de sensibilidad temporal.

Las fluctuaciones temporales en el flujo luminoso, o parpadeo, no son deseables en las instalaciones de iluminación. Las lámparas incandescentes tienen una inercia térmica suficiente para asegurar que, aún cuando la frecuencia de fluctuación es sólo dos veces la frecuencia de alimentación, (100 Hz para una alimentación eléctrica de 50 Hz) la modulación porcentual es pequeña, así que hay una probabilidad muy baja de percibir parpadeo de tal tipo de lámpara. Sin embargo, las lámparas de descarga, tales como las lámparas fluorescentes, no tienen inercia térmica, de manera que su modulación porcentual puede ser alta. Más adelante se verá, cuando se analice la relación entre Iluminación y confort visual, que para eliminar este parpadeo es necesario incrementar la frecuencia y/o disminuir el porcentaje de modulación suficientemente para asegurar que su combinación quede fuera de los límites establecidos por la función sensibilidad temporal (Jaen, 1999).

La función sensibilidad temporal tal como fue presentada se aplica a campos de luminancias uniformes. Si el campo tiene un patrón, es decir una distribución de frecuencias espaciales, la función sensibilidad temporal puede modificarse (Koenderink y Van Doorn, 1979).

5.5. Discriminación de Color

La habilidad para discriminar entre dos colores de igual luminancia depende de la diferencia en la distribución espectral de la luz recibida por el ojo. La Figura 24 muestra las elipses de MacAdam (el área alrededor de un valor de cromaticidad, cada una magnificada 10 veces) dentro de las cuales no puede hacerse discriminaciones de colores, aún bajo condiciones de

comparación lado a lado, que es la metodología de mayor sensibilidad (Wyszecki y Stiles, 1982).

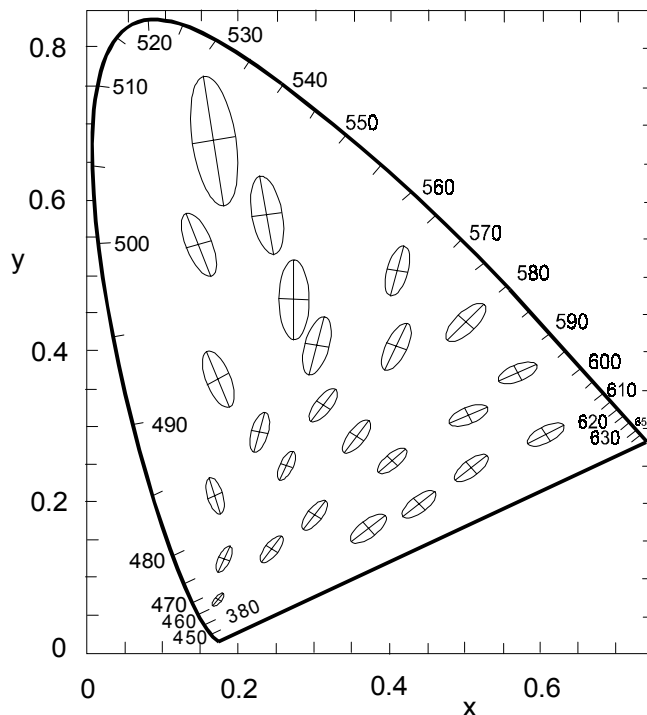


Fig. 24.- Elipses de Mac Adam (1942) en función del diagrama de cromaticidad de la CIE 1931. Los límites de cada elipse representan 10 veces la desviación estándar del juicio de color realizado para la cromaticidad indicada

El efecto de la iluminancia sobre la habilidad para discriminar colores está limitada a la región fotópica, siendo suficiente una iluminancia de 300 lux para buenos trabajos de juicios de color (Cornu y Harlay, 1969). Cuando el sistema visual entra a la región mesópica, la habilidad para discriminar detalles se deteriora y finalmente falla cuando se alcanza la región escotópica.

El efecto del espectro de la luz es mucho más importante. La posición de un color sobre el Diagrama de Cromaticidad CIE 1931 está determinada por el espectro de la luz y, si éste es reflejado desde, o transmitido a través de, una superficie, de la reflectancia o transmitancia espectral de esa superficie. Por lo tanto, es posible favorecer la discriminación de colores o empeorarla, cambiando el espectro de la fuente de luz utilizada. La elección cuidadosa de la fuente de luz es importante siempre que la discriminación de color sea necesaria.

5.6. Alternativas para mejorar la eficiencia visual umbral

Trabajar cerca de condiciones umbrales no es fácil pues crecen las exigencias sobre casi todas las variables del estímulo que son importantes para el sistema visual. De hecho, puede argumentarse que la principal función de quien diseña la iluminación es proveer condiciones que eviten la necesidad de usar el sistema visual cerca de las condiciones umbrales. Sin embargo, si ésta es la situación, entonces pueden tomarse precauciones y encarar acciones

efectivas, para mejorar la eficiencia visual umbral, acordes a cada situación y cada problema, teniendo en cuenta la discusión precedente.

Es posible alejarse de las condiciones umbrales modificando algunas características de la tarea: aumentando el tamaño o el contraste del detalle, organizar la tarea de manera que ésta pueda ser mirada directamente, es decir, fovealmente, cambiar el color del estímulo para hacerlo más conspicuo, presentarla durante un tiempo mayor o reducir su velocidad si este fuera el caso. Pero también se puede actuar sobre el medio, aumentando la luminancia de adaptación, seleccionando la lámpara con mejores propiedades de color, diseñando la iluminación de manera que no haya deslumbramiento y reflexiones de velo.

Bibliografía

- Boyce P., 1997. *Handbook of ergonomic of human factors*. Capítulo 26: "Illumination". Editado por Gavriel Salvendy, 858-890.
- Berman S., G. Fein, D. L. Jewett y F. Ashford. 1993. "Luminance-controlled pupil size affects" Landolt C task performance, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 22, 150—165.
- CIBSE: Chartered Institution of Buildings Services Engineers, 1994. *Code for interior lighting London*.
- Commission Internationale de l'Eclairage, 1970. CIE Publication 18 *Principles of light measurement*. Vienna, CIE.
- Commission Internationale de l'Eclairage, 1971. CIE Publication 15 *Colorimetry*. Vienna, CIE.
- Commission Internationale de l'Eclairage, 1972. Supplement N° 1 to CIE Publication 15. *Special Metamerism Index: Change in Illuminant*. Vienna, CIE.
- Commission Internationale de l'Eclairage, 1974. CIE Publication 13.2. *Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources*. Vienna, CIE.
- Commission Internationale de l'Eclairage, 1978. CIE Publication 41. *Light as a True Visual Quantity: Principles of Measurement*. Vienna, CIE.
- Commission Internationale de l'Eclairage, 1978a. Supplement N°2 CIE Publication 15. *Recommendations on Uniform Color Spaces, Color-Difference Equations, Psychometric Color Terms*. Vienna, CIE.
- Commission Internationale de l'Eclairage, 1981. CIE Publication N° 19/2 TC-3.1 *An analytical model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance*. Vienna, CIE.
- Commission Internationale de l'Eclairage, 1989. CIE Committee TC 1-14 2nd draft *Lighting effects on vision*. Vienna, CIE.
- Commission Internationale de l'Eclairage, 1992. CIE Publicación N° 92 (TC 1-17) *Contrast and Visibility*. Vienna, CIE.
- Cornu, L. y F. Harlay, 1969. "Modifications de la discrimination chromatique en fonction de l'eclairage". *Vision Research* 9, 1273- 1280.
- Eklund, N., 1999. "Exit sign recognition for color normal and color deficient observers", *Journal of the IES* winter 71- 81.

IESNA: Illuminating Engineering Society of North America, 1993. *Lighting Handbook IES*, 8th edition, Capítulos 2, 3 y 4.

Jaen, M., 1999. *Variación temporal de la iluminación. Sensibilidad del sistema visual humano*. Publicación Dpto. Luminotecnia Luz y Visión, Facultad de Ciencias Exactas, Ed. UNT, Serie Fascículos sobre Luz y Visión N° 6, 1-31.

Koenderink, J. y A. van Doorn, 1979. "Spatiotemporal contrast detection threshold surface is bimodal" *Optics Letters* 4, 32-34.

Mc Adam, D. 1942. "Visual sensitivities to colour differences in daylight" *J.Opt.Soc. Amer.* 32, 247.

Rea, M. y J. Jeffrey, 1990. "A new luminance and image analysis system for lighting and vision: 1 Equipment and calibration" . *Journal of the IES* 19, 64-72

Sekuler, R. Y R. Blake, 1994. *Perception*. New York, Mc Graw Hill.

Vos, J., 1984. "Disability glare - a state of the art report." *CIE Journal*, 3, 39-53.

Vos, J., 1999. "Glare today in historical perspective. Towards a new CIE glare observer and a new glare nomenclature". Proc. 23th CIE Session, Warsaw, I-1, 38-42.

Wyszecki, G. y W. Stiles, 1982. *Colour Science: Concept and methods, quantitative Data and formulae*. London, John Wiley.