



**Facultad de Farmacia**

**Macarena Biedma González**

**Título TFG: Discriminación visual del color**





**Facultad de Farmacia**  
**Grado en Óptica y Optometría**

**Trabajo Fin de Grado**

# **Discriminación visual del color**

**Macarena Biedma González**

**Sevilla, Noviembre 2019.**

**Tutores: Dr. Francisco José Heredia Mira.**

**Área de Nutrición y Bromatología**

**Dpto. Nutrición y Bromatología, Toxicología y Medicina Legal.**

**Tipología: Bibliográfico.**



**Resumen:**

El sistema visual del ojo humano es muy complejo, sobre todo la parte que compete la visión del color. La capacidad de discriminación del color no es igual en todo el espacio cromático, por este motivo es importante medir el color mediante un análisis visual y un análisis objetivo del color con instrumentos basados en la colorimetría.

El color es una característica sensorial que es posible describir con parámetros físicos cuantificables, mediante la Colorimetría Triestímulo, que adjudica un valor numérico al color de un estímulo visual. Este valor del color se obtiene mediante tres coordenadas que definen un espacio tridimensional (Triestímulo), en el que cada estímulo de color viene representado por un vector, con expresión de las cantidades proporcionales de cada uno de los estímulos primarios rojo (R), verde (G) y azul (B). La dificultad en el cálculo y, sobre todo, en la interpretación de diferencias del color en este espacio RGB, condujo a que la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) definiera otros espacios considerados uniformes, como es el caso del espacio de color CIELAB, en 1964. Obviamente, existe una correlación entre los datos RGB y datos CIELAB.

Desde 1976, la CIE publicó la fórmula para cuantificar la diferencia de color percibida basada en el espacio de color CIELAB. Existen distintos espacios de color propuestos por la CIE así como diferentes fórmulas para el cálculo de la diferencia de color percibida, aunque CIELAB es el más utilizado.

La percepción del color y de la diferencia de color, dependen de múltiples factores, que se pueden medir con distintas fórmulas propuestas por la CIE. Existen escasos estudios relacionados con umbrales de percepción de diferencia de color, y sería muy interesante estandarizar las condiciones (iluminación, ángulo y distancia de observación, región del visible evaluado, capacidad de discriminación y visión del color del observador...) en las que se realiza el experimento.

**Palabras clave:**

Colorimetría, color, discriminación, anomalías, CIE.



## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>17</b>
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1.EL OJO HUMANO.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1.1. Fisiología de la visión y percepción visual .....</b>	<b>19</b>
<b>4.1.2. El sentido de la vista .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1.3. Visión del color .....</b>	<b>22</b>
<b>4.1.4. El proceso de percepción visual. ....</b>	<b>23</b>
<b>4.2.ANOMALÍAS DE LA VISIÓN DEL COLOR.....</b>	<b>24</b>
<b>4.2.1. Daltonismo.....</b>	<b>25</b>
<b>4.2.2. Pruebas de evaluación de la visión al color. ....</b>	<b>26</b>
- <i>Prueba de Ishihara.....</i>	<b>26</b>
- <i>Prueba de Farnsworth-Munsell D-15 .....</i>	<b>26</b>
<b>4.3.DISCRIMINACIÓN DEL COLOR .....</b>	<b>27</b>
<b>4.3.1. Fundamentos de la Colorimetría Triestímulo Diferencial .....</b>	<b>29</b>
<b>4.4. ESPACIOS DE COLOR .....</b>	<b>32</b>
<b>4.4.1 Comisión Internacional de la Iluminación (CIE). ....</b>	<b>32</b>
<b>4.4.2 Espacio de color CIELAB .....</b>	<b>33</b>
<b>4.4.3 Medida de la diferencia de color percibida. ....</b>	<b>35</b>
- <i>Delta E 94.....</i>	<b>37</b>
- <i>Delta E 2000 .....</i>	<b>37</b>
- <i>Otras fórmulas utilizadas para la medida de la diferencia de color. ....</i>	<b>39</b>
<b>4.5.EVALUACIÓN DE LA DISCRIMINACIÓN VISUAL DEL COLOR.....</b>	<b>40</b>
<b>4.6.ESTUDIOS DE DISCRIMINACIÓN VISUAL .....</b>	<b>42</b>
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>45</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>46</b>



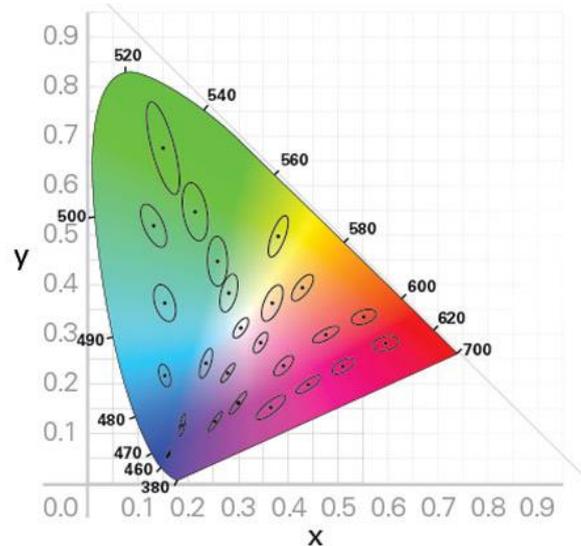
## 1. INTRODUCCIÓN

Los sentidos conectan al ser humano con su entorno. El cerebro, a través de las neuronas, integra e interpreta las sensaciones y las convierte en un conjunto de información.

La mayor parte de la información que recibimos sobre lo que nos rodea se obtiene a través del sistema visual. Mediante el ojo percibimos características como tamaño, forma, textura y color de los objetos, incluso la distancia a la que se encuentran. Por tanto, una visión defectuosa puede conducir a interpretaciones erróneas de un hecho, incluso ser responsable de problemas de atención y bajo rendimiento escolar que afecten al aprendizaje.

El sistema visual de los seres humanos, al igual que otros sentidos como el gusto, el oído, incluso la percepción del dolor, es diferente para cada persona. La capacidad de **discriminación del color** del ojo humano (distinguir entre longitudes de onda próximas) no es igual en todo el espacio cromático. Al representar las áreas del diagrama de color cuyos puntos corresponden a colores no discriminables entre sí, se establecen las denominadas elipses de McAdam (Figura 1), basadas en la estadística de la visión del ojo estándar (Brown y McAdam, 1949). En la ciencia de la visión, solo hay estadísticas comparativas, que sirven para comparar el valor de un parámetro particular con el correspondiente a la persona promedio. Las elipses de MacAdam no son mediciones absolutas de una propiedad física definible, sino que se derivan de mediciones estadísticas de las propiedades de visión de una muestra de la población. En este sentido, las elipses son una guía para evaluar la precisión de la visión del color y, por tanto, cómo es de válida una persona para distinguir entre colores similares.

Estas elipses indican que, para un observador promedio, cualquier color que se encuentre dentro del límite de cada elipse es indistinguible del valor del punto central, marcando el límite de la elipse el valor a partir del cual se empieza a detectar una diferencia de cromaticidad. Tal como se observa en la Figura 1, las elipses no tienen el mismo tamaño a lo largo del espacio de color, es decir, hay mayor dificultad para diferenciar en el color verde (elipses más grandes) que en el azul (elipses de menor tamaño). Esto indica que la discriminación al color se produce mejor para longitudes de onda próximas a 490 nm que en la región del 540 nm.



**Figura 1:** *Elipses de MacAdam en el espacio CIEXYZ.*

A través de sus estudios, MacAdam consiguió estimar que una persona con visión normal del color (visión tricromática) es capaz de distinguir alrededor de 17.000 colores por cada nivel de luminancia, lo que se corresponde con unos 3 millones de colores perceptibles (Wood, 2010).

En relación a la visión, se pueden definir **diferentes umbrales**:

- **Umbral absoluto:** mínima cantidad de energía detectable en oscuridad.
- **Umbral incremental:** mínima cantidad de energía que hay que añadir al campo observado para percibir diferencias.
- **Umbral diferencial:** es la mínima diferencia de color que puede percibirse entre dos estímulos colocados uno al lado del otro.

El valor de estos umbrales, como se ha comentado, pueden diferir entre observadores con visión normal. Por otro lado, existen observadores defectivos, con diferentes patologías que pueden afectar a la visión del color, tanto patologías directamente relacionadas con la visión (Daltonismo), como otras en las que la afectación visual es una causa secundaria (p.e. Parkinson).

El problema más común de la visión del color es el Daltonismo, anomalía de origen genético, que puede tener manifestaciones en diferentes grados y tipos. De manera general, es importante su detección para el correcto desarrollo social y cognitivo de una persona, y, de manera especial, en la selección de jueces para el análisis sensorial.

La percepción de la apariencia y el aspecto que presenta un color no depende solo de la luz que llega al ojo procedente del objeto (resultado de la reflectancia por el iluminante), sino



además, de otros factores independientes de él mismo, como puede ser lo observado inmediatamente antes o la escena que lo rodea y se observa simultáneamente (la luz que llega de su entorno). Por otro lado, fenómenos como la fluorescencia o el metamerismo (propiedad del sistema visual para percibir como idénticos dos estímulos luminosos que son espectralmente diferentes) afectan de manera importante a la percepción visual (Artigas et al., 2002). Estos fenómenos, además, están influenciados por las condiciones en que se realiza la evaluación visual. En los últimos años se estudia en profundidad la visión del color y su representación matemática aplicando distintos modelos de visión del color. Actualmente, esta investigación se conduce hacia una línea más aplicada sobre nuevos modelos de visión del color y el estudio de diferencias entre individuos con el objetivo de lograr una reproducción fidedigna del color en los medios digitales (Suero et al., 2007). Hasta la fecha no se ha encontrado un modelo de medida del color válido para cualquier condición de medida, aunque existen diversas propuestas de los llamados *Modelos de apariencia del color* (CIECAM02, S-CIELAB...) que tratan de conseguirlo (CIE:159, 2004).

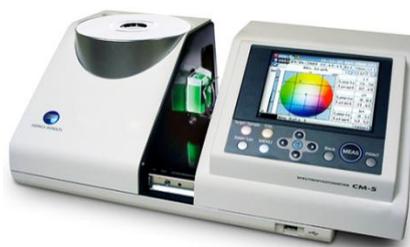
Con todo esto se pone de manifiesto la relevancia y, por tanto, la necesidad de considerar y definir cuidadosamente las condiciones de iluminación y observación (ángulo de visión, selección de jueces,...) a la hora de evaluar el color en un análisis visual.

Para evaluar la capacidad de discriminación del ojo humano es necesario establecer con exactitud la medida del color, es decir, determinar el valor numérico de un color para poder realizar comparaciones sin intervención de la inevitable subjetividad que supone el análisis visual. Esta **medida objetiva del color** se realiza mediante instrumentos basados en la Colorimetría. Ésta es la ciencia encargada de la medida y cuantificación del color, asignando un valor numérico a sus características como son matiz, luminosidad y pureza. Con ello se consigue su estandarización, determinando con exactitud el color observado.

Así, en las medidas instrumentales, el color de un objeto se expresa mediante las coordenadas de color obtenidas a partir de los valores triestímulo X, Y y Z. Existen, en este sentido, diferentes tipos de instrumentos:

- Los que miden directamente los valores triestímulo (colorímetros).
- Los que miden la magnitud radiométrica o fotométrica, a partir de la cual se calculan los valores triestímulo (espectrofotómetro y espectrorradiómetro). Estos instrumentos miden la distribución espectral (*transmitancia* o *reflectancia*) de un objeto, y a partir de ella se puede calcular el color bajo distintas condiciones.

- Otras técnicas novedosas, también aplicables a la medida del color (análisis digital de imagen).
- **Colorímetros.** Miden el color de fuentes de radiación primarias (que emiten luz propia) y secundarias (que reflejan o transmiten luz externa), descomponen la luz en sus componentes RGB y obtienen directamente los valores triestímulo X,Y,Z de forma óptica.
- **Espectrofotómetro:** Es el instrumento más comúnmente utilizado para la medida del color. Teniendo en cuenta la forma de interacción de la radiación visible con la materia, pueden realizar medidas por Transmisión y por Reflexión (Figura 2).
  - En el caso de **transmisión**, el equipo mide la cantidad de luz (intensidad) absorbida después de pasar a través de la muestra, de manera que la transmitancia es el cociente entre la respuesta del instrumento en presencia de muestra y cuando la muestra no está en el camino óptico.
  - En las medidas por **reflexión**, se analiza la cantidad de luz que refleja el objeto iluminado, y la reflectancia es el cociente entre la respuesta del instrumento a la muestra y la respuesta a un patrón conocido (normalmente blanco).



**Figura 2.** Espectrofotómetro UV-visible, para medidas por transmisión y por reflexión.

- **Espectrorradiómetro:** Este equipo está diseñado para el análisis de la radiación producida por cualquier dispositivo que emita luz (primaria o secundaria). Realiza medidas por reflexión, y obtiene la medida radiométrica de la distribución espectral de la fuente de radiación, incluso a niveles de luminancia bajos (Figura 3).

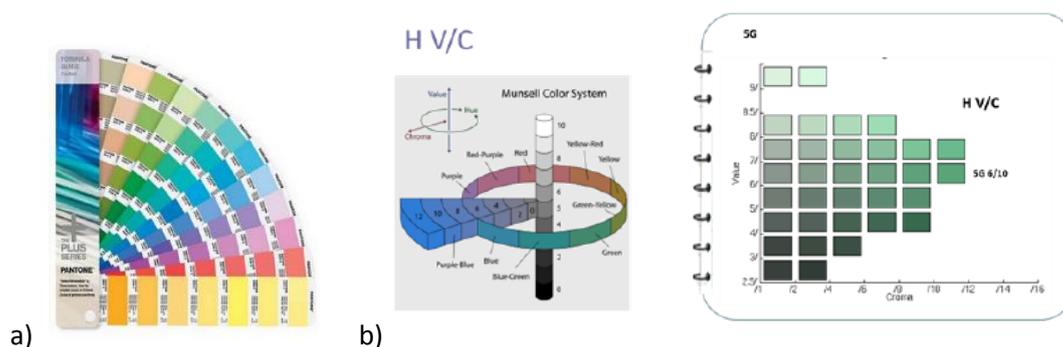


**Figura 3.** Espectrorradiómetro para medidas sin contacto.

- **Técnicas Digitales:** Un sistema de medida digital registra el color en miles, incluso millones, de puntos en la muestra, de manera que cada píxel se registra como una medida independiente de color. Con las técnicas digitales se obtienen las coordenadas cromáticas de cada píxel, lo que es fundamental en el caso de objetos que presentan colores no homogéneos.

El **análisis visual** del color se encuentra incluido dentro de la cata o examen organoléptico, que consiste en la apreciación por la vista de las cualidades de un objeto. La evaluación visual es una fase importante del análisis organoléptico. En muchas ocasiones, las características de apariencia visual proporcionan gran cantidad de información sobre el producto (calidad, frescura o alterabilidad...). En el caso del color, éste es el primer atributo que un observador aprecia en un objeto, y que puede llegar incluso a condicionar sus preferencias e influir en su elección. Basados en el color, es posible evaluar el contenido en pigmentos, muchos de ellos responsables de propiedades saludables (por ejemplo, el color naranja de una zanahoria se debe, principalmente, a su contenido en  $\beta$ -caroteno, precursor de la vitamina A) (Meléndez-Martínez, Vicario y Heredia, 2007).

El sistema visual humano tiene una gran habilidad para discriminar entre colores, pero una pobre memoria visual. Por ello, en muchas ocasiones, la evaluación visual se realiza por comparación con materiales de referencia como son escalas de color, atlas, colecciones de colores o patrones específicos (Figura 4).



**Figura 4.** Sistemas de comparación de color para evaluación visual: a) Pantone; b) Munsell.

El sistema visual humano es capaz de detectar más de 7 millones de estímulos de color. Puede diferenciar estímulos blancos con 1% diferencia luminancia y estímulos monocromáticos de igual luminancia con 2 o 3 nm de diferencia en longitud de onda. Sin embargo, la percepción del color puede estar influenciada por diferentes factores:

- Factores del individuo: Condiciones fisiológicas y psicológicas: pueden afectar al umbral diferencial de color (diferencia mínima capaz de percibir un observador): motivación, desgana, cansancio, saturación, aprendizaje, memoria...
- Factores externos: tamaño y forma del objeto, y efectos del contexto.

Los efectos del contexto del color (de contraste, constancia y asimilación de color) se ponen de manifiesto cuando las percepciones de color no se corresponden con las características espectrales de los estímulos que lo generan (Figura 5). La apariencia del color está determinada no sólo por la señal de la luz de cada objeto, sino también por las señales relativas de luz procedentes de la escena visual. Si el mismo objeto se rodea por otros objetos diferentes su aspecto cambia, aunque sus valores triestímulo permanezcan constantes (a menos que cambie el iluminante).

Algunos de estos efectos son utilizados por la industria para realzar y potenciar el color de sus productos con fines comerciales, sin necesidad de modificar sus propiedades cromáticas (Hutchings, 1999).



**Figura 5.** Efecto de contraste simultáneo en la percepción del color.

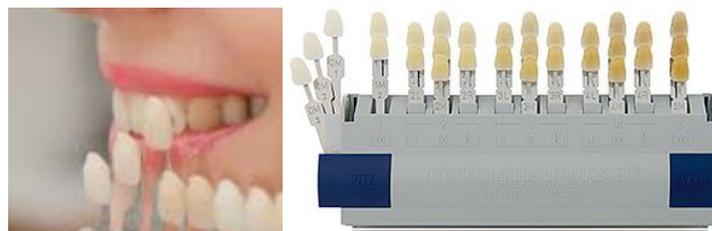
En algunas ocasiones, en la práctica sanitaria se hace fundamental poder evaluar con exactitud la diferencia de color. Así, la evaluación del tono exacto del iris, no solo clasificados como “marrón”, “verde” o “azul”, presenta una gran dificultad ya que las crestas del iris influyen en el color. Esto tiene especial importancia en la fabricación de un iris artificial de silicona flexible para un implante en caso de la pérdida de dicho iris (aniridia), por ejemplo, debido a un traumatismo. En estos casos, aparentemente todo sería pupila (negro), factor estético que cuesta asimilar. En la actualidad, se realizan implantes de iris artificial mediante la técnica Michael Snyder (Figura 6), para solucionar diversos defectos oculares, como heterocromía, albinismo ocular, catarata, aniridia o daño del iris, de manera simultánea y segura, en la que el iris se implanta como una lente (Clínicas Novovision).



**Figura 6.** *Implante iris artificial con la técnica Michael Snyder. (Fuente: Novovisión <https://www.clinicasnovovision.com>)*

Desde el punto de vista estético, la igualación del color del iris en ambos ojos es sumamente importante, por lo que es fundamental la evaluación y determinación del color en la fabricación de la lente que se va a implantar. Se pone de manifiesto, en estos casos, la dificultad de conseguir igualar el color y la apariencia exacta del iris sano debido a su heterogeneidad, que afecta a la percepción que se tiene del color.

Otro caso similar, de relevancia estética, son las prótesis dentales, cuyo color y apariencia, imprescindiblemente, deben igualar exactamente el color del esmalte de los dientes originales. La selección del color se realiza por comparación visual (Figura 7) con materiales específicos (placas o modelos en 3D), cuya elaboración se basa en valores RGB de muestras dentales (Schmeling, 2017). Es, por tanto, fundamental, el entrenamiento de los profesionales para ser capaces de apreciar pequeñas diferencias de color y conseguir la igualación con la muestra original y, con ello, la satisfacción de estos tratamientos estéticos.



**Figura 7.** *Proceso de selección de color para prótesis dentales (Fuente: Schmeling, 2017).*





## 2. OBJETIVOS

Dada la importancia de la visión del color y la capacidad para la discriminación del ojo humano, se plantea la realización de este Trabajo Fin de Grado con los siguientes objetivos:

- Entender en qué consiste la discriminación visual, especialmente en relación al color.
- Poner de manifiesto la importancia de la capacidad de discriminación visual en todos los ámbitos.
- Conocer el alcance científico de los estudios realizados y publicados sobre la evaluación y la discriminación visual del color en diferentes aplicaciones.





### 3. METODOLOGÍA

Para la realización del presente Trabajo Fin de Grado, se ha llevado a cabo una búsqueda bibliográfica con el fin de localizar y seleccionar aquellos relacionados con los objetivos planteados.

La búsqueda de información se realizó en diferentes fuentes bibliográficas (artículos científicos, revistas, Tesis doctorales y libros) a través de catálogos (FAMA +, catálogo online de la biblioteca de la Universidad de Sevilla) y bases de datos científicas (Google académico, PubMed, Teseo, MeSH, DeCS, Medline plus, Web of Science, Scopus, ScienceDirect, Dialnet, Osa Publishing.).

También se buscó información en los medios de divulgación de diversa índole, como páginas webs de entidades relacionadas con el objeto de este TFG.

Las búsquedas se realizaron tanto en español como en inglés, sin limitar el año de publicación de los artículos.

La gestión de la bibliografía se ha realizado mediante el programa Mendeley Desktop, para adecuar las referencias bibliográficas a las normas requeridas.

Las estrategias de la consulta para la búsqueda de información se plantearon de manera secuencial. En las búsquedas preliminares se incluyeron conceptos amplios para, posteriormente, ir acotando en líneas más concretas de información.

En el conjunto total de las búsquedas se utilizaron las siguientes palabras claves: colorimetría, color, discriminación visual, anomalías, CIE, espacios de color, diferencia de color, así como sus equivalentes en inglés.

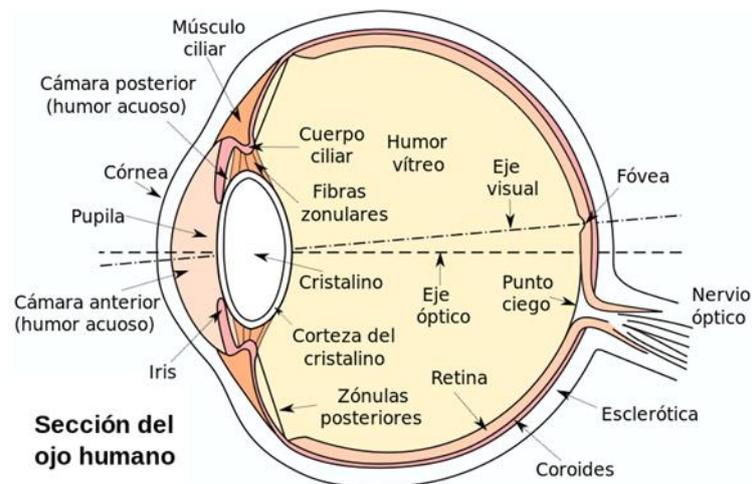


## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. EL OJO HUMANO

#### 4.1.1. Fisiología de la visión y percepción visual

El ojo es el órgano del sistema visual, responsable de captar la energía luminosa. Es un órgano de forma esférica, ligeramente ovalado, de unos 25 milímetros de diámetro. Consta de diferentes partes (Figura 8), cada una con una función específica.



**Figura 8:** Estructura del ojo. (Fuente: <https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Eyesection-es.svg>)

La **túnica fibrosa o esclerótica**, parte blanca del ojo que se percibe desde el exterior, es la membrana o capa más externa, fibrosa y dura, y contiene la córnea. Se presenta como una cobertura dura que tiene función protectora.

La **cornea** está situada en la zona externa, transparente y clara del ojo. Tiene como función brindar protección al iris y al cristalino, permitir el paso de la luz al interior.

El **iris** es el tejido pigmentario del ojo, ubicado delante del cristalino y tras la córnea. Actúa como un diafragma, ya que su función es controlar la cantidad de luz que penetra y llega al fondo de ojo disminuyendo o aumentando de tamaño, según la intensidad de luz. Los pigmentos, además de dar la coloración peculiar al ojo, de tonalidad variada, impiden la entrada de luz en el ojo, salvo por la **pupila**, un orificio en el centro del iris, transparente e incolora. Es la parte que se contrae o dilata acorde a la intensidad y cantidad de luz que llega a ojo. Está compuesta por material gelatinoso y blando el cual cubre el ojo por detrás del cristalino.

La **túnica vascular o membrana coroides** es la capa intermedia del ojo, situada entre la esclerótica y la retina, y se encarga proporcionar oxígeno y nutrientes a la retina.

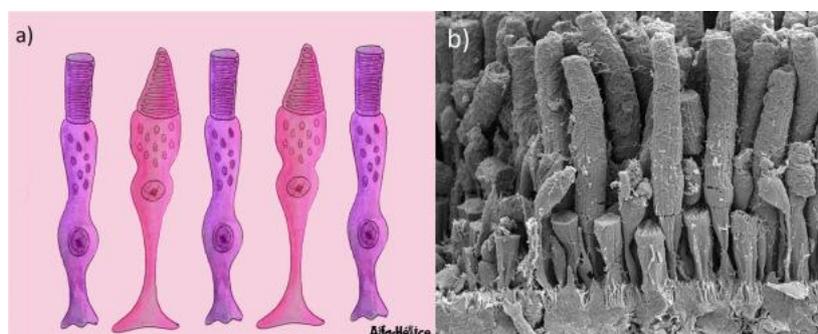
El **cuerpo ciliar** es una capa vascular situada entre la membrana coroides y el iris, que posee los músculos de sostén

Los fluidos del ojo son el **humor acuoso**, líquido incoloro localizado entre la córnea y el cristalino, cuya función es lubricar y alimentar el ojo por medio de las proteínas que contiene, y el **humor vítreo**, líquido transparente y gelatinoso que cubre todo el cristalino y la retina, y lo protege ya que funciona como amortiguador.

El **cristalino** tiene la forma de una lente biconvexa, situado detrás del iris y fijado a los músculos ciliares. Su función es enfocar el haz de luz que penetra en el ojo en la retina, al curvarse por elasticidad cuando se contrae el músculo ciliar y se relaja el ligamento suspensor. Este fenómeno se denomina *acomodación del cristalino*.

El **ligamento suspensor** divide en dos partes el ojo (cámara anterior y cámara posterior), y se encarga de disminuir o aumentar la tensión del cristalino, cambiando su forma para permitir el enfoque de los objetos observados.

La **túnica nerviosa o retina** es la capa interna, fotosensible, donde se forman las imágenes a partir de la luz que se recibe a través del diafragma variable de la pupila. En ella se encuentran las células fotorreceptoras (Figura 9) (conos y bastones) así como las estructuras nerviosas asociadas. Los **bastones** (unos 120 millones) son muy sensibles a la luz y son responsables de la visión a baja intensidad (blancos, negros y brillo), y los **conos** que se encargan de la visión del color. Estas células se estimulan cuando reciben la luz, y transmiten la información captada al cerebro a través del nervio óptico.



**Figura 9:** a) Esquema y b) microfotografía de conos y bastones de la retina. (Fuente: <http://aulas.uruguayeduca.edu.uy/mod/book/view.php?id=1812&chapterid=360>).



En la retina se encuentra el denominado **punto ciego** que es la zona donde las imágenes proyectadas no se llegan a percibir. También se encuentra la **mácula lútea**, un área muy reducida de la retina con mayor capacidad para ofrecen una visión detallada y aguda, que permite al ojo ver con claridad. En el centro de la mácula se halla la **fóvea**, donde se concentra la mayor cantidad de conos de toda la retina.

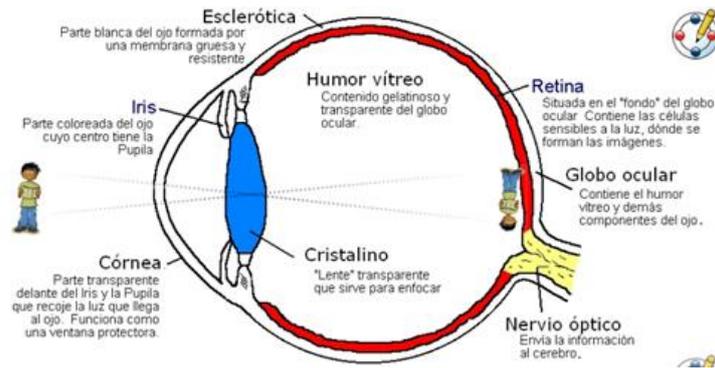
El transporte del conjunto de estímulos de la retina procedentes de conos y bastones se realiza a través del **nervio óptico**. Estos impulsos nerviosos son conducidos al cerebro en forma de señales eléctricas, donde se transforman en sensaciones visuales.

Finalmente, la **conjuntiva** es una membrana transparente y mucosa que recubre el globo ocular y lo lubrica creando las lágrimas y la mucosidad. Y mediante el **tendón** y el **músculo ocular** es posible realizar el movimiento del globo ocular de forma voluntaria (Alberich et al, 2012).

#### **4.1.2. El sentido de la vista**

La vista es el sentido que nos permite percibir la forma de los objetos a distancia, y también su color. Es la capacidad de detectar las ondas electromagnéticas de la luz visible por el ojo e interpretar la imagen por el cerebro. La luz penetra en el ojo a través de la pupila y proyecta la imagen de los objetos sobre la retina. Esta proyección produce ciertas reacciones químicas en algunas sustancias de la retina, y el estímulo debido a la energía de las reacciones se transforma en una señal nerviosa, que es transmitida al cerebro por el nervio óptico y allí es interpretada como la imagen del objeto( Sanitas S.A., 2014).

El ojo humano es un sistema óptico positivo o convergente que forma una imagen invertida del mundo externo sobre la capa sensible de la retina, situada al fondo del globo ocular (Puell, 2006) (Figura 10). En este sentido, el funcionamiento del ojo se puede asimilar al de una cámara fotográfica. La cámara negra del ojo es el humor vítreo, el objetivo está constituido por la córnea y el cristalino, el diafragma por el iris con el orificio de diámetro variable que es la pupila. La película fotosensible se corresponde con la retina y el obturador con el párpado.



**Figura 10:** El ojo humano como sistema óptico positivo. (Fuente: Magnética 107.1 MHz 2015 Disponible en: <http://www.magneticafm.com/2015/07/27/comprendiendo-la-manera-en-que-los-ojos-procesan-imagenes/>).

Como se menciona en el apartado anterior, la retina está constituida por una gran cantidad de células fotosensibles, y cada una da en cada instante información correspondiente a la intensidad y al color de las radiaciones recibidas. Estas células captadoras son terminaciones de una gran cantidad de fibras nerviosas que salen de un solo haz, el nervio óptico, encargado de transmitir la información al cerebro.

#### 4.1.3. Visión del color

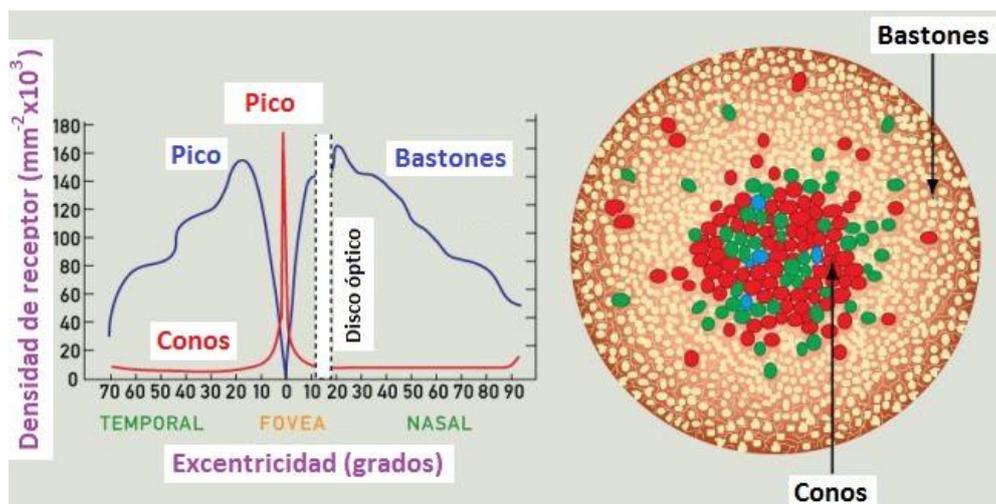
Los conos son responsables de la percepción de los colores y los bastones dan información referente a la luminosidad global del objeto iluminado. Al tener los conos menor sensibilidad a la luz que los bastones, en condiciones de baja intensidad luminosa se deja de percibir la visión de los colores, lo que se denomina visión crepuscular.

El mecanismo de la percepción de los colores se explica por la existencia de tres tipos de conos (Figura 11), sensibles a diferentes bandas de frecuencia: centrada en el rojo, centrada en el azul, y centrada en la verde. Está comprobado que el ojo humano no responde de forma uniforme a todo el espectro visible, siendo más sensible a unas radiaciones que a otras (Balestrini, 2008). El ojo tiene una máxima sensibilidad al color verde, lo que significa que necesita menor cantidad de luz para ver una imagen verde. Esta sensibilidad se va desplazando hacia el azul en condiciones de poca luz (de noche), y el ojo es más sensible a las variaciones de grises que a los colores, ya que son los bastones, más sensibles, los únicos capaces de actuar en estas condiciones de luz.

Los bastones, de los cuales poseemos más de 100 millones, son células que sólo detectan el número de fotones (cuantos de luz) que llegan a ellas, de manera independiente a la longitud de onda de la radiación (siempre que ésta se encuentre dentro del rango en que

son sensibles, es decir, 380 a 760 nm). Con ellas podemos apreciar detalles muy finos debido al elevado número de detectores, y además, son muy sensibles, por lo que podemos discernir entre variaciones muy pequeñas de intensidad. Sin embargo, dada su incapacidad para diferenciar distintas longitudes de onda, con estas células sólo obtenemos imágenes en blanco y negro.

Los conos, cuyo contenido no alcanza los 7 millones, son células sensitivas mucho más especializadas que sólo aparecen en el ojo del hombre y los primates. De la misma forma que los bastones, únicamente detectan el número de fotones que llegan a ellas, pero a diferencia de los anteriores, dependen de la longitud de onda de la radiación. Así, cada tipo de estos conos es sensible de forma selectiva a la luz de una región del espectro electromagnético visible: roja ( $\lambda \sim 650$  nm), verde ( $\lambda \sim 530$  nm), y azul ( $\lambda \sim 430$  nm). Alrededor del 60% son rojos, el 30% verdes y sólo el 10% azules. Además, su distribución no es uniforme a lo largo de la retina (Cortés, 2000).



**Figura 11:** Mosaico de conos RGB. (Fuente: [http://leodimieri.16mb.com/imgs/Cap2/f2\\_2.jpg](http://leodimieri.16mb.com/imgs/Cap2/f2_2.jpg)).

A partir de la información individual que los tres tipos de conos envían simultáneamente al cerebro cuando son estimulados por un estímulo cromático, éste es capaz de interpretar todos los colores, lo cual confiere a la percepción del color su carácter tridimensional. Esta consideración tridimensional es el fundamento de la Teoría Tricromática del color.

#### 4.1.4. El proceso de percepción visual.

La percepción visual comienza en los ojos. La luz que llega a ellos estimula los órganos receptores de la retina que convierten el estímulo lumínico en impulso eléctrico y lo transmiten, a través de los axones del nervio óptico, hacia el cerebro. La información se encuentra en la conexión cerebral llamada quiasma y continúa hasta llegar a una zona



específica del tálamo (los núcleos geniculados laterales) desde donde es enviada al córtex visual situado en el lóbulo occipital. La información procedente del ojo derecho es enviada al córtex visual del hemisferio izquierdo y viceversa.

Este proceso se puede dividir en tres etapas principales (Alberich et al., 2012).

1) *Fotorrecepción*: la luz que llega al ojo estimula en el fondo de la retina las células fotorreceptoras, que transmiten la señal al nervio óptico.

2) *Transmisión y procesamiento*: en la retina empieza un primer nivel de procesamiento que se irá haciendo complejo hasta llegar al tálamo y de éste al córtex cerebral.

3) *Percepción*: en el lóbulo occipital (en la zona visual primaria y en la zona de asociación visual) se completa el proceso de percepción y podemos hablar de consciencia de la imagen vista.

Algunos estudios psicofísicos ponen de manifiesto que, cuando se exponen a los sujetos a luces con longitud de onda que oscila entre 380-760 nm, pueden llegar a discriminar hasta 150 matices diferentes, con distintos niveles de brillo y saturación, por lo que se calcula que es posible discriminar hasta 7.000.000 de estímulos diferentes.

#### 4.2. ANOMALÍAS DE LA VISIÓN DEL COLOR

El color es una respuesta mental al estímulo que una radiación luminosa visible (380-770 nm) produce en la retina. Se considera como un concepto psicofísico, relacionado al mismo tiempo con la psicología del observador, la fisiología de la visión y con la energía radiante espectral de una fuente luminosa (Wyszecki y Stiles, 1982).

La luz que incide en la retina (estimulo cromático) desencadena una serie de procesos químicos y eléctricos que se traducen en impulsos nerviosos transmitidos a través del nervio óptico hacia el cerebro, donde se interpreta la señal recibida y, finalmente, se produce la sensación de color. Así, el color es más una propiedad de la luz que una característica intrínseca de los objetos que reflejan o transmiten la radiación luminosa, ya que basta con cambiar la fuente para modificar el estímulo producido. Además, debido a que el proceso por el cual se genera la sensación de color depende de la interpretación realizada por el cerebro en cada observador, la percepción visual del color es una sensación subjetiva. Por otro lado, al depender de sistema ocular, las anomalías que afecten a este sistema pueden estar relacionadas con la visión del color.



#### 4.2.1. Daltonismo

El daltonismo es una afección consistente en deficiencia visual de la visión del color, ya que los pacientes no perciben los colores de manera normal. Esta anomalía toma el nombre de la primera persona que lo estudió, el químico inglés John Dalton (1766-1844) quien, además, lo padecía.

Mientras que la deficiencia de la visión del color se puede desarrollar por enfermedades, lesiones o ciertos medicamentos, es muy común heredarla a través de los genes en el nacimiento. La forma más popular de la deficiencia de la visión del color, conocida como daltonismo rojo-verde, a menudo se transmite a través de un cromosoma sexual llamado cromosoma X. Un varón nace con deficiencia de color rojo-verde si en el cromosoma X hereda el gen de deficiencia del color de su madre.

Las mujeres tienen dos cromosomas X (XX) lo que hace que sea menos común en las mujeres que nazcan con deficiencia de color rojo-verde ya que ambos cromosomas X deberían contener el gen de deficiencia de color (uno de cada progenitor). Si sólo uno de estos cromosomas X tiene el gen, su visión del color no es deficiente, pero puede pasarlo a sus descendientes.

Por otra parte, la deficiencia de visión del color azul-amarillo no se produce a causa de los cromosomas X, sino, por lo general, debido a una mutación en uno de los genes no sexuales o por daño en la retina, haciendo que los hombres y las mujeres se vean afectados por igual.

Existen diferentes tipos de daltonismo:

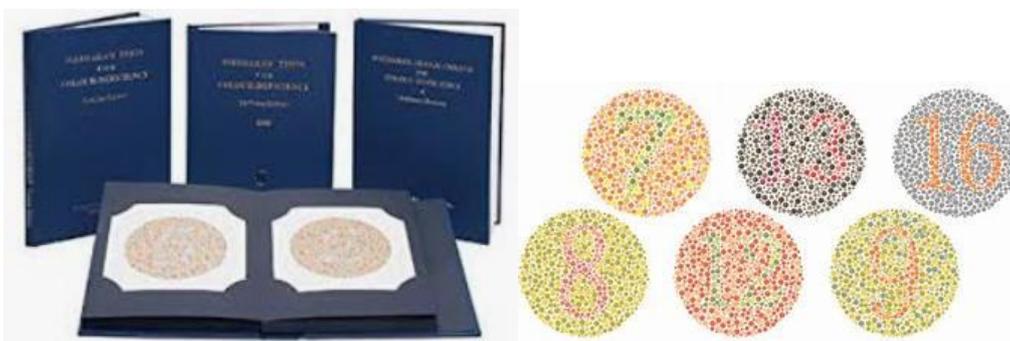
- **Acromático:** El individuo ve en escala de grises, no percibe el color ya sea porque no tiene ninguno de los tres tipos de conos o por razones neurológicas. Se presenta únicamente un caso por cada 100.000 personas.
- **Monocromático:** Se presenta cuando únicamente existe uno de los tres pigmentos de los conos, por lo que la visión de la luz y el color queda reducida a una dimensión.
- **Dicromático:** Es un defecto moderadamente grave en el cual hay una disfunción de uno de los tres mecanismos básicos del color. Es hereditaria y puede ser de tres tipos diferentes: Protanopia, deuteranopia y tritanopia.
  - **Protanopia:** ausencia total de los fotorreceptores retinianos del rojo.
  - **Deuteranopia:** ausencia de los fotorreceptores retinianos del color verde.

- **Tritanopia:** ausencia de los fotorreceptores de la retina para el color azul (muy poco frecuente).
- **Tricromático anómalo:** El afectado posee los tres tipos de conos, pero con modificaciones funcionales, por lo que confunde un color con otro. Es el grupo más abundante y común de daltónicos, tienen tres tipos de conos, pero perciben los tonos de los colores alterados. Suelen tener percepciones similares a los daltónicos dicromáticos, pero menos notables. Las alteraciones que se incluyen dentro de este grupo son: protanomalia (1 % de varones, 0.01 % de mujeres), **deuteranomalia**, la más usual (6 % de varones, 0.4 % de mujeres) y **tritanomalia** muy poco frecuente (0.01 % de varones y 0.01 % de mujeres).

#### 4.2.2. Pruebas de evaluación de la visión al color.

##### - Prueba de Ishihara

Esta prueba permite detectar deficiencias rojo/verde (protán y deután) mediante el método de confusión. Está constituido por 38 láminas coloreadas (Figura 12), divididas en dos grupos: 25 con números que son las que se usan habitualmente y 23 pensadas para niños o analfabetos, formadas por trazos sinuosos que han de seguirse. La prueba se debe realizar con luz natural, manteniendo las láminas a una distancia de observación de 75 cm. El sujeto debe identificar rápidamente el número o la trayectoria. En función de las respuestas, y mediante tablas, se determina si existe alguna anomalía y, en su caso, de qué tipo.

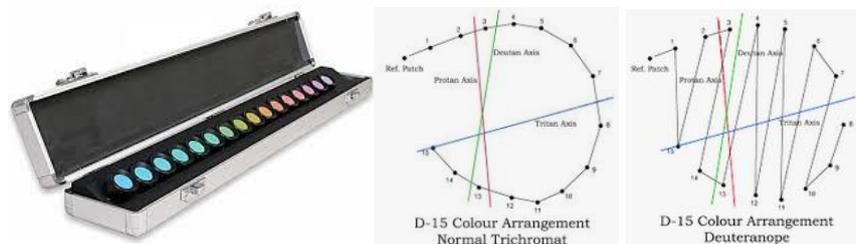


**Figura 12.** Test de Ishihara. Libro y algunas páginas.

##### - Prueba de Farnsworth-Munsell D-15

La prueba de Farnsworth-Munsell de dicotomía D-15 está diseñada para realizar una evaluación rápida de la aptitud de un individuo para ver el color de manera normal. Consta de una cápsula de referencia y otras 15 fichas coloreadas móviles, que presentan una variación de tono incremental. El individuo debe ordenar las 15 fichas siguiendo este incremento de tono.

Las desviaciones en esta ordenación pondrán de manifiesto las correspondientes anomalías en la visión del color (Figura 13).

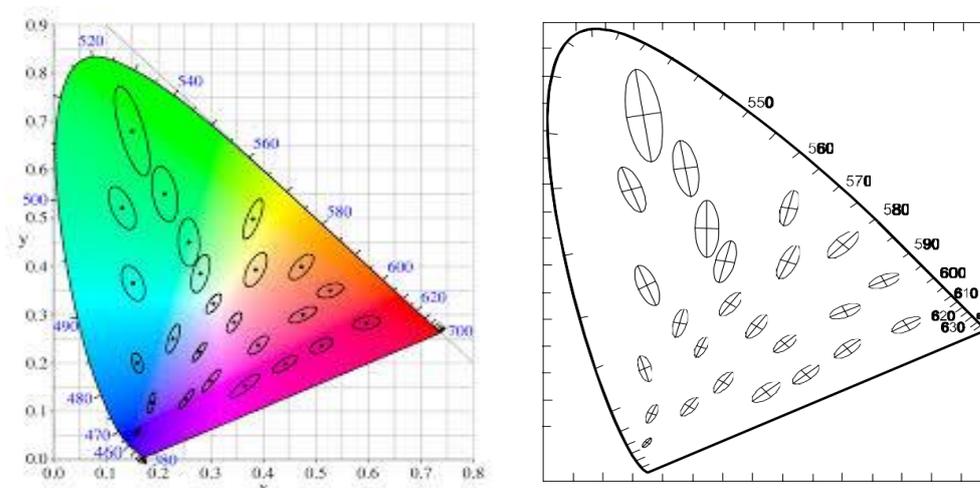


**Figura 13.** Test de Farnsworth-Munsel 15. Resultado de un individuo normal y uno anómalo.

### 4.3. DISCRIMINACIÓN DEL 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 14 muestra las elipses de MacAdam (el área alrededor de un valor de cromaticidad) dentro de las cuales no es posible discriminar colores, incluso en comparación lado a lado, que es la condición más favorable o de mayor sensibilidad. 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 limitado a la región *fotópica* (niveles de iluminación diurnos), siendo suficiente una iluminancia de 300 lux para buenos trabajos de juicios de color. Cuando el sistema visual entra a la región mesópica (iluminación media), la habilidad para discriminar detalles se deteriora y finalmente falla cuando se alcanza la región escotópica (niveles muy bajos de iluminación).



**Figura 14.** Elipses de Mac Adam (1942) en función del diagrama de cromaticidad CIE 1931.

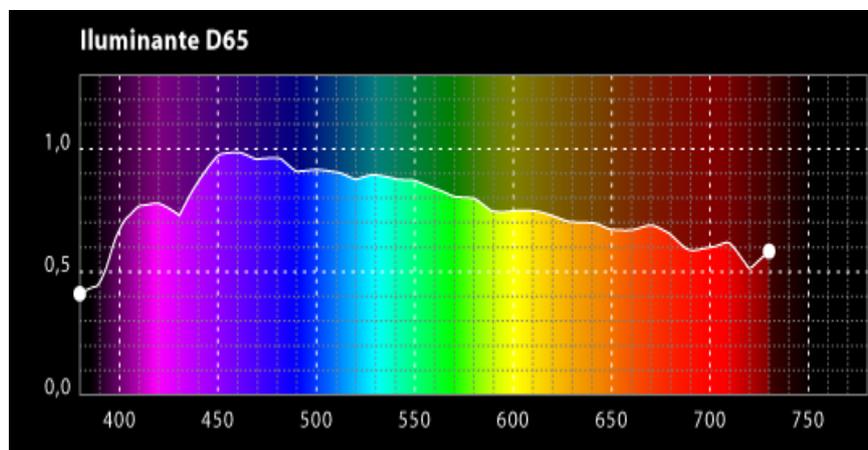
El efecto del espectro de la luz es mucho más importante. La posición de un color sobre el Diagrama de Cromaticidad CIE 1931 está determinada por el espectro de la luz y, si éste es reflejado desde, o transmitido a través de, una superficie, de la reflectancia o transmitancia espectral de esa superficie. 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 (Colombo y O`Donell, 2006).

Así, cuando se van a comparar resultados, es fundamental realizar las medidas de color bajo las mismas condiciones, estableciendo condiciones estándar. En este sentido, la CIE propone y define diferentes iluminantes a efectos de medida objetiva del color (CIE, 2004).

#### - Iluminante D65.

El iluminante D65 es uno de los estándares propuestos por la CIE perteneciente a la serie D ("daylight"), correspondientes a situaciones de luz de mediodía en distintas latitudes del mundo, que se describen en términos de temperatura de luz (emisiones de luz producidas por un cuerpo negro al someterse a altas temperaturas) (CIE, 2007;).

El iluminante D65 se corresponde con la luz producida por un cuerpo negro a 6500 Kelvin (temperatura de color media es de 6504 K), y describe las condiciones medias de iluminación en un mediodía en Europa Occidental, y se suele nombrar de manera simple con expresiones como "luz de día". El estándar D65 queda definido con una tabla de energías entre 300 y 830 nm, cuyo espectro de emisión se muestra en la Figura 15. Es un iluminante muy utilizado y recomendado para la medida de color de alimentos o como iluminación de referencia en fotografía (CIE, 2004).



**Figura 15.** Tabla de energía del iluminante D65. (Fuente: <https://tse2.mm.bing.net/>)



#### 4.3.1. Fundamentos de la Colorimetría Triestímulo Diferencial

La Colorimetría Triestímulo es la rama de la ciencia que estudia la especificación numérica del color de un estímulo visual. Las leyes que rigen la generalización tricromática se pueden expresar de forma geométrica, considerando un espacio pseudovectorial de tres dimensiones denominado Espacio Triestímulo, en el que cada estímulo de color (Q) viene representado por un vector, expresión de las cantidades proporcionales de cada uno de los estímulos primarios rojo (R), verde (G) y azul (B). Así, un estímulo dado Q podría expresarse como la mezcla aditiva de determinadas cantidades de los tres estímulos primarios fijados, RGB:

$$Q = RQ \cdot R + GQ \cdot G + BQ \cdot B$$

Los factores escalares RQ, GQ y BQ, asignados a los estímulos primarios, se denominan valores triestímulo de Q.

La dificultad en el cálculo de los valores triestímulo R, G, B según las ecuaciones colorimétricas básicas desarrolladas inicialmente (Teoría Tricromática del Color), condujo a la CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*) a la adopción de otro sistema tricromático basado en unas "Especificaciones sobre observadores estándares en colorimetría" y unas "Recomendaciones sobre cuestiones relacionadas" (CIE, 2004).

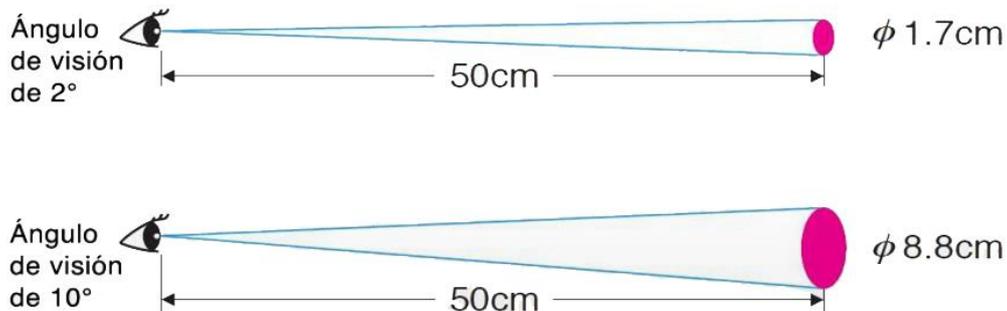
Así, se definen los nuevos valores triestímulo X, Y, Z. Estos son estímulos imaginarios y no igualables con los del espectro visible, pero que aseguran que las coordenadas de cromaticidad x, y, z, en ningún caso adopten valores negativos, cuyo significado físico podría resultar confuso en su aplicación a la medida del color de materiales coloreados. Asimismo, se definen las "funciones de igualación de color" como las propiedades del Observador Estándar CIE 1931-(x,y) (u Observador de 2°), en el intervalo de longitudes de onda de la zona visible del espectro.

Mediante la integración del espectro, y de acuerdo con las condiciones de referencia elegidas (iluminante y observador), se obtienen los componentes del vector o valores triestímulo (X, Y, Z), a partir de los cuales la Comisión Internacional de la Iluminación define diferentes sistemas colorimétricos (CIE, 2004): espacios de color y diagramas cromáticos asociados.

En ellos es posible la caracterización de los puntos de color y su interpretación mediante el cálculo de parámetros psicofísicos relacionados (tono, claridad, y croma o saturación). Entre los sistemas tricromáticos más utilizados se encuentran CIE 1964-(x,y) (no uniforme, conocido como CIEXYZ) y los espacios considerados uniformes CIE 1976-(L\*u\*v\*) (CIELUV) y CIE 1976-(L\*a\*b\*) (CIELAB).

Por tanto, a partir del desarrollo de la Teoría Tricromática del Color, cualquier estímulo cromático que llega a la retina está compuesto por tres sensaciones o atributos bien diferenciados (el tono, la claridad y la saturación) que definen, a su vez, cualquier color.

- **Observadores Estándar CIE: 2 Grados y 10 Grados**

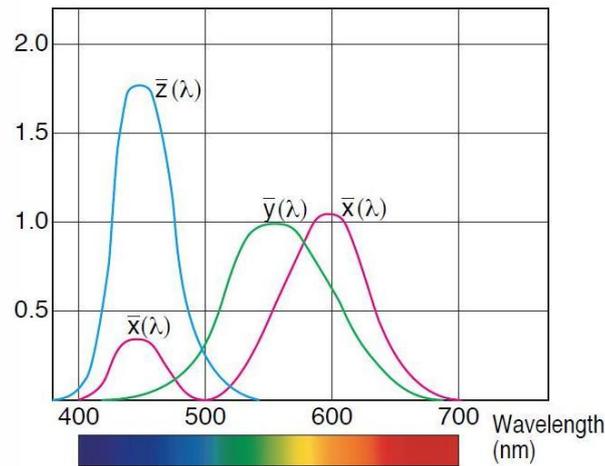


**Figura 16:** *Ángulo de visión en observadores estándar.*

La sensibilidad del ojo humano varía de persona a persona, a menudo causando que el color parezca diferente según cada individuo. Esta subjetividad puede llevar a menudo a inconsistencias cuando se evalúa el color. A raíz de esto, la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), estableció funciones para estandarizar cómo se mide el color de un objeto, incluyendo lo que concierne al campo de visión (Figura 16).

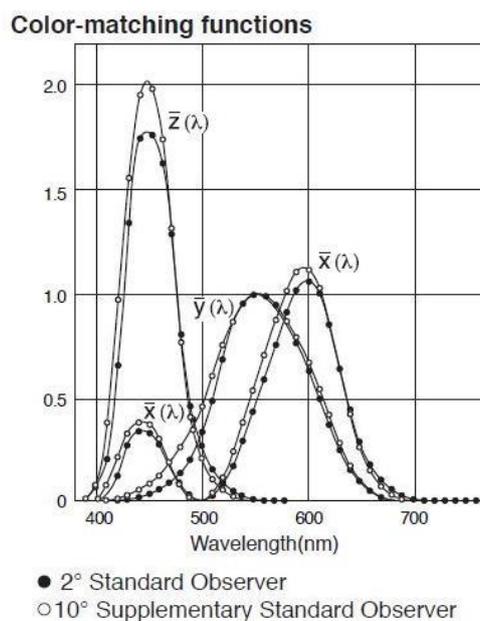
En 1927, los físicos John Guild y David Wright llevaron a cabo, por separado, un experimento en los que los observadores debían igualar un color, con el fin de determinar la percepción del color de una persona promedio. Se les pidió a los sujetos que mirasen a través de un orificio en el que se les mostraba un color dado y que trataran de igualar cada color combinando intensidades de luces rojas, verdes y azules. Este orificio sólo permitía un ángulo de visión de 2 grados (similar a mirar a una uña de la mano a la distancia que abarca el brazo o equivalente a un círculo de 1.7 cm desde una distancia de 50 cm) con la idea de que el área sensible al color de la córnea humana se localiza en un arco de 2 grados en la fóvea.

Basándose en las respuestas de este experimento, se obtienen los valores de respuesta del ojo humano promedio a la percepción de los colores en visión de 2 grados (Figura 17), y cada curva representa uno de los tres colores primarios de luz. En 191 se publicaron los resultados, referido como el Observador Estándar de 2 Grados de la CIE, como una función matemática (funciones de igualación, "colour matching functions"), para ser usadas en la cuantificación de color, para estandarizar la forma en que el color es evaluado.



**Figura 17:** Espectro de visión de observador de 2 grados.

Los valores de color numéricos de un objeto calculado usando la función del Observador Estándar de 2 Grados, sin embargo, no siempre corresponden bien a las evaluaciones visuales del ojo humano. Alrededor de 1960, se descubrió que el ojo humano tiene un ángulo de visión más amplio de lo que se creía hasta el momento. Por ello, el experimento de igualación de color se realizó nuevamente usando un agujero que permitía un ángulo de visión de 10 grados (similar a estar mirando la palma de la mano a una distancia del brazo, o equivalente a un círculo de 8.8 cm a una distancia de 50 cm). Se encontraron diferencias sutiles con respecto al primer experimento, y se ajustó la función, lo que resultó en la publicación, en 1964, del denominado Observador Estándar Suplementario de 10 Grados (Figura 18)



**Figura 18:** Diferencias entre observador de 2 grados y 10 grados.



## Observador de 2 Grados vs. Observador de 10 Grados

Usado cuando se evalúa el color de un objeto, los observadores estándar CIE ayudan a correlacionar las mediciones instrumentales de color a las evaluaciones visuales humanas. El Observador Estándar Suplementario de 10 Grados de 1964 es considerado más representativo a cómo el ojo humano percibe el color. Recomendado por la CIE, éste ángulo de visión mayor se usa comúnmente con espectrofotómetros para formular y evaluar el color de varios tipos de muestras. Los colorímetros, por otro lado, usan típicamente el Observador Estándar de 2 Grados. Éste ángulo de visión inferior se usa generalmente para control de calidad y otros procesos de evaluaciones, particularmente para aplicaciones de alimentos.

### 4.4. ESPACIOS DE COLOR

#### 4.4.1 Comisión Internacional de la Iluminación (CIE).

**Comisión Internacional de la Iluminación** es el organismo que proporciona recomendaciones sobre la forma precisa en que se deben aplicar los fundamentos básicos para la medida del color. Fundada en 1931 y con sede en Viena (Austria), la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE por su nombre en francés *Commission Internationale de l'Éclairage*) es la autoridad internacional en luz, iluminación, color y espacios de color.

La CIE cuenta con ocho divisiones activas, cada una de las cuales establece comisiones técnicas para llevar a cabo su programa bajo la supervisión del director de la división, con algunos Comités Técnicos que actualmente trabajan en temas que pueden ser de interés para el óptico-optometrista:

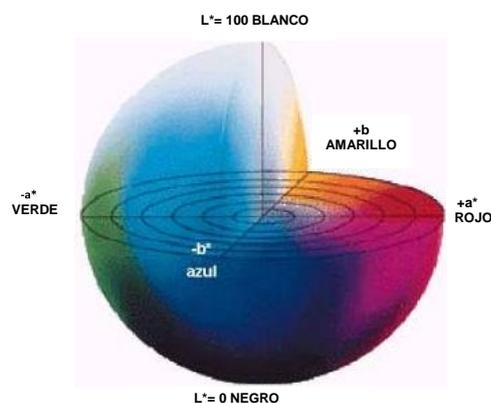
- Visión y Color
- Medición de la luz y la radiación
- Medio Ambiente Interior y Diseño de Iluminación
- Iluminación y señalización para el transporte
- Iluminación exterior y otras aplicaciones
- Fotoquímica y Fotobiología
- Aspectos generales de la iluminación
- Tecnología de la Imagen

#### 4.4.2 Espacio de color CIELAB

Desde el año 1976, la CIE recomienda internacionalmente el sistema de especificación del color CIE 1976-(L\*a\*b\*) (CIELAB), como el más apropiado para la especificación del color en la industria alimentaria, debido a su uniformidad, precisión y exactitud y además cuyos límites son el intervalo de color que el ojo humano es capaz de percibir.

Las magnitudes colorimétricas definidas en el espacio CIELAB se derivan matemáticamente de los valores triestímulo, y pueden considerarse una respuesta de los observadores patrón a un estímulo luminoso. Tratando de imitar a los observadores reales, estas respuestas se hacen depender del tipo de estímulo y del blanco de referencia.

El espacio de color CIELAB (Figura 19) es un sistema cartesiano definido por tres *coordenadas rectangulares* colorimétricas L\*, a\*, b\* como magnitudes adimensionales. La coordenada L\* se define como *claridad* y puede tomar valores entre 0 (que corresponde al negro), y 100 (blanco). Las coordenadas colorimétricas a\* y b\* forman un plano perpendicular a la claridad. La coordenada a\* define la desviación del punto acromático, correspondiente a la claridad, hacia el rojo si a\* > 0, y hacia el verde si a\* < 0. Análogamente la coordenada b\* define la desviación hacia el amarillo si b\* > 0, y hacia el azul si b\* < 0



**Figura 19.** Espacio de color CIELAB. (Fuente:

<http://sensing.konicaminolta.com.mx/images/blogImages/ColorSphere.jpg>).

A partir de las coordenadas a\* y b\* se definen dos magnitudes colorimétricas nuevas, *croma* y *tono*, mediante las siguientes expresiones:

$$C_{ab}^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}, \quad h_{ab} = \arctan(b^*/a^*)$$



El *croma*,  $C^*_{ab}$ , es el atributo de la percepción visual conforme al que un área parece saturada respecto a un determinado color o tonalidad. Tiene valor 0 para estímulos acromáticos y, por lo general, no pasa de 150 aunque puede superar ese valor para determinados estímulos monocromáticos.

El *tono*,  $h_{ab}$ , es el color básico de un objeto (azul, amarillo, etc.) definido por su posición angular en un espacio de color cilíndrico. Los valores, por tanto, varían entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ , y para estímulos acromáticos ( $a^*=0$ ,  $b^*=0$ ) es una magnitud no definida.

Respecto a otros sistemas de color (como por ejemplo el Sistema Munsell), el espacio de color CIELAB presenta dos ventajas importantes: 1) el cálculo de las coordenadas es mucho más simple, y 2) las distancias geométricas entre puntos se corresponden con las diferencias visuales, por lo que se considera un espacio de color uniforme.

A partir de los parámetros que permiten la definición de cualquier color ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*_{ab}$ ,  $h_{ab}$ ), el estudio y desarrollo de la *colorimetría diferencial* ha experimentado un gran interés en la industria, especialmente en las últimas décadas. Esta diferencia entre dos estímulos dentro del espacio de color CIELAB se mide como la distancia Euclídea existente entre dos puntos en el espacio tridimensional, se denomina *diferencia de color* ( $\Delta E^*_{ab}$ ) y se calcula según la siguiente expresión:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Este parámetro, junto con los *índices colorimétricos de claridad* ( $\Delta L^*$ ), *croma* ( $\Delta C^*_{ab}$ ), y *tono* ( $\Delta h_{ab}$ ) han demostrado ser muy útiles en el seguimiento de los cambios de color. Por ello, desde el punto de vista industrial, las fórmulas basadas en CIELAB son las de mayor uso o interés en la actualidad. El amplio uso del sistema y de la fórmula de color CIELAB en las aplicaciones industriales ha supuesto un punto de partida de una nueva generación de ecuaciones de diferencia de color aplicadas en la industria como las recientemente desarrolladas CIE94 (CIE, 1995) y CIEDE2000 (CIE, 2001), elaboradas respectivamente por los Comités Técnicos de la CIE 1-29 y 1-47.

Por tanto, dado que el color es un fenómeno psicofísico, su medición e interpretación deben basarse en la percepción humana. En ese sentido, el espacio de color CIELAB, a partir de las coordenadas rectangulares ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) y cilíndricas ( $L^*$ ,  $C^*_{ab}$  y  $h_{ab}$ ), y con su correspondiente fórmula de diferencia de color asociada ( $\Delta E^*_{ab}$ ), proporciona una útil representación tridimensional del color. En primer lugar, las coordenadas cilíndricas representan los



parámetros de color más relacionados con los tres atributos clásicos de color percibidos visualmente (claridad, saturación y tono, respectivamente). En segundo lugar, el parámetro diferencia de color ( $\Delta E^*_{ab}$ ), permite medir la diferencia cromática entre dos estímulos. Además, al ser este espacio “considerado uniforme” por la CIE, las diferencias calculadas se corresponden con diferencias de percepción visual similares.

#### 4.4.3 Medida de la diferencia de color percibida.

La Comisión Internacional de Iluminación (CIE) abordó la necesidad de cuantificar la diferencia de color en 1976, estableciendo el concepto de Delta E ( $\Delta E$ ). El término *delta* procede del símbolo matemático utilizado para indicar el cambio en una variable o función, y la letra *E* hace referencia a la palabra alemana *Empfindung*, que significa sensación.

La CIE ha propuesto diferentes fórmulas para el cálculo de diferencias de color que consideren, además, las diferencias de color percibidas.

#### ¿Cuál es la fórmula para cuantificar la diferencia de color percibida?

La fórmula de 1976 es la primera fórmula que relaciona una diferencia de color medida con un conjunto conocido de coordenadas CIELAB. Esta ecuación sería posteriormente mejorada por las fórmulas de 1994 y 2000 porque el espacio CIELAB resultó no ser tan perceptualmente uniforme como se esperaba, especialmente en las regiones saturadas.

El espacio de color CIE 1976 ( $L^*a^*b^*$ ) proporciona una representación tridimensional de los estímulos perceptuales del color. Si dos puntos en el espacio (que representan dos estímulos), son coincidentes, entonces la diferencia cromática entre ambos estímulos es igual a cero.

Según se incrementa la distancia entre esos dos puntos ( $L^*_1, a^*_1, b^*_1$  y  $L^*_2, a^*_2, b^*_2$ ), es razonable suponer que va aumentando la percepción de que existe una diferencia cromática entre los estímulos que ambos puntos representan. Por tanto,  $\Delta E$  - (*Delta E, dE*) mide la *distancia Euclídea entre puntos de color diferentes* en el espacio tridimensional.

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L^*_2 - L^*_1)^2 + (a^*_2 - a^*_1)^2 + (b^*_2 - b^*_1)^2}$$

Si  $\Delta E^*$  se aproxima a 2.3 siendo en todo caso inferior a 3, estaríamos hablando de la diferencia apenas perceptible (**JND**, “*just noticeable difference*”) que se produce entre dos niveles de intensidad de un estímulo sensorial. O lo que es lo mismo, una diferencia de color muy difícilmente apreciable. Es muy importante tener en cuenta que el ojo humano tiene



dificultades para diferenciar un tono purpura incluso con un  $\Delta E$  de 5 unidades o más, pero sin embargo es capaz de diferenciar un  $\Delta E=0,5$  en una escala de grises.

Basados en este valor de diferencia de color, se pueden establecer el “grado de similitud” entre dos muestras dadas. En este sentido, la Norma ISO 12647 sobre la producción de impresos en artes gráficas, establece el criterio que se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1: Referencias Delta E de la Norma ISO 12647.**

$\Delta L = L_{\text{muestra}} - L_{\text{referencia}}$
$\Delta a = a_{\text{muestra}} - a_{\text{referencia}}$
$\Delta b = b_{\text{muestra}} - b_{\text{referencia}}$

Valores de $\Delta E$	Calidad
0 y 1	Excelente
1 y 2	Buena
2 y 4	Normal
4 y 5	Suficiente
Superiores a 5	Mala

Como se puede observar, según esta Norma ISO 12647, una diferencia del Delta E entre dos colores superior a 4 o 5 unidades se considerará como mala y normalmente inaceptable. El ojo humano no detecta diferencias de 1 o 2 unidades, pero valores de 3, y en determinados colores (el color de la piel o en el gris), es posible detectar una sutil diferencia de tono.

Con la norma **ISO 12647-2** obtenemos varias ventajas:

1. El color ya no es solo un concepto, es un número. Y su representación en el papel es medible, por lo que es susceptible de ser controlado.
2. Cuando queremos imprimir ya nos podemos acoger a la estabilidad de color en los productos. Podemos estar seguros que, si definen un azul en concreto, este podrá ser repetido en sucesivas ocasiones y en diferentes trabajos.
3. Cuando una persona quiere cambiar de imprenta, si todas imprimen en offset ISO, recibirá siempre el mismo color.

En un estudio realizado por Mirjalili et al. (2019) se pone de manifiesto que los valores de  $\Delta E$  no son iguales cuando las muestras están separadas y cuando están juntas. Y este efecto de separación puede describirse adecuadamente por nuevas fórmulas.



- **Delta E 94**

Se han obtenido mejoras significativas en la predicción de la magnitud de diferencias de color percibidas, mediante el uso de varias Fórmulas basadas en CIELAB, en particular CIE94 (Melgosa, 2000). Hay que tener en cuenta que se debe diferenciar entre la diferencia de color medida y la percibida. En este sentido,  $\Delta E$  1976 solo tiene en cuenta el valor medido y no el que se es capaz de percibir.  $\Delta E$  1994 y 2000 aparecen como para intentar corregir este problema ya que traducen el  $\Delta E$  medido con su equivalencia percibida.

En 1994, se mejoró la fórmula Delta E original. La nueva fórmula tenía en cuenta ciertos factores de ponderación para cada valor de luminosidad, croma y tono. También introdujo la posibilidad de agregar un modificador de acuerdo con el caso de uso, ya sea textil o artes gráficas. Las ecuaciones que definen esta diferencia de color son más complejas dado que consideran nuevos parámetros:

$$\Delta E_{94}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{k_H S_H}\right)^2}$$

$$\Delta L^* = L_1^* - L_2^*$$

$$C_1^* = \sqrt{a_1^{*2} + b_1^{*2}}$$

$$C_2^* = \sqrt{a_2^{*2} + b_2^{*2}}$$

$$\Delta C_{ab}^* = C_1^* - C_2^*$$

$$\Delta H_{ab}^* = \sqrt{\Delta E_{ab}^{*2} - \Delta L^{*2} - \Delta C_{ab}^{*2}} = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} - \Delta C_{ab}^{*2}}$$

$$\Delta a^* = a_1^* - a_2^*$$

$$\Delta b^* = b_1^* - b_2^*$$

$$S_L = 1$$

$$S_C = 1 + K_1 C_1^*$$

$$S_H = 1 + K_2 C_1^*$$

donde  $k_C$  y  $k_H$  son por lo general tanto la unidad como los factores de ponderación  $k_L$ ,  $K_1$  y  $K_2$  dependen de la aplicación:

**Tabla 2:** Factores de ponderación en artes gráficas y textiles.

	Artes graficas	textiles
$k_L$	1	2
$K_1$	0,045	0,048
$K_2$	0,015	0,014

- **Delta E 2000**

Dado que la definición de 1994 no resolvió adecuadamente el problema de la uniformidad perceptiva, la CIE refinó su definición en 2000 ( $\Delta E_{00}$ ) agregando cinco correcciones:

- Un término de rotación de tono ( $R_T$ ), para tratar la región azul problemática (ángulos de tono cercanos a  $275^\circ$ )
- Compensación por colores neutros (los valores imprimados en las diferencias  $L^* C^* h$ )
- Compensación por ligereza ( $S_L$ )
- Compensación por croma ( $S_C$ )
- Compensación por matiz ( $S_H$ )

Actualmente, los algoritmos para la diferencia de color CIE  $\Delta E_{00}$  es el más complicado, aunque más preciso. Las correspondientes ecuaciones son las siguientes:

$$\Delta E_{00}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \frac{\Delta H'}{k_H S_H}}$$

$$\Delta L' = L_2^* - L_1^*$$

$$\bar{L} = \frac{L_1^* + L_2^*}{2} \quad \bar{C} = \frac{C_1^* + C_2^*}{2}$$

$$a_1' = a_1^* + \frac{a_1^*}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^{\eta'}}{\bar{C}^{\eta'} + 25^{\eta'}}}\right) \quad a_2' = a_2^* + \frac{a_2^*}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^{\eta'}}{\bar{C}^{\eta'} + 25^{\eta'}}}\right)$$

$$\bar{C}' = \frac{C_1' + C_2'}{2} \quad \text{and} \quad \Delta C' = C_2' - C_1' \quad \text{where} \quad C_1' = \sqrt{a_1'^2 + b_1'^2} \quad C_2' = \sqrt{a_2'^2 + b_2'^2}$$

$$h_1' = \text{atan2}(b_1', a_1') \quad \text{mod } 360^\circ, \quad h_2' = \text{atan2}(b_2', a_2') \quad \text{mod } 360^\circ$$

$$\Delta h' = \begin{cases} h_2' - h_1' & |h_1' - h_2'| \leq 180^\circ \\ h_2' - h_1' + 360^\circ & |h_1' - h_2'| > 180^\circ, h_2' \leq h_1' \\ h_2' - h_1' - 360^\circ & |h_1' - h_2'| > 180^\circ, h_2' > h_1' \end{cases}$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C_1' C_2'} \sin(\Delta h'/2), \quad \bar{H}' = \begin{cases} (h_1' + h_2' + 360^\circ)/2 & |h_1' - h_2'| > 180^\circ \\ (h_1' + h_2')/2 & |h_1' - h_2'| \leq 180^\circ \end{cases}$$

$$T = 1 - 0.17 \cos(\bar{H}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{H}') + 0.32 \cos(3\bar{H}' + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\bar{H}' - 63^\circ)$$

$$S_L = 1 + \frac{0.015(\bar{L} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L} - 50)^2}} \quad S_C = 1 + 0.045\bar{C}' \quad S_H = 1 + 0.015\bar{C}' T$$

$$R_T = -2\sqrt{\frac{\bar{C}^{\eta'}}{\bar{C}^{\eta'} + 25^{\eta'}}} \sin\left[60^\circ \cdot \exp\left(-\left[\frac{\bar{H}' - 275^\circ}{25^\circ}\right]^2\right)\right]$$

La diferencia de color  $\Delta E_{00}$  mantiene la ponderación correcta a medida que la luminosidad se desvanece de blanco a negro. La discontinuidad más significativa ocurre cuando los tonos comparados son  $180^\circ$  uno del otro (forzando un cambio de matiz en el cálculo). Según la CIE, esto podría crear una discontinuidad de  $\Delta E = 0.2734$  u., lo que, para la mayoría de casos en general, excepto los de alta precisión, resulta insignificante.

En la actualidad, la digitalización de la información ofrece herramientas en internet, con webs en las que es posible calcular diferencias de color. Como ejemplo:



- <http://colormine.org/delta-e-calculator/cie2000>
- <https://www.periciadocumental.es/index.php/2016/07/07/comprobar-color-mediante-delta-e/>
- **Otras fórmulas utilizadas para la medida de la diferencia de color.**
- **CMC:** (Color Measurement Committee of The Society of Dyers and Colourists) desarrolló y adoptó una fórmula basada en los valores L\*C\*H\*. En 1984 el Comité para la Medición del Color de la Sociedad de Fabricantes de Tintes y Colorantes Británica. Esta fórmula permite el ajuste de los factores de luminosidad y croma.

$$\Delta E_{CMC} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{cS_c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{S_H}\right)^2}$$

Una de las ventajas de la ecuación CMC es que corrige una de las mayores deficiencias del sistema CIELAB, la dependencia con la posición de la saturación. (Carranza, 2012). CMC y BFD (una mejora de la CMC) son alternativas a veces superiores a las fórmulas CIE recomendadas actualmente CIELUV y CIELAB. (Melgosa et al., 1992)

- **CIECAM02**, que es el último modelo de apariencia del color adoptado por la CIE, pero no es un modelo neural. Las ventajas que tiene usar un modelo neural frente a uno que no lo es pueden ser múltiples. La primera y más obvia es que, si podemos emular con bastante precisión los resultados de apariencia de color y diferencias, cabe pensar que las suposiciones intermedias sobre la fisiología del sistema visual son correctas, con lo cual pueden ayudar a entender de una forma más profunda qué pasa en la etapa cortical del sistema visual humano, que es algo que todavía no está tan claro como lo que pasa en las primeras etapas del sistema visual. Y en segundo lugar, si tenemos un modelo neural flexible, también cabe pensar que será mucho más fácil adaptar el modelo a cualquier tipo de condición de visualización, e incluso a tipos de anomalías visuales. ATTD05, el cual es un modelo neural multietapa de visión del color, que obtiene buenas predicciones de colores relacionados, y además es capaz de predecir ciertos efectos de apariencia de color. Pese a ello es un modelo, que como todos los demás, no tendrá en cuenta aspectos, que pese a que en algunos casos pueden tener relación directa con el color percibido del objeto, serán considerados parámetros fijos. Nos referimos a aspectos como la forma del objeto, el tamaño, la distancia, la profundidad o el movimiento (Chorro, 2011).

#### 4.5. EVALUACIÓN DE LA DISCRIMINACIÓN VISUAL DEL COLOR

##### - Prueba de Farnsworth–Munsell 100 Hue

Esta prueba fue desarrollada por el Dr. Dean Farnsworth, comandante de la Marina de los Estados Unidos, en la primera mitad del siglo XX (Farnsworth, 1943).



**Figura 20.** *Test de Farnsworth-Munsell 100 Hue.*

Es un método para la detección de anomalías en la percepción del color, basado en la ordenación de cuatro series de fichas de color, con diferente tono, pero de igual claridad y croma (Figura 20). Consta de un total 93 cápsulas, 8 de ellas fijas como colores piloto, y otras 85 cápsulas móviles, numeradas en el reverso para poder comprobar la posición en la que han sido ordenadas. Las 4 series son:

- cápsulas 85 a 21 (de rojo ladrillo a verde)
- cápsulas 22 a 42 (de verde a azul-verdoso)
- cápsulas 43 a 64 (de azul-verdoso a violeta)
- cápsulas 65 a 84 (de violeta a rojo ladrillo)

Esta prueba debe realizarse a 50 cm de observación, y el sujeto ha de ordenar las cápsulas de cada serie en un tiempo de controlado de 2 minutos.

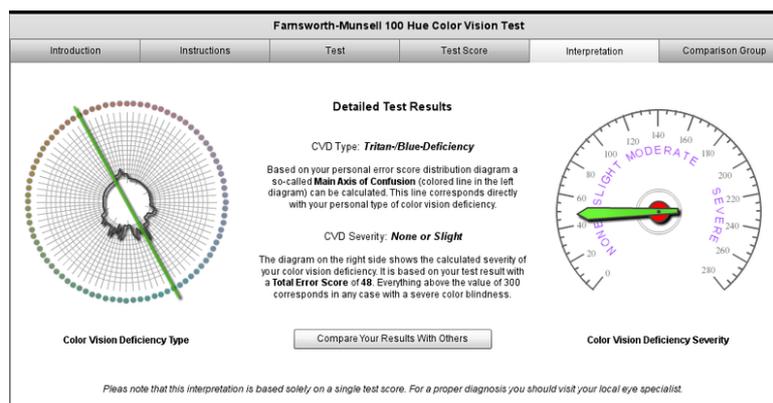
Como resultado, se obtiene una puntuación en una escala de 0 a 100, siendo el valor más bajo indicativo de la mayor precisión. Así, este examen clasifica a los observadores en visión de color normal y tipos de discriminación visual de color baja, media o alta. Además, identifica la zona dónde reside la confusión de color. Para ello, la secuencia de ordenación se representa en un diagrama radial (Figura 21) de manera que la confusión entre colores define un eje de ordenación en una dirección determinada que indica el tipo de diferencia. Por otro lado, la amplitud de los picos indica el grado de severidad, de manera que una ordenación correcta de las cápsulas produce un círculo de puntos cercano al centro del diagrama, y se consideran

dentro de la normalidad los gráficos con pequeñas irregularidades. Los individuos con defectos de la visión del color, producirán patrones característicos de confusión entre las cápsulas de tonos similares, que en general se encuentran confinadas a áreas restringidas y localizadas en posiciones opuestas en la gráfica (Figura 22):

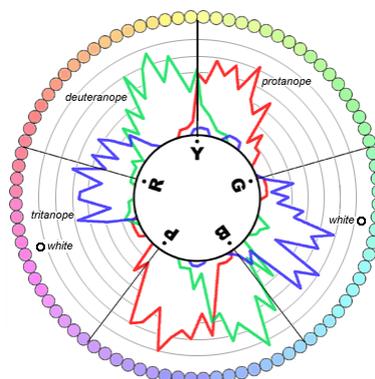
- Los defectivos deután están en el eje 62-70.
- Los defectivos tritán están en el eje 56-61.
- Los defectivos protán están en el eje 46-52.

Para cuantificar si el defecto es leve, moderado o severo, se suman los valores de la secuencia de resultados entre sí, y al total se resta 170 (85 x 2) ya que cada valor igual a 2 corresponde a error 0. De esta forma:

- si el resultado es < 120 el defecto es leve.
- si está entre 120-190 es moderado.
- si el resultado es > 190 es severo.



**Figura 21.** Representación gráfica de resultados de la prueba FM100Huel.



**Figura 22.** Representación del error de daltónicos según el tipo.

Aproximadamente, un 99% de las mujeres y un 92% de los hombres poseen lo que se denomina una “visión normal”.



#### 4.6. ESTUDIOS DE DISCRIMINACIÓN VISUAL

Existen algunos estudios de umbrales de discriminación visual pero pocos que se arriesguen a dar un valor numérico, a la mínima discriminación visual del ojo humano.

Como se ha comentado en apartados anteriores, en las elipses de Mac Adam hay mayor dificultad para diferenciar en el color verde (elipses más grandes) que en el azul (elipses de menor tamaño) y darle valor a esto sería un avance muy importante para la colorimetría en general, siempre y cuando tengamos en cuenta y especifiquemos con que método medimos la diferencia de color.

Entre los escasos estudios que establecen umbrales de discriminación visual en alimentos, destacan los de (Martínez et al., 2001) en vinos tintos, y el de (Fernández-Vázquez et al., 2013) en zumos de naranja.

El estudio de (Martínez et al., 2001) se realiza sobre 15 vinos tintos, medidos mediante espectrofotometría y espectrorradiometría, para evaluar el umbral de percepción de diferencias de color cuando se comparan dos muestras. En el estudio se incluyen observadores entrenados y no entrenados en la evaluación del color. Se pone de manifiesto que, cuando cambiaban las condiciones de observación (iluminante, longitud de onda, efectos del vidrio...) la percepción se modifica también para el observador. Por este hecho no consiguieron calcular el valor exacto de la mínima discriminación visual que tiene el ojo humano, y por tanto darle un valor numérico.

El estudio de Fernández-Vázquez et al. (2013), se realiza sobre zumos de naranja. Inicialmente se lleva a cabo la evaluación metodológica de las condiciones de medida del color estableciendo aquéllas en las que se van a realizar las pruebas (todas bajo las mismas condiciones), lo que supone un avance respecto al estudio anterior. Las condiciones establecidas son en cabina de iluminación controlada, utilizando un emulador del iluminante estándar D65, con entorno gris medio y fondo blanco, y las muestras se observaron con un espesor fijo, en cubetas de 2 mm. Como conclusión del estudio se establece que la mínima discriminación visual en humanos entrenados es de 1.5 unidades CIELAB, y para los no entrenados de 2.8 unidades CIELAB, lo que supone un avance con respecto al estudio anterior ya que establecen dos valores para la mínima discriminación visual.

En otras aplicaciones industriales, el estudio de Rade et al. (2015) se desarrolló con el objetivo de determinar el 50% del umbral de perceptibilidad y el 50% del umbral de aceptabilidad de la cerámica dental en entornos clínicos simulados. Se determinó la radiancia espectral de 63



muestras de cerámica monocromática utilizando un espectrorradiómetro, para medidas sin contacto. Se seleccionó un total de 60 pares de muestras, divididas en 3 conjuntos de 20 pares de muestras (tonos medios a claros, tonos medios a oscuros y tonos oscuros), para el experimento psicofísico. Cada sitio de investigación tenía 25 observadores, divididos en cinco grupos de cinco observadores: dentistas, D, estudiantes de odontología, S, auxiliares dentales, A, técnicos dentales, T y laicos, L. Hubo 35 observadores por grupo (5 observadores por grupo en cada sitio  $\times$  7 sitios), para un total de 175 observadores. Las comparaciones visuales de color se realizaron utilizando una cabina de visualización. La aproximación difusa de Takagi-Sugeno-Kang (TSK) se utilizó para ajustar los puntos de datos. La media de diferencia de color percibida y la media de aceptabilidad se determinaron mediante CIELAB y CIEDE2000, encontrándose diferencias entre ambas fórmulas: en el espacio CIELAB ( $\Delta E_{ab}$ ), la media de diferencia de color percibida fue 1.2 u. y la media de aceptabilidad 2.7 u., y los valores correspondientes en CIEDE2000 ( $\Delta E_{00}$ ) fueron 0.8 y 1.8 u., respectivamente. Los grupos de observadores mostraron un alto nivel de diferencia estadística en todos los umbrales. Así, los umbrales de diferencia de color visual pueden servir como una herramienta de control de calidad para la selección de materiales dentales estéticos, evaluar el rendimiento clínico e interpretar hallazgos visuales e instrumentales en odontología clínica, investigación dental y posterior estandarización.

En otro estudio (Huang et al., 2012) se investiga el desarrollo de los espacios de color uniformes y las fórmulas de diferencia de color para predecir las diferencias de color umbral. Para ello se utilizaron evaluaciones visuales de 893 pares de parches de color impresos, realizadas bajo una fuente D65. La diferencia de color CIELAB ( $\Delta E^*_{ab}$ ) promedio de los pares fue de 1.1 unidades. Se repitió un experimento psicofísico umbral tres veces por parte de un panel de 16 observadores con visión de color normal. Con los datos experimentales se evaluaron nueve fórmulas de diferencia de color y espacios de color uniformes usando la medida de suma de cuadrados residual estandarizada. Los resultados indicaron que todas las fórmulas y espacios funcionan de manera muy similar entre sí, y superan a CIELAB en las diferencias de color umbral.





## 5. CONCLUSIONES

Tras la revisión bibliográfica realizada con los objetivos propuestos en este Trabajo Fin de Grado, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La percepción del color es un proceso influenciado por múltiples factores, tanto externos (iluminación, ángulo de visión...) como de la fisiología del individuo (capacidad, anomalías visuales...).
- La diferencia de color es un aspecto fundamental en el ámbito general y, de manera especial, en aplicaciones como artes gráficas, estética o los alimentos.
- La percepción de diferencias de color entre muestras depende de factores como la capacidad del observador, de la región de color evaluada o la posición de las muestras que se comparan.
- La medida de la diferencia de color se puede realizar mediante la aplicación de diferentes fórmulas propuestas por la CIE. Las más avanzadas tienen en cuenta coeficientes de ponderación que consideran los factores de percepción.
- Son escasos los estudios relacionados con el establecimiento de umbrales de percepción de diferencias de color, probablemente debido a la propia dificultad que entrañan dada la cantidad de factores que influyen.
- Desde mi punto de vista, parece fundamental establecer sistemáticamente las condiciones (iluminación, ángulo y distancia de observación, región del espectro visible evaluada, capacidad de visión y discriminación del color del observador...) en las que se realiza el experimento para obtener datos concluyentes. Esto podría constituir un posible futuro estudio.



## 6. BIBLIOGRAFÍA

- ADAM.INC. El daltonismo [En línea]. MedlinePlus. 2016. Disponible en: <https://medlineplus.gov/ency/article/001002.htm>
- Alberich J, Gómez Fontanills D, Ferrer Franquesa A. Percepción Visual. Universitat Oberta de Catalunya. 2012. [consulta: diciembre 2017]. Disponible en [https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Disseny\\_grafic/Diseno\\_grafico/Diseno\\_grafico](https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Disseny_grafic/Diseno_grafico/Diseno_grafico)
- Análisis del color: colorimetría y colorímetro. Disponible en: (<https://www.quiminet.com/articulos/el-analisis-de-color-colorimetria-y-colorimetro-2704601.htm>)
- Asociación Daltónicos No Anónimos. Tipos de daltonismos. Disponible en: <http://asdna.org/tipos-de-daltonismos/>
- Balestrini, M. Teoría de la luz. Colorimetría. 2008. [consulta: diciembre 2017] Disponible en <https://tallerdecelumetraj.es.wordpress.com/2008/07/16/teoria-de-la-luz-colorimetria>
- Brown, W. R. J., MacAdam, D. L. Visual Sensitivities to Combined Chromaticity and Luminance Differences. Journal of the Optical Society of America. 1949
- Calculadora de delta E. Disponible en: <http://www.colormine.org/delta-e-calculator>
- Capilla P., Artigas J.M., Pujol J. Fundamentos de colorimetría. Publicaciones de la Universidad de Valencia, 2002.
- Carranza Gallardo J. Manejo de las fórmulas de diferencias de color vs límites de aceptabilidad. 2012(1). Disponible en: [http://www.cenam.mx/memorias/descarga/simposio\\_2002/doctos/te017.pdf](http://www.cenam.mx/memorias/descarga/simposio_2002/doctos/te017.pdf)
- CIE 15:2004. Technical Report. Viena 2004
- CIE 159:2004. A colour appearance model for colour management systems: CIECAM02. Viena 2004
- CIE (2007). Standard Illuminants for Colorimetry. ISO, 11664–2, 2007.
- CIE 2004. Standard Method of Assessing the Spectral Quality of Daylight Simulators for Visual Appraisal and Measurement of Colour ISO 23603:2005(E)/CIE S 012/E:2004.
- Clínicas Novovision. Disponible en: <https://www.clinicasnovovision.com/blog/actualidad-novovision/n/implante-iris-artificial-en-novovision/>
- Chorro Calderón Elisabeht. Procesado cortical y uniformidad del espacio de color. Alicante.(2011)
- Conceptos básicos de la norma. Disponible en: <https://solidacolor.es/iso-12647-conceptosbasicos-de-la-norma/>



- Colombo E, O`Donell, B. Luz, color y visión. Seminario de Iluminación Eficiente. Universidad Tecnológica Nacional y ELI. Argentina. [Fecha de consulta: diciembre 2017]. Disponible en: <http://www.edutecne.utn.edu.ar/eli-iluminacion/cap02.pdf>
- Cortés Parejo J. La percepción del color. 2000. E.T.S. Ingeniería Informática. Universidad de Sevilla. [consulta: diciembre 2017]. Disponible en: [https://personal.us.es/jcortes/Material/Material\\_archivos/Articulos%20PDF/Color.pdf](https://personal.us.es/jcortes/Material/Material_archivos/Articulos%20PDF/Color.pdf)
- Diagnóstico del daltonismo. Test de Ishihara. Salud al día. Fuente: <https://www.webconsultas.com/daltonismo/diagnostico-del-daltonismo-2633>
- Directrices para la administración y puntuación del test Farnsworth-Munsell de 100 tonos. Farnsworth-Munsell100\_tratamiento.Datos.pdf.
- Delta E01. Repositorio GitHub Pages. [Fecha de consulta: diciembre 2017]. Disponible en: <http://zschuessler.github.io/DeltaE/learn/>
- Farnsworth, Dean (1943). The Farnsworth–Munsell 100-Hue and Dichotomous Tests for Color Vision. *Journal of the Optical Society of America*. 33 (10): 568–574
- Fernández Vázquez, R. El color de los zumos cítricos: implicaciones sensoriales y desarrollo metodológico. 2013. Universidad de Sevilla.
- Hutchings, J.B. Food Colour and Appearance in Perspective. En: *Food Colour and Appearance*. Ed. Spriger. Boston, MA. 1994.
- Min Huang, Haoxue Liu, Guihua Cui, M. Ronnier Luo y Manuel Melgosa. Evaluación de las diferencias de color umbral usando muestras impresas. 2012.
- J. M. Artigas; P. Capilla; J. Pujol Tecnología del color. Publicaciones de la Universidad de Valencia, 2002
- Josantonius J. El sentido de la vista: Enfermedades, defectos y problemas. 2012. p. 3. Disponible en: <http://josantonius.blogspot.com.es/2010/12/el-sentido-de-la-vista-enfermedades.html>
- Jeanionil Jimeno. Revista educativa Tiposde.com. Equipo de redacción profesional. (2017, 07). Tipos de daltonismo. Disponible en: <https://www.tiposde.com/daltonismo.html>.
- JOEZACK.COM [consulta: diciembre 2017]. Disponible en: <http://colormine.org/delta-e-calculator/cie2000>
- Konica Minolta. Precise Color Communication. [consulta: diciembre 2017]. Disponible en:
  - <https://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/part4/08.html>
  - <https://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/part5/03.html>



- Luque M.J, de Fez M.D, Díez M.A, 2001. Directrices para la administración y puntuación del test Farnsworth-Munsell de 100 tonos. Ver y Oír.
- Martínez J.A, Melgosa M, Pérez M.M, Hita E, Negueruela A.I. Visual and Instrumental Color Evaluation in Red Wines. 2000. Food Science & Technology International, 7, 439-444 (2001)
- Melgosa M. Testing CIELAB-Based Color-Difference Formulas. Color Res Appl. 2000; 25(1):49-55.
- Melgosa M, Hita E, Romero J, Jiménez del Baro L. Algunas diferencias clásicas del color calculadas con nuevas fórmulas.(1992)
- Materiales de laboratorio. Consultado en <https://materialesdelaboratorio.pro/colorimetro/>
- Micrograma. Que es delta E. Consultado en: [https://www.microgamma.com/calibracion\\_perfilacion\\_monitores/delta\\_e.php](https://www.microgamma.com/calibracion_perfilacion_monitores/delta_e.php)
- Mirjalili F, Ronier M, Cui G, Morovic J. Formula de diferencia de color para evaluar pares de colores sin separación.  $\Delta E_{NS}$ . (2019)
- Munsell FM 100 Hue Test Installation Instructions. 2000; 2000.
- Mgmdenia's blog. Blog de Mercedes González Mas. Disponible en: <https://mgmdenia.wordpress.com/2013/01/16/el-ojo-humano-y-sus-anomalias/>
- Pericia documental. Comprobar el color mediante delta E. Disponible en: <https://www.periciadocumental.es/index.php/2016/07/07/comprobar-color-mediante-delta-e/>
- Puell Marín, M<sup>a</sup> Cinta. Óptica Fisiológica. El sistema Óptico del ojo y la visión binocular. Universidad Complutense de Madrid. Versión digital. [consulta: diciembre 2017] Disponible en: [http://eprints.sim.ucm.es/14823/1/Puell\\_%C3%93ptica\\_Fisiol%C3%B3gica](http://eprints.sim.ucm.es/14823/1/Puell_%C3%93ptica_Fisiol%C3%B3gica)
- Quantotec. Color y luz colorimetría. Cabina de luces e iluminantes. Disponible en <http://www.quantotec.com/sp/Colorimetria.htm>
- ¿Qué es un estándar de impresión? La norma ISO12647:2. Disponible en: <http://www.cevagraf.coop/blog/que-es-un-estandar-de-impresion-12647-2/>
- Rade D. Paravina , Razvan Ghinea, Luis J. Herrera , Alvaro D. Bona, Christopher Igiel, Mercedes Linninger, Maiko Sakai , Hidekazu Takahashi, Esam Tashkandi, María del Mar Pérez. Umbrales de diferencia de color en odontología. Houston (EEUU) 2015.
- Revista educativa Partesdel.com, equipo de redacción profesional. (2017, 03). Partes del ojo humano. Obtenido en fecha 11, 2019. Disponible en: [https://www.partesdel.com/ojo\\_humano.html](https://www.partesdel.com/ojo_humano.html)



- Rocío Fernández-Vázquez, Carla M. Stinco, Dolores Hernanz, Francisco J. Heredia, Isabel M. Vicario. Colour training and colour differences thresholds in orange juice. *Food Quality and Preference* 30 (2013) 320–327.
- Rough profiler. Cálculo de la diferencia entre dos colores Delta E. Disponible en: <http://www.jpereira.net/rough-profiler/validar-perfil-color-icc-delta-e>
- Schmeling M. Selección de color y reproducción en Odontología. *Int. J. Dental Sc.*, 19-1 (2017): 23-32.
- Suero M. I., Pérez A. L. y Pardo P. J. Investigación en Visión del Color y aplicaciones en el Laboratorio de Óptica de la Universidad de Extremadura. *Opt. Pura Apl.* 40 (1) 79-85 (2007)
- Test de Daltonismo. Prueba online gratuita en segundos. Disponible en: <http://www.daltonismo.es/>
- Test de Ishihara de 38 Láminas.: 7190033. Disponible en: [http://www.promocionoptometrica.com/\\_articulos/articulo0000350/articuloficheros/Test\\_de\\_Ishihara\\_38\\_Laminas.pdf](http://www.promocionoptometrica.com/_articulos/articulo0000350/articuloficheros/Test_de_Ishihara_38_Laminas.pdf)
- Visión borrosa o distorsionada a todas las distancias. IMO. Disponible en: <https://www.imo.es/es/vision-borrosa-distorsionada-todas-distancias>
- Wood, M. MacAdam Ellipses. *Out of the Wood*. 2010
- Wyszecki G, Stiles W.S. *Color Science. Concepts and Methods. Quantitative Data and Formulae*. 1982. New York. John Wiley&Sons, Inc.