

Visión Artificial

Tema 1. Introducción a los sistemas de percepción

Índice

Esquema

Ideas clave

- 1.1. ¿Cómo estudiar este tema?
- 1.2. Objetivos
- 1.3. Funcionamiento del sistema auditivo
- 1.4. Percepción visual

A fondo

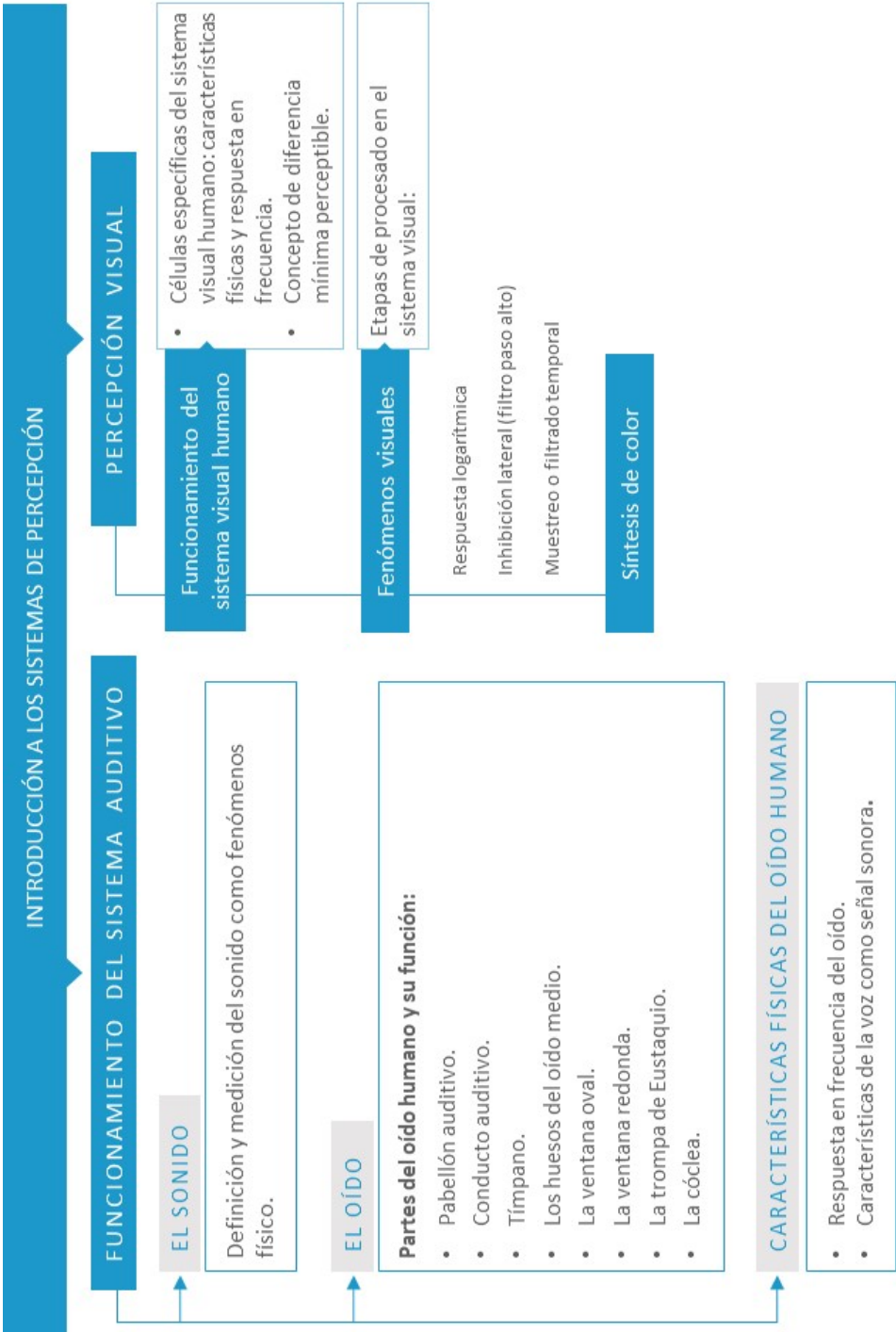
Charla TED sobre la creación de sistemas artificiales de percepción

Hear-it

Spie

Bibliografía

Test



1.1. ¿Cómo estudiar este tema?

Para estudiar este tema deberás leer con atención las ideas clave que se desarrollan a continuación.

En el presente tema veremos con detalle los sistemas de percepción del ser humano: el sistema auditivo y el sistema visual.

Sistemas de percepción

Sistema auditivo

- ▶ Definición y medición del sonido como fenómeno físico.
- ▶ Partes del oído humano y su función:
 - Oído interno.
 - Oído medio.
 - Oído externo.
- ▶ Respuesta en frecuencia del oído.
- ▶ Características de la voz como señal sonora.

Sistema visual

- ▶ Células específicas del sistema visual humano: características físicas y respuesta en

frecuencia.

- ▶ Concepto de diferencia mínima perceptible.
- ▶ Etapas de procesado en el sistema visual:
 - Respuesta logarítmica.
 - Inhibición lateral (filtro paso alto).
 - Muestreo o filtrado temporal.
- ▶ Síntesis de color.

1.2. Objetivos

El objetivo de este tema es comprender los **mecanismos de captación de señales auditivas y visuales** por parte del ser humano. Estos sistemas sirven de referencia en la implementación de técnicas artificiales de percepción, pues su arquitectura y funcionamiento trata, en muchos casos, de emular el funcionamiento de los sistemas biológicos que encontramos en la naturaleza.

Asimismo, el conocimiento de los procesos de recepción y transformación de estímulos en el ser humano, como la luz o el sonido, facilitará la comprensión de las técnicas de tratamiento de información descritas en temas posteriores de la asignatura.

1.3. Funcionamiento del sistema auditivo

El sonido

El sonido se define como una **perturbación mecánica del medio** (elástico) por el que se propaga en forma de onda. El sonido resulta de la vibración de ida y vuelta de las partículas del medio a través del cual se mueve dicha onda. Si una onda de sonido se mueve de izquierda a derecha a través del aire, las partículas de aire se desplazarán hacia la derecha y hacia la izquierda a medida que la energía de la onda de sonido lo atraviesa.

La **caracterización física** del sonido permite su medición y evaluación cuantitativa ante diferentes fenómenos:

- ▶ La intensidad acústica de una onda sonora viene dada por la rapidez promedio del flujo de energía acústica a través de un área unitaria, midiéndose en W/m^2 .
- ▶ Los niveles sonoros son la medida de la energía sonora en dB. Se define el nivel de intensidad (NI) de la siguiente forma:

$$NI = 10 \log (I/I_{ref})$$

Donde

I_{ref} es la **intensidad de referencia**. Esta representa el umbral de audibilidad a 1 KHz en el aire libre y viene dada por:

$$I_{ref} = 10^{-12} W/m^2$$

En este apartado se estudiará cómo el cuerpo humano es capaz de captar y procesar estas ondas sonoras. Para ello, en primer lugar, se lleva a cabo una

descripción del oído como órgano fundamental en la captación y transducción de estas señales.

El oído

El oído es el órgano encargado de la transmisión de sonidos hasta el cerebro. En él, se distinguen tres partes diferentes: **oído externo, oído medio y oído interno**.

La siguiente imagen muestra la estructura del oído, observándose cada uno de los elementos que lo componen. Además de ser el responsable del sentido del equilibrio, el oído detecta y convierte las señales sonoras en impulsos eléctricos capaces de ser conducidos a través del sistema nervioso.

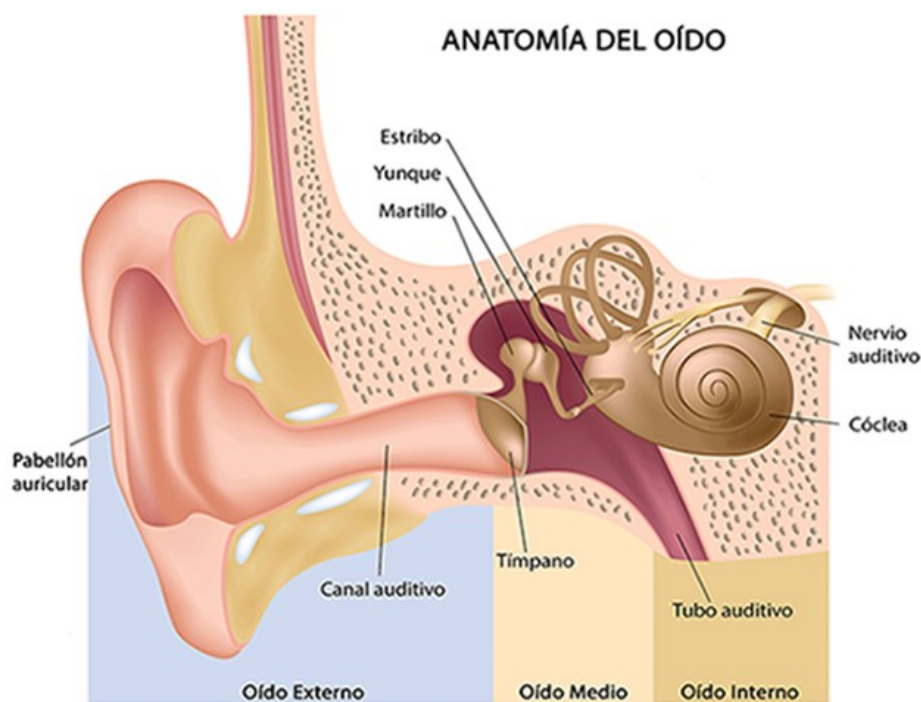


Figura 1. Estructura del oído. Detalle de los elementos que componen oído externo, medio e interno.

Fuente: <https://www.medicaloptica.es/salud-auditiva/como-funciona-el-oido>

Oído externo

La **función** del oído externo es recoger las ondas sonoras procedentes del entorno.

Hace las veces de una antena; de hecho, su forma contribuye a reducir la impedancia o resistencia para las ondas, que capta las señales sonoras y las redirige hacia el interior.

Los **elementos** que componen el oído externo son el pabellón auditivo, el conducto auditivo y el tímpano. A continuación, se indica cada una de sus partes y sus correspondientes funciones en el proceso de captación de sonidos:

- ▶ **Pabellón auditivo:** El pabellón auditivo o, como se conoce comúnmente, **oreja**, se trata de la única parte externa y visible del oído y se caracteriza por su forma helicoidal. Funciona como una antena receptora de señales sonoras, que son captadas y dirigidas hacia el interior del oído. La **presión en el interior** del oído es mayor que en el exterior, debido a la mayor compresión del aire contenido, por lo que las ondas no penetrarían si no estuviéramos dotados del pabellón auditivo. Este actúa como una interfaz entre el interior y el exterior, disminuyendo la resistencia que la parte interior del oído ofrece a las ondas sonoras y suavizando la diferencia de presión existente. Como resultado, un mayor flujo de sonido es capaz de penetrar en el conducto auditivo.
- ▶ **Conducto auditivo:** Las ondas captadas por el pabellón auditivo son conducidas hacia el tímpano mediante el conducto auditivo. La longitud de este conducto es de dos a tres centímetros. La forma curvada en su extremo permite proteger el tímpano de, por ejemplo, insectos o impurezas que pudieran llegar hasta él. Además, el conducto auditivo se encuentra recubierto de cera (cerumen), que contribuye a impedir la entrada de materias perjudiciales como polvo o suciedad. Sin embargo, la protección del tímpano no es su función principal. El conducto auditivo amplifica los sonidos bajos y menos penetrantes de la voz humana, actuando como un **audífono**. De este modo, el oído subsana parte de la debilidad de la señal de voz, facilitando la escucha y comprensión de una conversación normal.
- ▶ **Tímpano:** La membrana timpánica o tímpano es una fina membrana situada en el

extremo final del conducto auditivo. Supone el final del oído externo y el comienzo del oído medio. El tímpano posee una **gran sensibilidad**, de forma que las ondas de sonido que penetran en el oído hacen que vibre. Estas vibraciones, debidas a la presión de la señal entrante, son transmitidas hacia el interior del oído para su posterior transformación y procesado.

Oído medio

El oído medio es la parte del oído comprendida entre el tímpano y la ventana oval. Lleva a cabo la **transmisión de señales de sonido** desde el oído externo hasta el oído interno. Se compone de tres huesos conectados entre sí: martillo, yunque y estribo; además de la ventana oval, la ventana redonda y la trompa de Eustaquio.

- ▶ Los huesos del oído medio: las vibraciones del tímpano se transmiten al interior del oído a través de los tres huesos del oído medio: **martillo, yunque y estribo**. Estos transmiten las vibraciones del tímpano como consecuencia de la onda sonora entrante hacia el interior del oído. El estribo es el último de esta cadena de huesos y está conectado con la ventana oval, donde tiene lugar la siguiente etapa de percepción del sonido.
- ▶ La ventana oval: es una fina membrana que recubre el extremo de la cóclea expuesto hacia los huesos del oído medio. Actúa como un **amplificador acústico** previo al oído interno para las señales sonoras transmitidas desde el tímpano a la ventana oval. De hecho, se estima que la presión de la señal sonora es aproximadamente veinte veces superior en la ventana oval respecto al tímpano. Este aumento se debe al mayor tamaño de la superficie de la membrana timpánica en comparación con la de la ventana oval. Una misma fuerza, en este caso, ejercida por la perturbación sonora sobre las partículas del medio, conlleva un aumento de presión cuando se aplica sobre una superficie menor.

- ▶ La trompa de Eustaquio: es parte del oído medio y supone una **vía de comunicación entre el oído y la parte posterior del paladar**. Es la encargada de equiparar el nivel de presión entre las dos caras de la membrana timpánica, igualando la presión del aire en el interior y exterior del oído. Este conducto se abre cuando realizamos la acción de tragar, permitiendo la entrada de aire. Si en el oído se acumula, es decir, el interior del tímpano está sometido a una mayor presión del aire respecto al exterior, se impide que esta membrana vibre adecuadamente. Como consecuencia, se reduce la capacidad auditiva. En escenarios en los que la presión ambiental cambia con rapidez es habitual padecer esta diferencia de presión entre el oído y el exterior. Este es el caso de los vuelos en avión o la travesía por montañas elevadas.

Oído interno

Es la última parte del oído y supone la conexión de este con el cerebro; contiene la cóclea como elemento principal.

- ▶ La cóclea: esta lleva a cabo la transformación de las ondas sonoras en **impulsos eléctricos capaces** de ser transmitidos al cerebro a través de las conexiones nerviosas. Posteriormente, el cerebro traduce estos impulsos en estímulos que podemos reconocer y entender.
- La cóclea, con forma de concha de caracol, contiene dos membranas cercanas entre sí y está rellena por un fluido conocido como perilinfa. Estas membranas forman la membrana basilar, una especie de pared de separación en la cóclea.
- La membrana basilar tiene un pequeño orificio, helicotrema, que permite el movimiento del fluido de un lado al otro de la membrana basilar. El helicotrema garantiza que las vibraciones de la ventana oval se transmitan a todo el fluido que

rellena la cóclea.

- A su vez, el interior de la membrana contiene miles de microscópicas fibras pilosas (24 000 fibras aproximadamente). Estas se mueven como consecuencia del movimiento del fluido en el interior de la cóclea. Existen diferentes tipos de fibras, todas ellas conectadas al nervio auditivo. En función de la naturaleza de los movimientos de la perilinfa, diferentes tipos de fibras se ponen en movimiento y generan impulsos eléctricos en el nervio auditivo.
- ▶ El nervio auditivo es el canal de comunicación que conecta la cóclea con el cerebro. Cuando las células pilosas que se mencionaban previamente se mueven, el nervio transmite la señal eléctrica resultante hasta la zona del cerebro responsable de la audición. Allí, los sonidos captados se interpretan y asimilan. Por tanto, el rol de estas células pilosas es esencial para nuestra capacidad de audición. Si estas fibras resultaran dañadas, nuestra capacidad auditiva se vería severamente deteriorada.

El oído humano es capaz de captar ondas sonoras en el rango entre los 20 Hz y los 20 KHz de frecuencia. Las ondas por debajo y por encima de estos límites se denominan infrasonidos y ultrasonidos, respectivamente.

Los sonidos pueden distinguirse gracias a las propiedades de resonancia de la **membrana basilar**, que permite identificar ondas sonoras de diferente frecuencia. Esta membrana tiene propiedades mecánicas que varían desde su base hasta el vértice:

- ▶ La base es más fina, tiene menor masa y elasticidad.
- ▶ En el vértice, al contrario, tanto la masa como la elasticidad de la membrana son

mayores. Así, la amplitud del movimiento de la membrana ante la excitación producida por una onda sonora está más cerca de la base para frecuencias de onda mayores.

- Esta amplitud de pico se encuentra más próxima al vértice conforme disminuye la frecuencia de la onda entrante. Por tanto, esta membrana basilar actúa como un banco de filtros paso-banda que dotan al oído de su capacidad selectiva en frecuencia.

Características físicas del oído humano

Por último, el oído está caracterizado por diferentes umbrales de funcionamiento. El **umbral de audibilidad** es el nivel de intensidad mínimo en espacio libre que el oído es capaz de oír. La máxima sensibilidad se tiene a 4 KHz.

A 120 dB, respecto al umbral de referencia, tenemos el **umbral de sensación**. A este nivel de intensidad se produce cierto cosquilleo en el oído. A partir de 140 dB se puede llegar a producir dolor.

Una de las ondas de mayor interés es la propia voz humana. Físicamente, se caracteriza por un rango frecuencial entre 300 Hz y 3.4 KHz. Por tanto, el ancho de banda asignado en telecomunicaciones para un solo canal de transmisión de voz suele ser de 4 kHz. Como se verá más adelante en la asignatura, este ancho de banda permite utilizar una frecuencia de muestreo de 8 kHz como base del sistema de modulación digital.

1.4. Percepción visual

Funcionamiento del sistema visual humano

La **visión** es el fenómeno resultante de la percepción del color, forma y distancia de los objetos en un espacio. La visión se produce como resultado de la incidencia de la luz, caracterizada como una onda electromagnética, sobre la retina del ojo.

Esta onda debe estar comprendida en un rango frecuencial (luz visible) para producir impresión visual. El color percibido depende de la frecuencia (longitud de onda) de la luz que incide sobre el objeto observado. Asimismo, el estado del propio ojo también influye en la percepción de los colores, como ocurre en el caso del daltonismo.

El comportamiento del ojo humano se asemeja al de una cámara fotográfica. La luz reflejada en los objetos se proyecta sobre un material fotosensible (**retina**) tras pasar a través de una lente (**crystalino**), tal y como se esquematiza en la siguiente imagen.

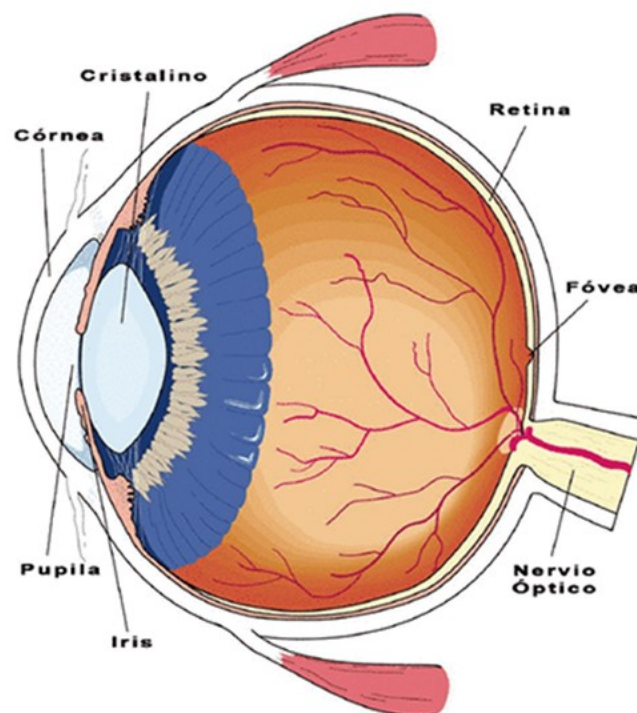


Figura 2. Diagrama simplificado de un corte de ojo humano. Fuente: <http://www.lucescei.com/estudios-y-eficiencia/extractos-libro-blanco-de-iluminacion/el-sistema-visual-humano/>

La zona visible del cristalino es la **pupila**, que regula el flujo de luz que entra en el ojo. El cristalino refracta los rayos de luz para que estos se focalicen en la zona adecuada de la retina. Gracias al cambio de tamaño de la pupila (cristalino), permite enfocar con precisión objetos cercanos y lejanos. Es decir, se adapta al entorno para producir el resultado de una visión satisfactoria.

La **retina** es una membrana interior y en ella se encuentran las células fotosensibles. Estas células son de dos tipos: conos y bastones.

Conos	Son menos numerosos y muy poco sensibles a la luz. Son las células encargadas de la visión diurna .
Bastones	Precisan de menor cantidad de luz que los conos para su excitación. Por tanto, son las células sensoriales responsables de la visión nocturna .

Figura 3. Tipos de células fotosensibles.

La siguiente gráfica muestra la distribución espacial de estas células en la retina, tomando como referencia el punto central de la retina o **fóvea**. Como puede apreciarse, los bastones se encuentran lejos de la fóvea, principalmente. Mientras, los conos se concentran en torno a esta.

Además, se aprecia la existencia de un **punto ciego en la retina**, carente de células fotosensibles, y que es el lugar desde el que parten los nervios ópticos hacia el cerebro.

La fóvea recibe la luz desde el centro del campo visual, es decir, desde el punto del espacio al que miramos directamente. Los conos, principalmente concentrados en esta zona, nos captan la luz procedente del punto focalizado y son responsables de la visión directa o central. En cambio, los bastones, más alejados de la fóvea, proporcionan visión periférica.

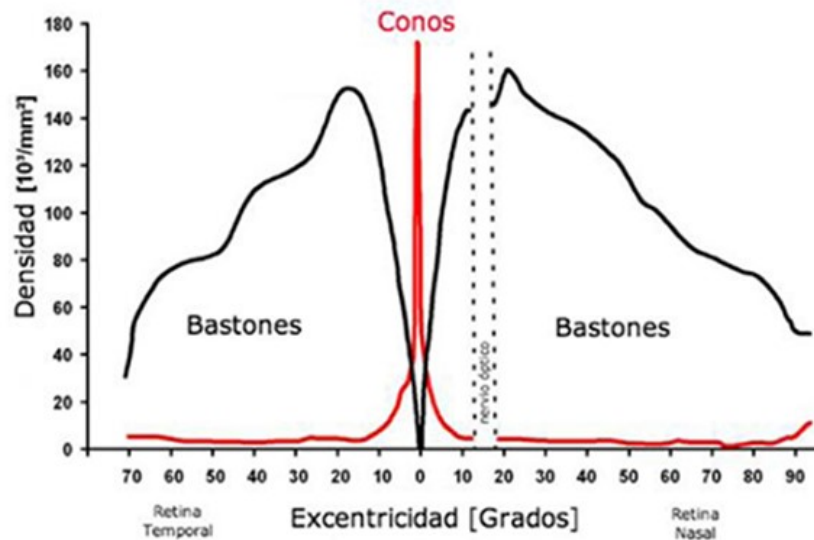


Figura 4. Distribución espacial de conos y bastones en la retina del ojo humano. Fuente: <https://idus.us.es/xmlui/>

Conos

Los conos actúan con filtros sobre la luz incidente en ellos. Así, los humanos tienen **tres tipos** de conos:

- ▶ El primero responde más a la luz de longitudes de onda largas, alcanzando un máximo a aproximadamente 560 nm. Este tipo de cono se designa mediante la letra **L (long)**.
- ▶ El segundo tipo de cono filtra la luz de longitud de onda media, alcanzando un máximo a 530 nm, y se abrevia mediante la letra **M (medium)**.
- ▶ El tercer tipo responde más a la luz de longitud de onda corta, alcanzando un máximo de 420 nm, y se designa mediante **S (short)**.

Estas longitudes de onda (L, M y S) se corresponden de forma aproximada con los colores **rojo, verde y azul** respectivamente. En el siguiente gráfico vemos la respuesta en frecuencia de los tres tipos de células cono a la luz. Los diferentes tipos de conos permiten percibir distintos colores. Estos se forman a partir de la diferente excitación de los tres tipos de células receptoras.

El color amarillo, por ejemplo, se percibe cuando los conos L se estimulan ligeramente más que los conos M, y el color rojo se percibe cuando los conos L se estimulan significativamente más que los conos M. De manera similar, los tonos azules y violetas se perciben cuando el receptor S se estimula más. Así, mediante la mezcla ponderada de los colores rojo, azul y verde somos capaces de construir la gama cromática perceptible por el ser humano.

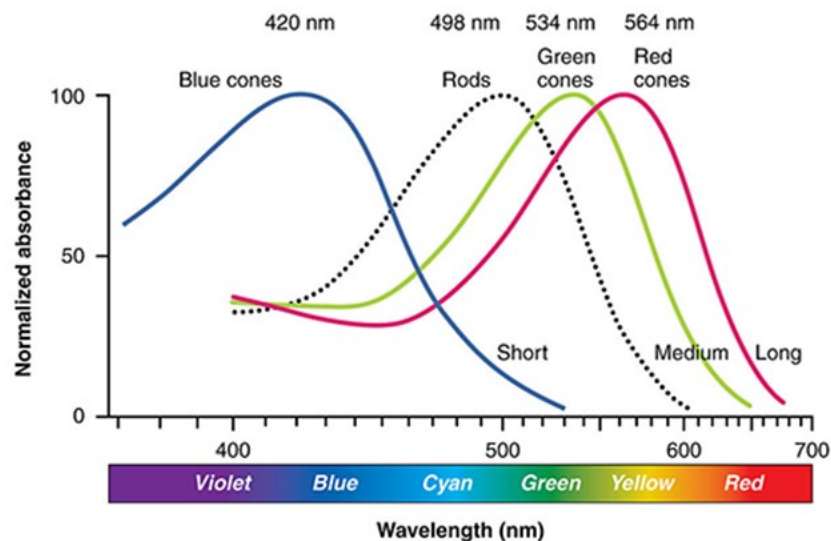


Figura 5. Respuesta en frecuencia de los tres tipos de conos: S (longitud de onda corta, azul), M (longitud de onda media, verde) y L (longitud de onda larga, rojo). Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1416_Color_Sensitivity.jpg

Bastones

Por otro lado, observamos que los bastones **no son sensibles al color** (frecuencia), dado que solo hay un tipo de bastón. Así es que estas células no permiten la formación de colores. Este es el motivo por el que en la oscuridad no somos capaces de distinguir ningún color.

Fenómenos visuales: respuesta logarítmica e inhibición lateral

Respuesta logarítmica

El concepto de *just noticeable difference* (JND) representa, en el ámbito de la psicofisiología, la mínima cantidad de variación ΔI en la magnitud de un estímulo I para que esta sea apreciada.

Por ejemplo, se observa como la siguiente imagen contiene dos áreas de intensidades diferentes. En este caso, dada la clara apreciación de ambas áreas, el incremento de intensidad aplicado sobre el área exterior es mayor a aquel dado por la JND.

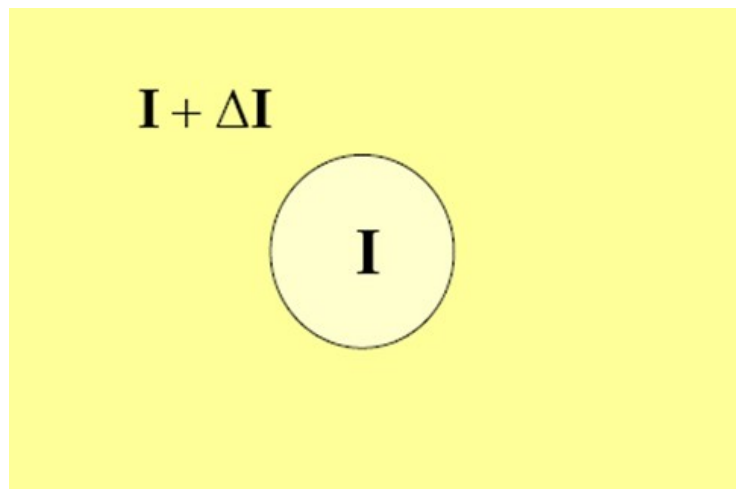


Figura 6. Ilustración del experimento llevado a cabo para la determinación de la JND en una imagen. Fuente:

www.tel.uva.es

En el siglo XIX, el psicólogo Ernst Weber determinó que existe una relación constante entre ΔI e I en un amplio rango de I . Es decir, la mínima variación necesaria para percibir un cambio en un estímulo se incrementa conforme el estímulo se hace más intenso. Matemáticamente, esta **Ley de Weber** se establece de la siguiente forma:

$$\Delta I / I = \lambda$$

En el marco de la percepción visual, en el que I representaría la cantidad de luz o intensidad percibida, conforme dicha intensidad es mayor, es preciso una variación ΔI más significativa de la misma para que sea apreciable. Por tanto, se concluye que esta **JND es diferente en zonas claras u oscuras de una imagen**.

Así, consideremos:

- ▶ Una imagen
 Im_0 oscura y su JND asociada, representada por ΔI_0 .
- ▶ Una imagen más clara,
 Im_1 con una JND representada por

$$\Delta I_1.$$

De acuerdo a la Ley de Weber, podemos comparar ambas JND y deducir que:

$$\Delta I_0 < \Delta I_1$$

Es decir, los cambios de intensidad en una imagen se aprecian mejor en zonas oscuras. Por tanto, estas zonas serán más sensibles a la presencia de ruido o artefactos de naturaleza aleatoria.

La Ley de Weber muestra, por tanto, que el incremento necesario en la intensidad del estímulo para resultar en una respuesta perceptiva similar aumenta para mayores valores de intensidad. Además, la relación entre la percepción del estímulo y la intensidad de este sigue una relación logarítmica.

Obsérvese el siguiente gráfico. Se ilustra cómo para obtener un incremento similar en la respuesta del ojo humano (en la percepción de la intensidad luminosa recibida), es necesario un mayor incremento de la intensidad de partida para intensidades mayores.

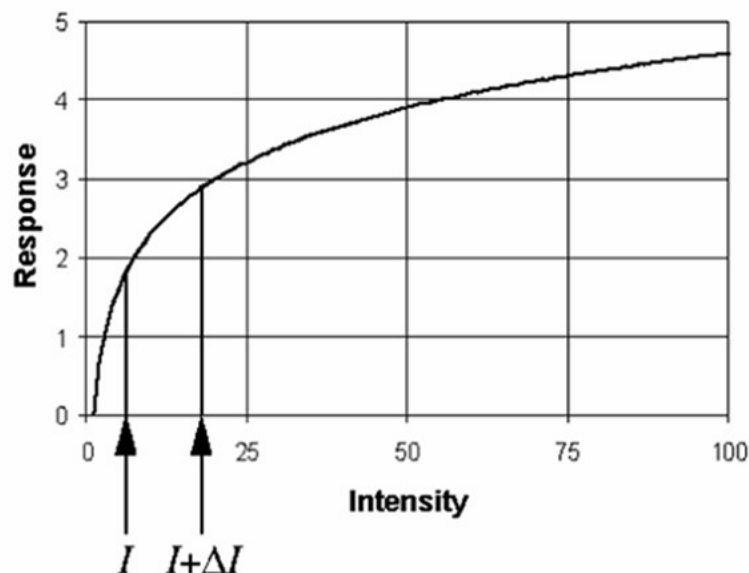


Figura 7. Respuesta logarítmica de la percepción de intensidad de acuerdo a la Ley de Weber.

La demostración matemática de este comportamiento puede obtenerse de la siguiente forma.

Para una intensidad I , tenemos que el valor de la intensidad mínimamente apreciable es el siguiente:

$$I_{JND} = I + \Delta I = I + \lambda I = (1 + \lambda) I$$

Por tanto, la diferencia entre

I_{JND} e

I viene dada por:

$$I_{JND} - I = \lambda I$$

Si calculamos esta diferencia en el dominio logarítmico, tenemos la siguiente relación:

$$c_{JND} = \log(1 + \lambda) + \log I$$

$$c = \log I$$

$$c_{JND} - c = \log(1 + \lambda)$$

Es decir, en el dominio logarítmico, los incrementos de intensidad para JND son constantes.

Inhibición lateral

Además de esta transformación logarítmica, el sistema visual humano lleva a cabo un filtrado espacial de la señal luminosa recibida que, como resultado, conlleva el **realce del contraste entre zonas de diferente intensidad**. Las áreas de la imagen donde la intensidad luminosa cambia bruscamente de claro a oscuro, o viceversa, denotan la presencia de bordes.

La conexión de conos y bastones con las células de la retina permite capturar y realzar estos cambios. Tanto conos como bastones están conectados con dos tipos de células (en la segunda y tercera capa de la retina, respectivamente). Estas llevan a cabo un procesado de la señal visual equivalente al que produce el operador laplaciano (diferencial de segundo orden que magnifica las zonas de la señal en los que se aprecian cambios bruscos). Concretamente, obviando la zona central de la retina:

- ▶ Las señales de una gran proporción de conos y bastones vecinos llegan a las células de la tercera capa de la retina, constituyéndose un **agregado** (signo +) de la intensidad recibida.
- ▶ Mientras, las células de la segunda capa retiniana son responsables del envío de **impulsos inhibitorios** (signo -) equivalentes a la substracción del número de impulsos bioeléctricos de otros puntos próximos de la imagen (píxeles).

Este fenómeno constituye la **inhibición lateral**, que, con un comportamiento similar a un filtro de frecuencias altas, nos ayuda a percibir el contraste, facilitando la posterior identificación de límites o fronteras entre regiones de diferente intensidad, así como de contornos o bordes. Este fenómeno fue descrito por Mach, tal y como refleja el experimento mediante bandas de diferente intensidad.

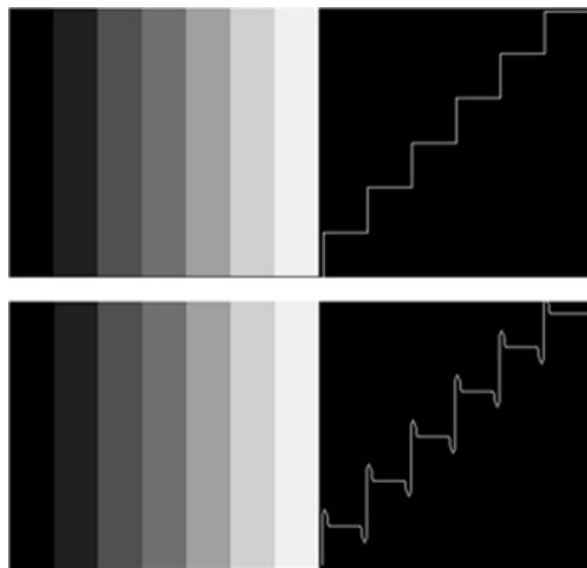


Figura 8. Bandas de Mach y efecto resultante del filtrado espacial llevado a cabo por el ojo humano. Fuente:

<https://web.ub.edu/web/ub/>

Muestreo o filtrado temporal

Por último, el ojo humano también realiza un filtrado temporal de la señal capturada. De hecho, su respuesta temporal es relativamente lenta. Considérese, por ejemplo, el caso en el que se tiene una única fuente de luz que se enciende de forma intermitente. Si la frecuencia de la fuente es

baja, se aprecian los periodos en los que no se emite luz, el tiempo entre emisiones de luz consecutivas ha de ser superior a 30 ms. Sin embargo, para frecuencias superiores, no se percibirán los periodos sin emisión de luz, dando la apariencia de una luz continua.

La frecuencia a la que no se percibe la intermitencia de la fuente de luz se denomina **frecuencia de fusión**. Está en torno a 30 Hz, dependiendo del tamaño y del brillo de la fuente. La aplicación práctica de este fenómeno es la **definición de estándares de codificación de vídeo**. Estos no recogen imágenes de forma continua (señal continua), sino que definen la tasa de imágenes necesaria por segundo (frecuencia de muestreo) para que el espectador no perciba las discontinuidades existentes. Así, los antiguos sistemas PAL y NTSC definían una tasa 25 y 30 imágenes por segundo, respectivamente.

Otro ejemplo que refleja la respuesta temporal del ojo humano es el de dos fuentes de luz intermitentes, alternantes (cada una de ellas emitiendo durante 1 ms) y con una separación angular de 1 grado respecto del observador.

- ▶ Si la frecuencia de la intermitencia es superior a 1 s, se perciben como fuentes de iluminación que se alternan.
- ▶ Si la frecuencia se encuentra en torno a 10 ms, la sensación resultante es la de un punto emisor de luz que se traslada desde una fuente a otra.
- ▶ Por último, si la diferencia temporal de encendidos es de aproximadamente 1 ms, la percepción será una iluminación simultánea.

El experimento demuestra que, por tanto, la visión humana está caracterizada por una **frecuencia de rendición del movimiento**. Esta permite crear sensación continua de movimiento a partir de un conjunto de instantáneas. Pero es necesario que la frecuencia a la que se presentan estas instantáneas sea suficientemente alta para que la percepción no refleje discontinuidades.

A partir de los mecanismos descritos, el proceso de captación de imágenes por parte del sistema de visión humana puede esquematizarse en los siguientes pasos:

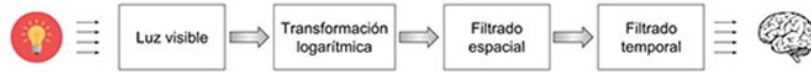


Figura 9. Representación esquemática de las etapas de procesamiento realizadas por el sistema visual humano en la percepción de imágenes.

- ▶ Filtrado en frecuencia para seleccionar la parte de la radiación luminosa correspondiente al espectro de **luz visible**.
- ▶ Transformación logarítmica (**Ley de Weber**) del estímulo percibido.
- ▶ Filtrado espacial (realce de bordes y fronteras) de acuerdo al mecanismo de **inhibición lateral**.
- ▶ Filtrado temporal (**muestreo de la señal**) que se refleja en la frecuencia crítica de fusión y la frecuencia de rendición del movimiento.

Síntesis de color

Por último, comentaremos en este tema algunas nociones sobre el color. El color de un objeto viene definido por el **contenido espectral de una determinada radiación**, esto es, por $R(f)$. Así, la variación de color de una señal luminosa respecto a otra está asociada a la diferente frecuencia de ambas señales.

Sin embargo, se puede tener dos radiaciones distintas,

$$R_1(f) \text{ y}$$

$R_2(f)$; con espectros distintos:

$R_1(f) \neq R_2(f)$, pero que se traduzcan en la misma percepción de color. Este resultado se debe a que el color percibido es **función de tres canales no independientes**. Como se ha comentado previamente, existen tres tipos de conos, las células fotorreceptoras responsables de la percepción del color. Y cada uno de ellos actúa como un filtro en frecuencia

$S_i(f)$ que selecciona parte de los colores de la radiación entrante.

Matemáticamente, la **potencia de la señal de salida** de cada uno de estos canales α_i puede

expresarse de la siguiente forma:

$$\alpha_i(R) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} R(f) S_i(f) df$$

$$i = 1, 2, 3$$

Por tanto, dos colores $R_1(f)$ y $R_2(f)$ se percibirán de la misma forma si:

$$\alpha_i[R_1(f)] = \alpha_i[R_2(f)] \text{ para } i = 1, 2, 3$$

Así, un determinado color

$R(f)$ puede sintetizarse a partir de la superposición de tres primarios

$P_k(f)$ encontrando los coeficientes

β_k apropiados en la mezcla, tal y como se esquematiza en la siguiente figura.

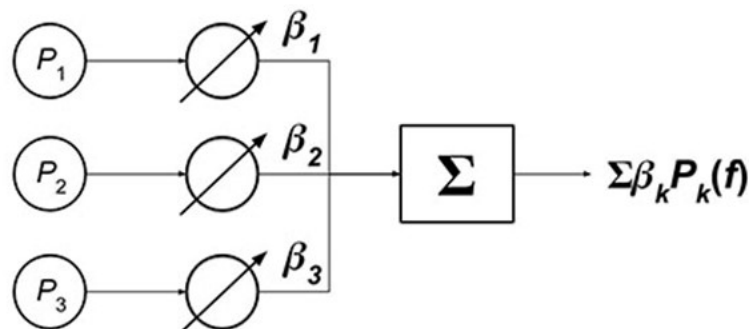


Figura 10. Esquema del proceso de síntesis de color.

Para que el resultado de la síntesis produzca la sensación de color esperada, habrá de cumplirse lo siguiente:

$$\alpha_i(R) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} R(f) S_i(f) df = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \left[\sum_{k=1}^3 \beta_k P_k(f) \right] S_i(f) df = \sum_{k=1}^3 \beta_k \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} P_k(f) S_i(f) df = \sum_{k=1}^3 \alpha_{ik} \beta_k$$

Donde

α_{ik} es la respuesta de los conos de tipo i al color primario

$P_k(f)$. Este viene dado por la siguiente expresión:

$$\alpha_{ik} = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} P_k(f) S_i(f) df$$

Por tanto, la igualdad anterior demuestra que los coeficientes de mezcla

β_k vienen dados por la solución a un sistema de tres ecuaciones y tres incógnitas, dada la respuesta de los tres filtros de conos a los tres colores primarios inicialmente considerados

$P_k(f)$.

Por ejemplo, uno de los **sistemas de color** más relevantes es el **RGB** (*red, green, blue*), comúnmente utilizado en pantallas, y que toma el rojo, el verde y el azul como colores primarios de la mezcla.

Charla TED sobre la creación de sistemas artificiales de percepción

Eagleman, D. (2015). *Can we create new senses for humans?* [Vídeo]. Ted. https://www.ted.com/talks/david_eagleman_can_we_create_new_senses_for_humans

Esta charla propone la creación de nuevos sentidos (sensores) para el ser humano. Conecta plenamente con la asignatura, ya que propone la utilización de la tecnología para percibir estímulos.

Hear-it

Página de Hear-it <https://www.hear-it.org/>

Webs especializadas en los sistemas auditivos y visuales. Recoge información de utilidad sobre los dos sistemas de percepción abordados en la asignatura: visual y auditivo.

Spie

Página de Spie <http://spie.org/?SSO=1>

Al igual que la web recomendada anteriormente, ofrece información sobre los sistemas de percepción visual y auditivo, junto con recursos de todo tipo: publicaciones, conferencias, vídeos, noticias, etc.

Bibliografía

Alain, C. et al. (2001). «What» and «where» in the human auditory system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(21), 12301-12306.

Atchison, D. y Smith, G. (2000). *Optics of the human eye* (pp. 34-35) Oxford: Butterworth-Heinemann.

González, R. C. y Woods R. E. (2007). *Digital image processing*. Upper Saddle River: Prentice-Hall, Inc. Recuperado de http://web.ipac.caltech.edu/staff/fmasci/home/astro_refs/Digital_Image_Processing_2ndEd.pdf

Lim, J. S. (1990). *Two-dimensional signal and image processing*. Upper Saddle River: Prentice-Hall, Inc.

Moore, J. K. y Linthicum F. H. Jr. (2007). The human auditory system: a timeline of development. *International journal of audiology*, 46(9), 460-478.

Thorpe, S., Fize, D. y Marlot, C. (1996). Speed of processing in the human visual system. *Nature: International Journal of Science*, 381, 520-522. doi:10.1038/381520a0

1. El oído humano actúa como un filtro paso-banda sobre las señales acústicas.

¿Cuál es el rango aproximado de frecuencias en el que trabaja?

- A. 0 Hz- 4 KHz.
- B. 20 Hz - 20 KHz.
- C. 4 KHz - 20 KHz.
- D. 20 Hz - 4 KHz.

2. ¿Cuál es el ancho de banda aproximado de una señal de voz?

- A. 4 KHz.
- B. 8 KHz.
- C. 20 KHz.
- D. 10 KHz.

3. ¿Qué característica física determina el color percibido?

- A. La intensidad de la señal luminosa.
- B. La forma o posición del objeto.
- C. La frecuencia de la luz que refleja el objeto observado.
- D. La posición de conos y bastones en la retina.

4. En el ser humano, ¿cuáles son las células especializadas en la visión?

- A. Conos.
- B. Bastones.
- C. Conos y bastones.
- D. Los conos captan mejor la luz, pero los bastones nos proporcionan la agudeza visual.

5. De las células responsables de la visión en el sistema visual humano, ¿cuáles actúan como un banco de filtros centrados en las longitudes de onda de los colores rojo, verde y azul, permitiendo distinguir colores?
- A. Los conos, cuya respuesta en frecuencia es equivalente a un filtro paso-banda centrado en una longitud de onda de 498 nm.
 - B. Los bastones, cuya respuesta en frecuencia es equivalente a un filtro paso-banda centrado en una longitud de onda de 498 nm.
 - C. Los conos, cuya respuesta en frecuencia es equivalente a tres filtros paso-banda centrado en una longitud de onda de 564, 534 y 420 nm, respectivamente.
 - D. Los conos, cuya respuesta en frecuencia es aproximadamente constante en un rango de frecuencia entre 20 Hz y 4 KHz.
6. ¿Qué operación matemática se corresponde con la percepción llevada a cabo por las células fotosensibles para la identificación de bordes en una imagen?
- A. Suma o agregado de las señales capturadas.
 - B. Resta o diferencia entre intensidades de píxeles cercanos.
 - C. Producto de las intensidades en diferentes zonas de la imagen.
 - D. División de los valores de intensidad respecto a un valor de referencia.
7. La Ley de Weber establece que:
- A. El incremento necesario en la intensidad del estímulo para resultar en una respuesta perceptiva similar aumenta para mayores valores de intensidad.
 - B. Solo los conos son capaces de filtrar la señal luminosa en frecuencia.
 - C. La percepción de un estímulo varía de forma lineal con la intensidad de Este.
 - D. Todas las opciones son incorrectas.

8. ¿En qué parte del oído se encuentra la cóclea?
- A. Es uno de los huesos propios del oído.
 - B. Oído interno.
 - C. Pabellón auditivo.
 - D. Oído medio.
9. La frecuencia de una onda sonora capturada por nuestro sistema auditivo:
- A. Se refleja en las vibraciones del fluido interno de la cóclea (perilinf).
 - B. Es inversamente proporcional a la longitud de las fibras pilosas que capturan el movimiento de la perilinf.
 - C. Es filtrada en el pabellón auditivo.
 - D. Queda fuera del rango de percepción si es superior a 2 KHz.
10. ¿Qué es el tímpano?
- A. Uno de los órganos en el sistema visual.
 - B. Una membrana que forma parte de la trompa de Eustaquio.
 - C. Una membrana que forma parte del sistema auditivo y cuya vibración captura la intensidad y frecuencia de la señal sonora entrante.
 - D. Un fluido interno del oído.