

La importancia de la Luz en nuestras vidas¹

Un repaso por la apasionante historia y relevancia
actual de la Óptica y la Fotónica

Apuntes de la Asignatura

Jesús Mirapeix Serrano

Grupo de Ingeniería Fotónica
Universidad de Cantabria



¹Asignatura enmarcada en el Programa Sénior de la Universidad de Cantabria.



Figura 1. Recreación de una comparativa entre la visión humana y de los gatos. Fuente: Nickolay Lamm. Licencia: Permiso concedido explícitamente por el autor <http://bit.ly/1b1Q9tz>

Queda prohibida, salvo excepción prevista por en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y sgts. Código Penal).

La importancia de la Luz en nuestras vidas

Mirapeix Serrano, Jesús

© 2020 Jesús Mirapeix Serrano

Universidad de Cantabria

39005 Santander

LA IMPORTANCIA DE LA LUZ EN NUESTRAS VIDAS

Estructura del Curso

Este curso se ha dividido en un total de **8 capítulos** en los que se pretende introducir al alumno los conceptos principales de la óptica y la fotónica: desde el uso de las primeras lentes de aumento hasta el uso del láser en infinidad de dispositivos y aplicaciones hoy en día.

▶ **Capítulo 1: Evolución histórica de la Óptica y la Fotónica**

Por medio de personajes clave como Arquímedes, Newton o Einstein, recorreremos la apasionante historia de la evolución de la Óptica hasta llegar a la Fotónica, con la invención de los omnipresentes láser y fibra óptica.

▶ **Capítulo 2: ¿Qué es la luz? Ondas y Partículas**

De una manera sencilla y amigable trataremos de acercarnos a uno de los “misterios” que más han preocupado y ocupado a cientos de científicos de los últimos siglos: ¿Qué es la Luz? ¿Es la luz una onda o una partícula?

▶ **Capítulo 3: Sol, Luz y Vida: comprendiendo el funcionamiento del Sol y la fotosíntesis**

La vida en nuestro planeta no existiría de no ser por el Sol y la energía que nos brinda cada segundo. De igual manera, la fotosíntesis, o lo que es lo mismo, la conversión que realizan las plantas de materia inorgánica a compuestos orgánicos gracias a la energía de la luz.

▶ **Capítulo 4: Láser, fibra óptica y su importancia en la sociedad actual: internet**

Nuestra sociedad no sería la misma si, allá por 1958, no se hubiese inventado el láser y, posteriormente, la fibra óptica. Internet, el gran fenómeno de las comunicaciones que ha revolucionado nuestra vida, no es más que luz (láser) que viaja a través del mundo por fibra óptica. Revisaremos brevemente la invención del láser, de la fibra óptica y sus fundamentos básicos.

▶ **Capítulo 5: Midiendo el mundo a través de los fotones: de la biomedicina a la ingeniería civil**

La luz no sirve sólo para comunicarnos a gran velocidad por medio de internet. También puede valernos para aplicaciones de lo más variado: desde delimitar de manera precisa células cancerígenas hasta evaluar en tiempo real el estado de un puente o una presa. En este capítulo mostraremos brevemente algunos ejemplos significativos que nos ayuden a comprender mejor esta faceta “oculta” de la luz.

▶ **Capítulo 6: El fenómeno de la visión: funcionamiento del ojo humano y animal**

Este acercamiento al mundo de la luz no sería completo si no somos capaces de comprender como funciona uno de los elementos más increíbles del cuerpo humano: el ojo y el sentido de la visión. Además, veremos las diferencias existentes con el sentido de la visión de otros miembros del reino animal.

▶ **Capítulo 7: Últimos avances de la fotónica y perspectivas de futuro**

En este capítulo final revisaremos algunos de los avances más recientes en el mundo de la óptica y la fotónica. Del mismo modo, veremos cuáles son las perspectivas de futuro de un campo de conocimiento fundamental en la actualidad y, sin duda, en las próximas décadas.

► **Capítulo 8: Experimentos en casa**

Por último, se propondrán a los alumnos una serie de sencillos experimentos que permitirán interiorizar los conceptos explicados a lo largo del curso.

Índice general

Índice general	1
6. El fenómeno de la visión: funcionamiento del ojo humano y animal	2
6.1. Estructura del ojo humano	2
6.2. Conos y bastones: los auténticos sensores del ojo	4
6.3. Defectos de la visión	7
6.3.1. Defectos de la visión: miopía, presbicia, hipermetropía y astigmatismo	7
6.4. Devolviendo la visión a los ciegos: el ojo biónico	8
6.5. Gafas de visión 3D: ¿cómo funcionan?	9
6.6. El ojo animal	12
6.6.1. El ojo del caballo	12
6.6.2. La visión del gato	13
6.6.3. Visión de las aves	14
6.6.4. Serpientes: visión termográfica	16
6.6.5. La visión de los insectos	17
6.7. Conclusiones	17
Índice de figuras	20

CAPÍTULO 6

El fenómeno de la visión: funcionamiento del ojo humano y animal

El sentido de la visión es absolutamente fascinante, permitiéndonos a nosotros y a muchas especies del reino animal interactuar con nuestro entorno de maneras muy diversas. En este capítulo se realizará una breve revisión del funcionamiento del ojo humano, presentando también el funcionamiento de la visión en otras especies, analizando así las significativas diferencias existentes en muchos casos.

6.1. Estructura del ojo humano

El **ojo humano** no es sino un sistema sensor que nos permite interactuar con nuestro entorno. Conviene quizás, en este punto, revisar el concepto de “**sensor**”:

Un sensor es un dispositivo que convierte una magnitud física o química en otra magnitud, normalmente eléctrica, que trata de hacer una medida cuantitativa del fenómeno.

¿Es adecuada la definición del ojo como un sensor? Claramente sí: el ojo convierte los fotones (o rayos de luz), con información sobre nuestro entorno, en señales eléctricas que, posteriormente, son interpretadas por nuestro cerebro. Pero, ¿cómo se produce este proceso? Desde un punto de vista simplificado, la ?? muestra un esquema de cómo se lleva a cabo este proceso: los rayos de luz que salen del objeto (reflejados) llegan al ojo, donde algunos elementos como el cristalino actúan como lente, permitiendo un “enfoque” correcto de estos rayos o haces de luz sobre la retina. La retina es el elemento sensor o transductor donde se forma la imagen y se convierte la señal óptica (fotones) en eléctrica (electrones).



Figura 6.1. Esquema simplificado del fenómeno de la visión y el ojo humano. Fuente: Elaboración propia.

Una imagen detallada de la estructura del ojo humano se presenta en la ??.

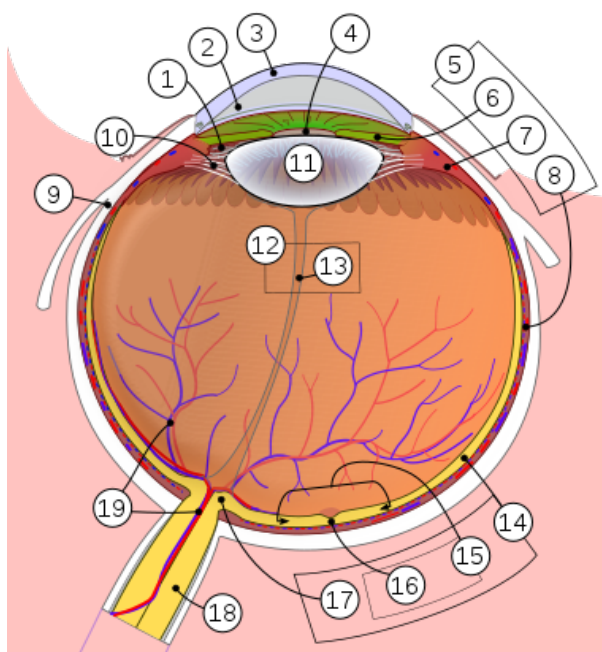


Figura 6.2. Representación esquemática de la estructura de un ojo humano. Elementos: 1. Cámara posterior 2. Cámara anterior 3. Córnea 4. Pupila 5. Úvea 6. Iris 7. Cuerpo ciliar 8. Coroides 9. Esclerótica 10. Ligamento suspensorio del cristalino 11. Cristalino 12. Humor vítreo 13. Conducto hialoideo 14. Retina 16. Fóvea 17. Disco óptico 18. Nervio óptico 19. Vasos sanguíneos de la retina. Fuente: Wikimedia. Licencia: Dominio público. <http://bit.ly/2j9TBSH>

Repasemos los principales elementos que componen el ojo humano y su funcionalidad:

La córnea es una estructura en forma de hemisferio y transparente que se sitúa en la parte externa del ojo y cuya misión es permitir el paso de la luz y proteger al iris. En la córnea se produce una primera refracción de los rayos de luz que llegan al ojo. Como curiosidad cabe mencionar que el índice de refracción de la córnea es de 1,377¹.

Pupila e iris : el iris es una estructura que controla la cantidad de luz que recibe el ojo. Este proceso se lleva a cabo mediante unos músculos que regulan la abertura de la pupila (ver

¹Si no recuerdas bien qué es el índice de refracción, revisa por favor los capítulos anteriores del curso para asimilar correctamente este importante concepto.

Figura 6.3), el orificio central del iris de unos 3 milímetros de diámetro.

Humor acuoso se trata de un líquido que circula entre el cristalino, el iris y la córnea y que tiene diferentes funciones, como dotar a la estructura del ojo de una presión adecuada¹, nutre y limpia a la córnea y el cristalino y también contribuye a la refracción de la luz (con un índice de refracción de 1,337) aunque en menor medida que el cristalino.

El **cristalino** es la estructura del ojo que funciona como una lente, en particular como una lente bi-convexa, con el objetivo de permitir enfocar objetos que se sitúan a diferentes distancias. A ese proceso de enfoque, que se lleva a cabo mediante un aumento o disminución de la curvatura y espesor de esta estructura, se denomina **acomodación** (ver Figura 6.4). El cristalino tiene un índice de refracción de 1,413.

Humor vítreo es, al igual que el humor acuoso, un líquido que se sitúa en este caso entre el cristalino y la retina. Sus dos funciones principales son mantener la forma del ojo y conseguir una superficie uniforme en la retina para que la recepción de imágenes sea lo mejor posible. El índice de refracción del humor vítreo es de 1,336.

La **retina** es el auténtico sensor o transductor del ojo humano, permitiendo la conversión de luz en impulsos eléctricos que son posteriormente interpretados por el cerebro.

La **fóvea** es el área de la retina donde se enfocan los rayos de luz, estando especialmente dedicada este área a la visión en color.



Figura 6.3. Detalle de una iris humano, de color azul. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2zkziNa>

6.2. Conos y bastones: los auténticos sensores del ojo

Como ya se ha comentado, la retina es el elemento del ojo que permite realmente la visión, convirtiendo la luz en señales eléctricas que son posteriormente transmitidas al cerebro. Pero

¹Un exceso de presión intraocular por falta de drenaje del humor acuoso es precisamente la causa del glaucoma.

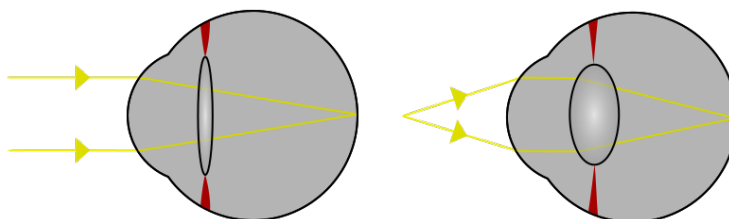


Figura 6.4. Esquema del funcionamiento del cristalino y del proceso de *acomodación*. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 2.5. <http://bit.ly/2AeboTq>

¿cómo se produce realmente esa conversión? La retina está formada por una serie de células que permiten la transmisión de las señales generadas, pero la clave del proceso de visión está en las células especializadas (de la retina denominadas) **foto-receptores** (o lo que es lo mismo, receptores de luz). Hay dos tipos de foto-receptores, los conos y los bastones:

Los bastones constituyen el grupo de fotorreceptores más numeroso (unos 120 millones) y son los que mayor sensibilidad a la luz presentan, esto es, los que permiten ver con una menor cantidad de luz. Son por tanto los responsables de que podamos percibir detalles y formas en la oscuridad pero, sin embargo, no nos permiten apreciar colores. Están también asociados a la detección de movimiento y a la visión periférica, al encontrarse mayoritariamente en las regiones que rodean la fovea, zona de la retina donde incide la luz cuando miramos una escena directamente y en la que predominan los conos.

Los conos son los fotorreceptores encargados de la percepción de los colores, situándose éstos en la zona de la retina donde se proyecta la imagen cuando miramos un objeto directamente, concretamente en la fovea y en la mácula, la zona que la rodea. El número de conos en esta zona es de unos 6 a 7 millones.

Con respecto a los conos, es interesante destacar que existen **3 tipos de conos** asociados a los colores **rojo, verde y azul**. La formación de otros colores se realiza en base a la mezcla de esos tres colores “primarios”, tal y como ocurre en las pantallas o televisores convencionales (que usan un sistema RGB: Red (Rojo), Green (Verde) and Blue (Azul)). Diferentes estudios han concluido que la respuesta espectral de estos conos es la que se muestra en la Figura 6.5, donde se aprecian las 3 curvas asociadas a los conos rojo, verde y azul y la curva correspondiente a los bastones (en trazo discontinuo). En el eje horizontal se ha indicado la longitud de onda asociada a cada color¹. Además, también se muestra la nomenclatura alternativa que denomina S (*Short*), M (*Medium*) y L (*Large*) a los conos azules, verdes y rojos, respectivamente. Estos nombres se derivan de sus longitudes de onda (cortas, medias y largas).

Cuestión 2.1: Pantallas RGB

Investiga sobre cómo se forman los colores que se muestran en las pantallas de televisión (por ejemplo de tipo LED) o en los monitores de ordenador. Explícalo brevemente **con tus propias palabras**.

¹ Violet (violeta); blue (azul); cyan (cián); green (verde); yellow (amarillo) y red (rojo).

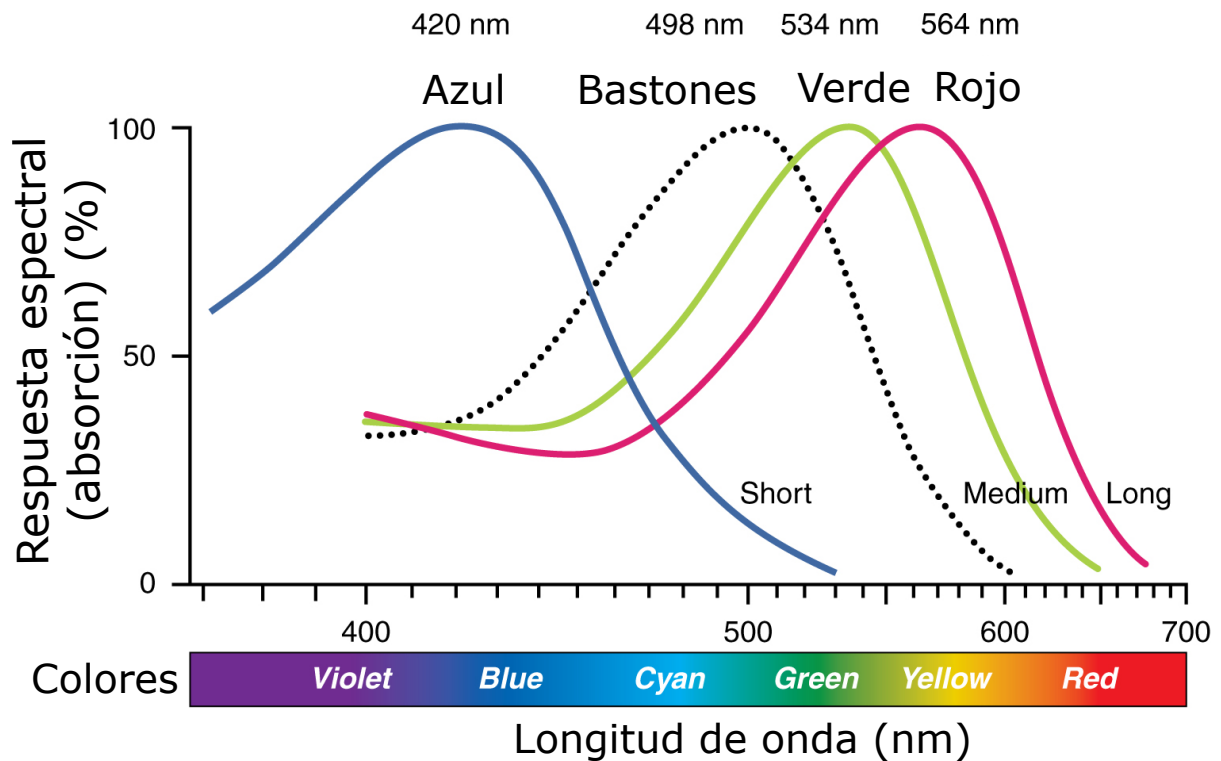


Figura 6.5. Representación de la respuesta asociada a los conos (fotorreceptores) azul, verde y rojo. Fuente: Wikimedia (imagen original modificada). Licencia: CC-BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2hNbv8>

Cuestión 2.2: Color en las impresoras

Investiga sobre cómo se forman los colores en las impresoras convencionales: ¿se utiliza también el sistema RGB? Explícalo brevemente **con tus propias palabras**.

Como curiosidad con respecto a los conos, cabe destacar que los conos “azules” son especiales, ya que constituyen sólo el 2% de todos los conos y se sitúan fuera de la zona central de la fovea donde se encuentran los conos rojos y verdes. Aunque estos conos son más sensibles, este hecho no explica por sí sólo cómo podemos apreciar los diferentes colores con una sensibilidad similar. Se cree que existe en el cerebro un sistema que “amplifica” las señales procedentes de los conos azules con el objeto de obtener un resultado final compensado.

Importante 2.1: Azul intenso

La percepción visual de objetos que muestran un color azul intenso es menos clara que la percepción de objetos de color rojo y verde. Este hecho, que puede apreciarse en las imágenes mostradas en el siguiente enlace^a, se debe a que los conos azules se sitúan fuera de la fovea, región donde enfocamos nuestra visión “directa”.

^a<http://bit.ly/2zdtjpn>

6.3. Defectos de la visión

Una vez ya explicado el funcionamiento de un ojo humano, llega el momento de profundizar en cómo se produce una **observación normal** por parte del ojo y cuando, por diferentes circunstancias, el proceso se puede ver alterado.

Un ojo normal proporciona de un objeto alejado una imagen perfecta en la retina. Cuando el objeto se acerca, el cristalino se deforma con la finalidad de que la imagen del objeto, que no está en el foco, se siga formando en la retina (es lo que se conoce como **proceso de acomodación**, ya mencionado y representado en la Figura 6.4). Esta deformación del cristalino es máxima cuando el objeto está situado en una distancia d_m (denominada **distancia de visión mínima**), que varía de acuerdo a la edad. Para personas adultas se considera que una distancia d_m normal se sitúa alrededor de los 25 cm, siendo de 15 cm a los 30 años y de 7-8 cm en niños.

6.3.1. Defectos de la visión: miopía, presbicia, hipermetropía y astigmatismo

La **miopía** se produce por un exceso de convergencia en el sistema óptico del ojo, situándose el foco de la imagen delante de la retina, tal y como se ha representado en la Figura 6.6. Es precisamente esta “falta de enfoque” la que provoca que se vean borrosos los objetos lejanos.



Figura 6.6. Representación esquemática de la miopía. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el paso de los años hace que se reduzca la capacidad de adaptación del cristalino, perdiendo así parte de su flexibilidad original (lo que se conoce como **presbicia**). De esta manera aumenta la distancia de visión mínima d_m , lo que se conoce como vista cansada (ver Figura 6.7) y que resulta en una dificultad para ver nítidamente objetos cercanos. Afecta fundamentalmente a personas adultas, en concreto a más de un 80% de los mayores de 45 años y casi a un 100% en los mayores de 65 años.

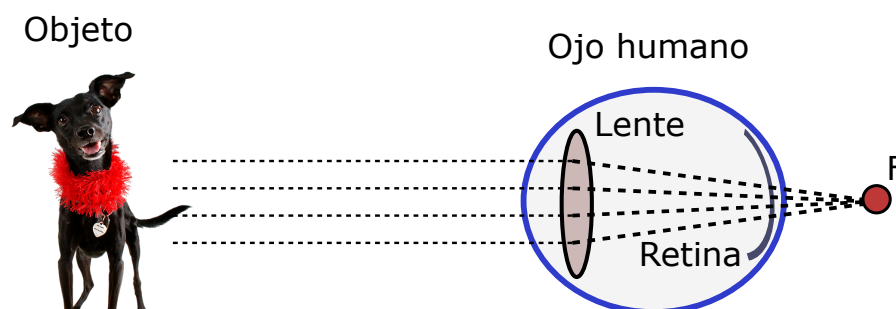


Figura 6.7. Representación esquemática de la presbicia. Fuente: Elaboración propia.

La **hipermetropía** es muy similar en sus síntomas a la presbicia, pero afecta a personas jóvenes, ya que no se genera por un deterioro en la flexibilidad del cristalino, sino en una incorrecta refracción de la luz en el ojo, resultando nuevamente en un punto focal más allá de la retina, al igual que se mostró en la Figura 6.7. Al contrario que lo que ocurre con la presbicia, en la hipermetropía puede existir un importante factor hereditario.

Por último, el **astigmatismo** es un defecto de la visión en el que no existe una refracción uniforme en el ojo, lo que hace que se generen dos puntos focales dentro del ojo, delante y detrás de la retina, en vez de uno sobre la retina como ocurre en un ojo “sano”. El principal síntoma del astigmatismo es la visión borrosa tanto de objetos cercanos como lejanos, así como la dificultad para percibir pequeños detalles en las imágenes. En la Figura 6.8 se presenta un esquema del enfoque de una imagen en un ojo con astigmatismo (izquierda), así como una representación del efecto que tiene en la visión esta patología.

En general estos defectos de la visión pueden ser solventados o mejorados mediante el uso de lentes, si bien en algunos casos puede ser necesaria una intervención quirúrgica

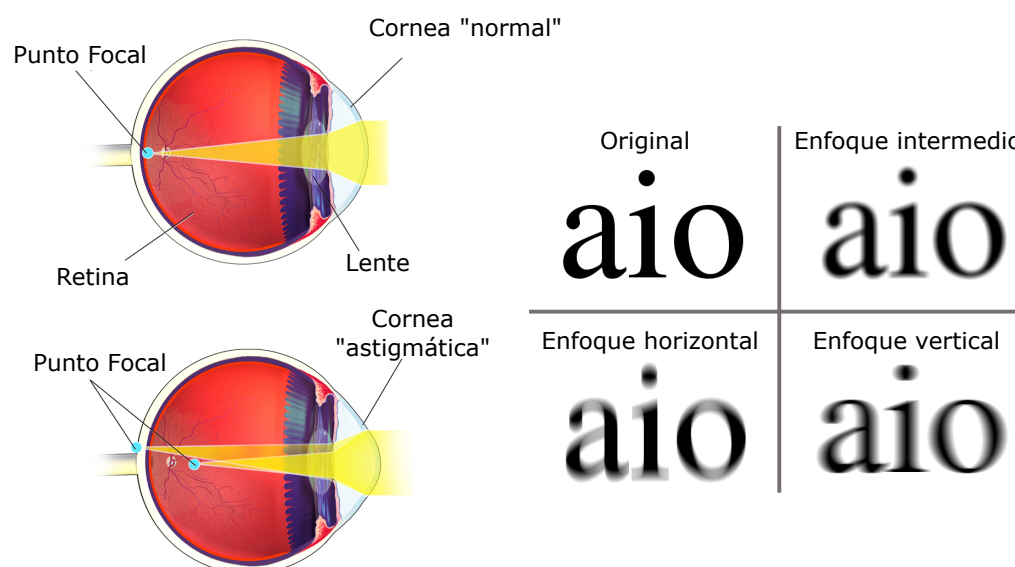


Figura 6.8. Representación esquemática del astigmatismo (izquierda) y efecto del astigmatismo en la visión (derecha). Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 4.0 (izquierda); BSD ((C) Jean-Jacques Milan.)

6.4. Devolviendo la visión a los ciegos: el ojo biónico

El desarrollo científico de los últimos años han hecho posible que se pueda devolver la visión a personas que, debido a enfermedades como la retinosis pigmentaria, se habían quedado ciegos. Este gran avance, en el que España es un país puntero gracias al **Centro de Oftalmología Barraquer**, se basa en el uso de un dispositivo denominado *Argus II Retinal Prosthesis System*, cuyo funcionamiento es como sigue:

Una pequeña cámara implementada en unas gafas que recoge las imágenes del entorno del paciente.

Un **sistema de transmisión** que envía dichas imágenes a un dispositivo implantado en la retina del paciente.

Un **chip con electrodos** que suplen la función de los conos y bastones, permitiendo así la transmisión de los impulsos eléctricos al cerebro del paciente, donde se interpretarán.

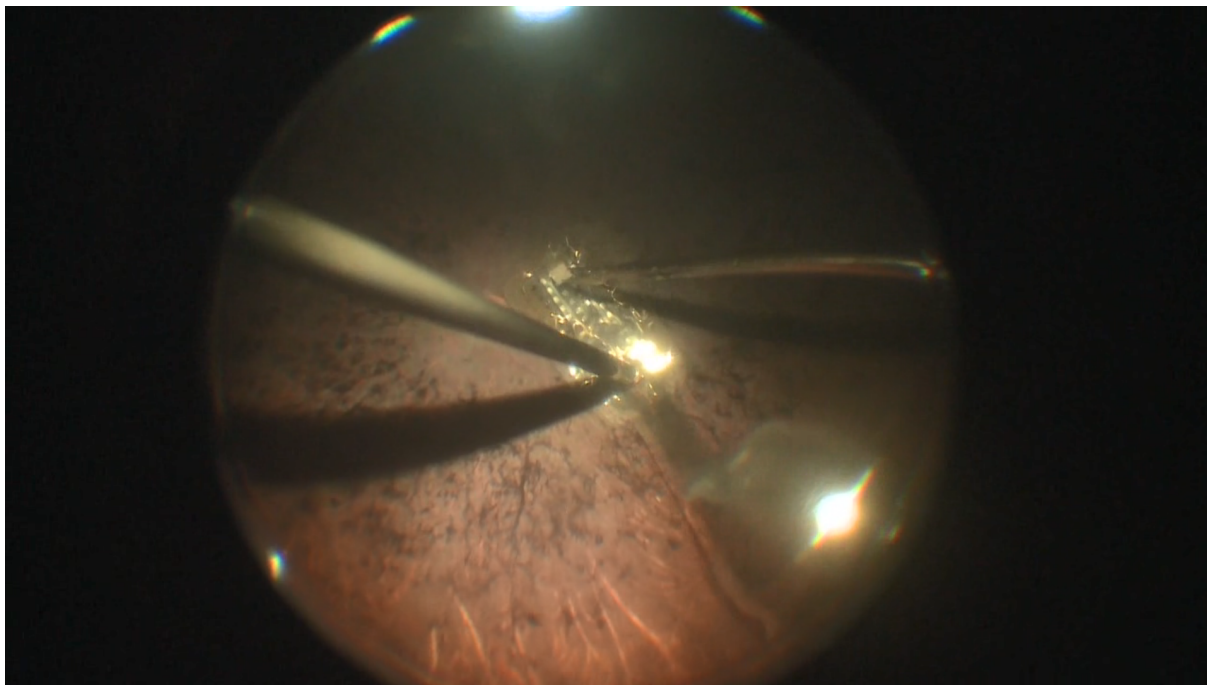


Figura 6.9. Imagen del procedimiento quirúrgico en el que se realiza el implante del chip en la retina del paciente. Fuente: Clínica Barraquer (Dr. Jeroni Nadal).

Tras la compleja operación requerida, el paciente debe involucrarse en un largo periodo de rehabilitación (ver Figura 6.10) para volver a entrenar a su sistema de visión. De hecho, es necesario que el paciente haya sido capaz de ver en algún momento de su vida para que puedan mantener una memoria visual en el cerebro. Si bien la recuperación de la visión no es completa, sí es posible llegar a reconocer luces, formas y personas, lo que supone un enorme avance para una persona ciega.

6.5. Gafas de visión 3D: ¿cómo funcionan?

A día de hoy es común el uso de las denominadas **gafas 3D** en los cines, lo que nos percibir las películas de una manera diferente, percibiendo como ciertos objetos parecen salir de la pantalla y acercarse hacia nosotros, los espectadores. Sin embargo, poca gente sabe en qué se basa el funcionamiento de este sencillo dispositivo.

Para explicarlo es necesario recurrir en primer lugar a la polarización de la luz. La luz, como ya sabemos a estas alturas del curso, puede entenderse como una onda (en concreto como un campo electromagnético que se propaga como una onda). La polarización de la luz no es sino la dirección de vibración de ese campo electromagnético. Por ejemplo, la luz “normal”, la solar o la que sale de una bombilla convencional, no está polarizada, esto es, vibra en todas direcciones. Sin embargo,



Figura 6.10. Imagen de un paciente durante el proceso de rehabilitación tras la intervención en la Clínica Barraquer. Fuente: Clínica Barraquer (Dr. Jeroni Nadal).

si se usa un “filtro polarizador”, la luz queda polarizada: en el ejemplo de la Figura 6.11 la luz quedaría polarizada verticalmente.

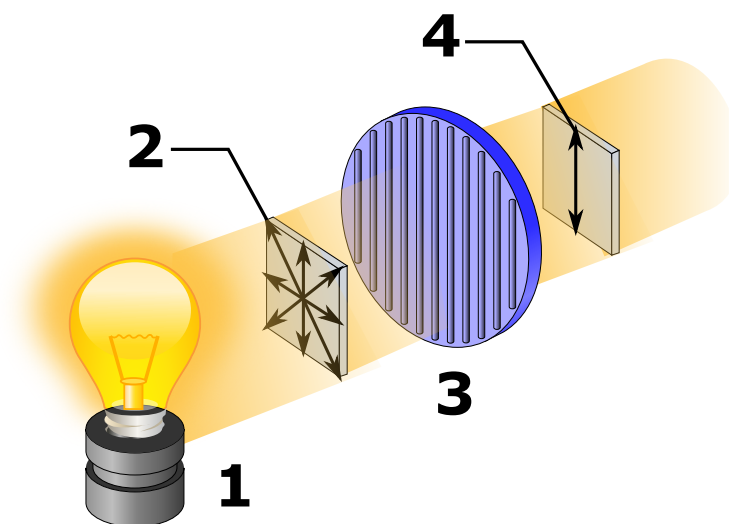


Figura 6.11. Polarización de la luz: uso de un filtro polarizador vertical. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2AeYuDN>

Precisamente este es el sistema que emplean las gafas 3D. Cada lente (izquierda y derecha) lleva incorporado un filtro horizontal y vertical, respectivamente. De esta manera, cada ojo recibe

una información distinta, correspondiente a *frames*¹ intercalados. Este funcionamiento se basa en la **visión estereoscópica**, que básicamente implica que, al estar nuestros ojos separados, cada uno genera una imagen ligeramente distinta. Así, nuestro cerebro las procesa posteriormente, siendo capaz de diferenciar las distancias entre los diferentes objetos que aparezcan en la escena, creando así la sensación de profundidad.

De hecho, el antecesor de estas gafas 3D es el **estereoscopio**, inventado por Sir Charles Wheatstone en 1840 (ver Figura 6.12), y aún empleado a día de hoy en algunas publicaciones.



Figura 6.12. Estereoscopio (parte superior) y tarjeta estereoscópica de 1899 (inferior). Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 2.5 (superior) <http://bit.ly/2AFqFwL>; Dominio público (inferior) <http://bit.ly/2zNTOWQ>.

Cuestión 5.1: Gafas de Sol polarizadas

Al margen de las gafas 3D de uso en cines, hay varios modelos de gafas de sol que pueden comprarse “polarizadas”. Investiga y explica **con tus propias palabras** cuál es la ventaja que añade a unas gafas de sol el incluir un filtro de polarización.

¹Se denomina *frame* a cada una de las imágenes estáticas que componen un vídeo o secuencia.

Importante 5.1: Polarización: móvil y gafas de sol

Si dispones de teléfono móvil y gafas de sol (polarizadas) y has usado ambos simultáneamente, quizás hayas experimentado el curioso efecto que se da al rotar el teléfono móvil. Busca información y trata de explicar este fenómeno con tus propias palabras^a.

^aPista: fíjate en la ??.

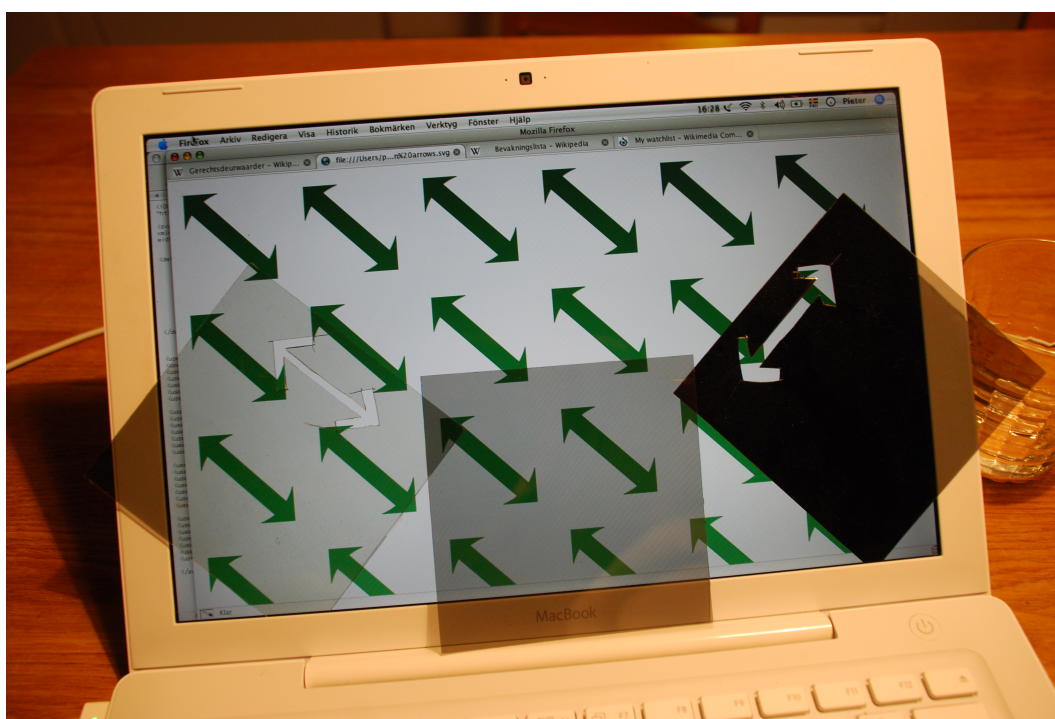


Figura 6.13. Pantalla de ordenador con dos filtros de polarización. Fuente: Wikimedia. Licencia: Dominio público <http://bit.ly/2BuIgoi>

6.6. El ojo animal

Una vez analizado en detalle la estructura y funcionamiento del ojo humano, puede ser interesante dedicar un apartado a las particularidades de la visión en algunas especies del reino animal. El objetivo de este apartado no es el de analizar en profundidad cada caso, sino exponer las curiosidades y diferencias más significativas.

6.6.1. El ojo del caballo

Una de las principales particularidades de la visión equina es que abarca casi 360°, en concreto unos 350°, al estar sus ojos situados en los laterales de la cabeza. Esta disposición permite a los caballos detectar con facilidad a posibles depredadores. Un detalle en este sentido es que la visión de los caballos tiene dos zonas “ciegas” justo enfrente de él (el caballo es capaz de ver a 2 metros de distancia en línea recta, pero no antes) y detrás. Esto hace que sea recomendable acercarse a un caballo lateralmente, para facilitar su visión, ya que si se asusta puede reaccionar violentamente.



Figura 6.14. Detalle del ojo de un caballo. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0 <http://bit.ly/2B1NjXi>

Los caballos tienen una visión dicromática (frente a la tricromática RGB de los humanos); esto es, son capaces de distinguir dos colores al tener dos tipos de conos, verdes y azules. Por otro lado, la proporción bastones/conos es muy superior a la nuestra (20:1), lo que hace que tengan una gran sensibilidad en condiciones de muy poca iluminación, teniendo una gran visión nocturna. Los caballos tienen una gran sensibilidad al movimiento, ya que éste puede implicar un ataque de un depredador. El movimiento suele ser detectado por la visión periférica que, al ser menos nítida, hace que un caballo pueda salir corriendo ante cualquier movimiento detectado en dicho campo de visión.

Importante 6.1: Caballos, obstáculos y colores

La visión de los caballos se tiene en cuenta a la hora de diseñar los obstáculos en ciertas pruebas, favoreciendo el uso de colores que pueden ser fácilmente identificados por estos animales.

6.6.2. La visión del gato

Una característica destacada del ojo de los gatos es que **su pupila tiene una geometría variable**, con el objetivo de poder ajustar automáticamente la cantidad de luz disponible. Es por ello que en ocasiones la pupila aparece redondeada y, en otros casos, alargada en sentido vertical (ver Figura 6.15).

Al igual que ocurre con el caballo, el gato tiene muchos más fotorreceptores de tipo bastón que cono, lo que hace que pueda tener una buena visión en condiciones de muy poca iluminación. Además, los gatos tienen una **membrana reflectante** detrás de la retina, denominada **tapetum lucidum**, que refleja la luz y permite aumentar aproximadamente un 44% su sensibilidad. Es precisamente esta membrana la responsable de que los ojos de los gatos brillen en la oscuridad o cuando se les saca una foto (ver Figura 6.16).

Es falso además que los gatos no perciban los colores, sino que se piensa que poseen una



Figura 6.15. Diferentes imágenes con ojos de gato. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0



Figura 6.16. *Tapetum lucidum* en un gato . Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0 <http://bit.ly/2AHf0xt>

visión dicromática (al igual que los caballos) que les permite distinguir el azul-violeta y el verde-amarillo. En la Figura 6.17 se muestran dos composiciones del artista gráfico Nikolay Lamm¹ que, con la ayuda de diversos profesionales, ha recreado como podría ser la visión de los gatos comparada con la de los humanos. En la imagen superior se aprecia como durante el día, los gatos perciben imágenes con menos detalles de colores y más “saturadas”, debido al gran número de bastones (frente a conos) que poseen. Por otro lado, en condiciones de visión nocturna los gatos son capaces de percibir mucho mejor los detalles de las escenas, gracias precisamente a ese gran número de bastones.

La visión de los perros es muy similar a la de los gatos en el sentido de la proporción de bastones y conos, visión dicromática y uso del *tapetum lucidum*.

6.6.3. Visión de las aves

Así como en otros animales, como en los perros, defectos en la visión se pueden ver compensados por el gran desarrollo de otros sentidos, como el olfato, en las aves la visión es su sentido más importante. Lógicamente, dentro de las diferentes especies de aves existen diferencias en este sentido, así por ejemplo las rapaces son las que mejor visión poseen.

¹Puedes consultar su trabajo en: <http://nickolaylamm.com/>



Figura 6.17. Recreación de una comparativa entre la visión humana y de los gatos. Fuente: Nickolay Lamm. Licencia: Permiso concedido explícitamente por el autor <http://bit.ly/1b1Q9tz>

Las aves, así como otros vertebrados al margen de los mamíferos, poseen 4 tipos de fotorreceptores de tipo cono, centrados en los colores rojo, verde azul y también en el ultravioleta (UV). Efectivamente, las aves son capaces de ver la radiación UV, lo que se cree que tiene un sentido evolutivo desde el punto de vista de localizar mejor a sus presas, ya que la orina de algunas de ellas refleja bien dicha radiación. Alrededor de un 50% de las aves posee una segunda fovea, lo que les facilita un mejor enfoque de las imágenes laterales.

Además de disponer de un mayor número de fotorreceptores, de manera análoga poseen un nervio óptico mayor y una mayor proporción del cerebro dedicada al procesamiento de imágenes (al igual que ocurre en los perros con el área dedicada al procesamiento de olores, en comparación con los humanos). El mayor número de fotorreceptores, en concreto de conos, permite a las aves distinguir muy bien los colores, pudiendo detectar así un insecto verde posado sobre una hoja. Por último, cabe mencionar que la detección de movimiento en la visión de las aves es muy superior a la humana ya que, entre otros factores, su sistema de visión es capaz de captar 100 imágenes por segundo, frente a las 25 del ojo humano.



Figura 6.18. Ojos de una lechuza. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 2.0 <http://bit.ly/2jwHWxt>

6.6.4. Serpientes: visión termográfica



Figura 6.19. Detalle del ojo de una serpiente. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-ND 2.0 <http://bit.ly/2zA0in0>

Las serpientes presentan muchas similitudes en su visión con las de otros vertebrados, aunque una diferencia fundamental se presenta en su manera de enfocar. Si en el apartado dedicado a la visión humana se mencionaba el **proceso de acomodación**, las serpientes no modifican la curvatura del cristalino, sino que lo desplazan adelante y atrás. La mayor parte de las serpientes presentan conos y bastones. Además, algunas especies como los crótalos son capaces de detectar la radiación infrarroja. Tal y como ya se ha comentado en el curso, la radiación infrarroja está asociada al calor de los objetos, por lo que esta característica resulta tremendamente útil para detectar a posibles presas. Esta visión infrarroja es posible gracias a unas cavidades termorreceptoras extremadamente sensibles, capaces de detectar variaciones de temperatura de hasta $0,001^{\circ}\text{C}$.

6.6.5. La visión de los insectos

La mayor parte de los insectos adultos posee un par de ojos compuestos y 3 ojos simples denominados *ocelos*. Estos ojos simples, que suelen situarse en la parte superior de la cabeza entre los ojos compuestos, son realmente simples en su funcionamiento y tan solo permiten distinguir diferencias de intensidad en la luz recibida.

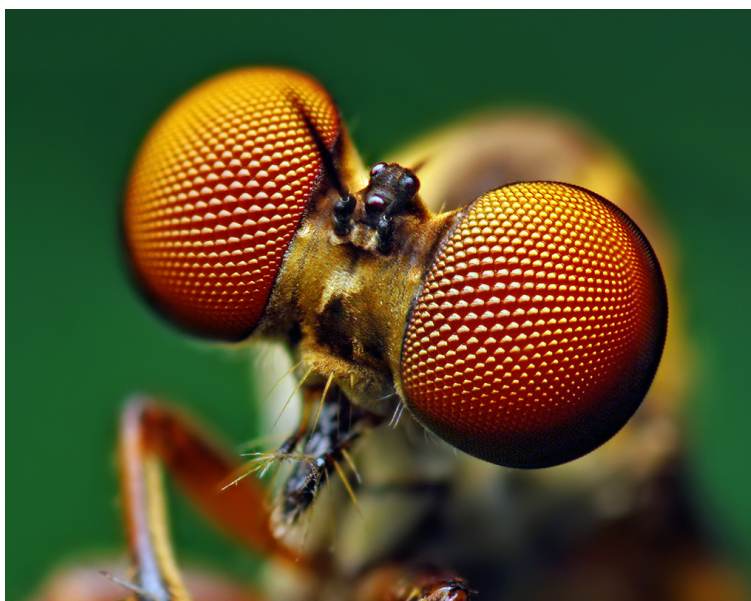


Figura 6.20. Ojos de una mosca *Holcocephala fusca* Robber. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 2.0 <http://bit.ly/2j2FsQV>

Los ojos compuestos están formados por unidades denominadas omatidios que actúan como un ojo independiente, siendo la imagen final la suma de las contribuciones de cada unidad. El número de omatidios o unidades en un ojo compuesto varía según las especies, así por ejemplo en los distintos géneros de hormigas varía entre 6 y 1000; la mosca doméstica posee unos 4000; la abeja, unos 6000; las mariposas, entre 10.000 y 30.000, según la especie; y las libélulas, más de 40.000¹. Se cree del proceso de visión en los insectos surgen imágenes con más “grano” y menos nitidez que en los humanos.

6.7. Conclusiones

En este apasionante capítulo se ha realizado una revisión por el proceso de visión. Comenzando por la visión humana, se ha analizado la estructura del ojo y descrito el proceso de visión, señalando también algunos defectos típicos de la visión e, igualmente, algunos detalles sobre la visión con gafas 3D o la posibilidad de recuperar la vista mediante el uso de cámaras e implantes en la retina.

Además, se ha presentado una breve revisión de las particularidades de la visión en otros animales, como los caballos, perros y gatos, aves, serpientes e insectos.

Con este capítulo se completa el recorrido que este curso propone alrededor de la óptica y la fotónica, sirviendo de introducción a la comprensión de los fenómenos que tienen que ver con la

¹Fuente: www.investigacionyciencia.es <http://bit.ly/2jwnfkW>

luz y, por extensión, a las ciencias y tecnologías que la emplean para el desarrollo de infinidad de tareas.

Índice de figuras

1. Recreación de una comparativa entre la visión humana y de los gatos. Fuente: Nickolay Lamm. Licencia: Permiso concedido explícitamente por el autor http://bit.ly/1b1Q9tz	II
6.1. Esquema simplificado del fenómeno de la visión y el ojo humano. Fuente: Elaboración propia.	3
6.2. Representación esquemática de la estructura de un ojo humano. Elementos: 1. Cámara posterior 2. Cámara anterior 3. Córnea 4. Pupila 5. Úvea 6. Iris 7. Cuerpo ciliar 8. Coroides 9. Esclerótica 10. Ligamento suspensorio del cristalino 11. Cristalino 12. Humor vítreo 13. Conducto hialoideo 14. Retina 16. Fóvea 17. Disco óptico 18. Nervio óptico 19. Vasos sanguíneos de la retina. Fuente: Wikimedia. Licencia: Dominio público. http://bit.ly/2j9TBSH	3
6.3. Detalle de una iris humano, de color azul. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0. http://bit.ly/2zkziNa	4
6.4. Esquema del funcionamiento del cristalino y del proceso de <i>acomodación</i> . Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 2.5. http://bit.ly/2AeboTq	5
6.5. Representación de la respuesta asociada a los conos (fotorreceptores) azul, verde y rojo. Fuente: Wikimedia (imagen original modificada). Licencia: CC-BY-SA 3.0. http://bit.ly/2hNbv8	6
6.6. Representación esquemática de la miopía. Fuente: Elaboración propia.	7
6.7. Representación esquemática de la presbicia. Fuente: Elaboración propia.	7
6.8. Representación esquemática del astigmatismo (izquierda) y efecto del astigmatismo en la visión (derecha). Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 4.0 (izquierda); BSD ((C) Jean-Jacques Milan.)	8
6.9. Imagen del procedimiento quirúrgico en el que se realiza el implante del chip en la retina del paciente. Fuente: Clínica Barraquer (Dr. Jeroni Nadal).	9
6.10. Imagen de un paciente durante el proceso de rehabilitación tras la intervención en la Clínica Barraquer. Fuente: Clínica Barraquer (Dr. Jeroni Nadal).	10
6.11. Polarización de la luz: uso de un filtro polarizador vertical. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0. http://bit.ly/2AeYuDN	10

6.12. Estereoscopio (parte superior) y tarjeta estereoscópica de 1899 (inferior). Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 2.5 (superior) http://bit.ly/2AFqFwL ; Dominio público (inferior) http://bit.ly/2zNT0WQ	11
6.13. Pantalla de ordenador con dos filtros de polarización. Fuente: Wikimedia. Licencia: Dominio público http://bit.ly/2BuIgoi	12
6.14. Detalle del ojo de un caballo. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0 http://bit.ly/2B1NjXi	13
6.15. Diferentes imágenes con ojos de gato. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0	14
6.16. <i>Tapetum lucidum</i> en un gato . Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0 http://bit.ly/2AHf0xt	14
6.17. Recreación de una comparativa entre la visión humana y de los gatos. Fuente: Nickolay Lamm. Licencia: Permiso concedido explícitamente por el autor http://bit.ly/1b1Q9tz	15
6.18. Ojos de una lechuza. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 2.0 http://bit.ly/2jwHWxt	16
6.19. Detalle del ojo de una serpiente. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-ND 2.0 http://bit.ly/2zA0in0	16
6.20. Ojos de una mosca <i>Holcocephala fusca Robber</i> . Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 2.0 http://bit.ly/2j2FsqV	17