

Modelización de la visión animal mediante lentes y sistemas ópticos

Modelling of animal vision through lenses and optical systems

Óscar Pérez Fuentes

Trabajo de Fin de Grado

Septiembre, 2016

**SOLICITUD DE DEFENSA Y EVALUACIÓN
TRABAJO FIN DE GRADO
Curso Académico: 2015/2016**

ENTRADA

Fecha:
Núm:

Datos Personales


Nº DNI o pasaporte:	Nombre y Apellidos:
78631431	Óscar Pérez Fuentes
Teléfono:	Dirección de correo electrónico:
674022119	alu0100603675@ull.edu.es

SOLICITA la defensa y evaluación del Trabajo Fin de Grado

TÍTULO

Modelización de la visión animal mediante lentes y sistemas ópticos

Autorización para su depósito, defensa y evaluación

D./Dña. Héctor F. Cruz Valentín	
Profesor/a del Departamento de Física	
y D./Dña.	
Profesor/a del Departamento de	
autorizan al solicitante a presentar la Memoria del Trabajo Fin de Grado	
Fdo.: 	Fdo.:

La Laguna, a 30 de Agosto de 2016

Firma del interesado/a



SR/A. PRESIDENTE DE LA COMISIÓN DE GRADO DE LA FACULTAD DE BIOLOGÍA

Índice

Introducción	1
Objetivos	1
Parte experimental.....	1
Contexto teórico	2
Características físicas de la luz.....	3
Propiedades de las lentes y los sistemas ópticos	5
Simplificaciones de la óptica geométrica y aproximación paraxial	7
Estudio de las lentes delgadas	8
Problemas físicos que dificultan la visión: Aberraciones.....	10
Adaptaciones biológicas que permiten la visión	12
Tipos de ojos	12
La visión binocular	20
Principales problemas biológicos de la visión.....	20
El papel de nuestro cerebro	22
Modelización.....	26
Discusión.....	28
Conclusiones	29
Bibliografía.....	30

Resumen

La visión animal es un sentido muy complejo ya que se ha tenido que adaptar a las diversas propiedades físicas de la luz. La mejor adaptación que podemos encontrar en nuestro entorno es el ojo camerular, y por ello es el objetivo de esta modelización. Para entender bien el funcionamiento de este órgano se explican las diversas partes que lo conforman, así como las principales propiedades físicas que lo condicionan y las ecuaciones que nos permiten realizar una modelización. Además, en el laboratorio se puso a prueba la ecuación de las lentes delgadas haciendo uso de un banco óptico para comprobar de primera mano su veracidad y el margen de error que permite asumir.

Debido a diferencias en el mecanismo de acomodación del cristalino se han realizado dos modelos diferentes que permiten calcular la potencia refractiva del ojo de un animal conociendo la distancia mínima y máxima a la que puede enfocar y el diámetro de su ojo. También permite calcular el tamaño de la imagen proyectada en la retina si conocemos el tamaño del objeto y la distancia a la que se encuentra. Si bien estos cálculos poseen un margen de error debido a las simplificaciones asumidas, se ve compensado por la sencillez de los cálculos y de la toma de datos.

Palabras clave: acomodación, lentes delgadas, ojo camerular, visión animal.

Abstract

Animal visual sense is very complex because it has had to adapt to the various physical properties of light. The best adaptation that can be found in our environment is the camerular eye, and this is the reason why is the purpose of this modelling. For a better understanding of the operation of this eye the various parts that make it up are explained, as well as the main physical properties that condition it and the equations that allow us to modelling. In addition, the thin lens equation was tested in the laboratory using an optical bench to confirm first hand its accuracy and the error range that can assume.

Due to differences in the mechanism of accommodation of the lens there have been two different models to calculate the refractive power of the eye of an animal knowing the minimum and maximum distance that can focus and diameter of the eye. It also allows to calculate the size of the projected image on the retina if we know the size of the object and the distance to the eye. While these estimates have an error range due to the assumed simplifications, it is offset by the simplicity of the calculations and data collection.

Keywords: accommodation, animal vision, camerular eye, thin lenses.

Introducción

La visión es el sentido más importante para la mayoría de los animales. Existe una gran variedad de órganos visuales, desde simples células sensibles a la luz distribuida al azar por la superficie del animal, hasta los extraordinariamente desarrollados ojos camerulares, presentes en cefalópodos y vertebrados. Sea cual sea el tipo de ojo que se estudie estará condicionado por las diferentes cualidades físicas que presenta la luz. Para adaptarse a estas cualidades, la evolución ha seleccionado varias estructuras que están presentes en los ojos más desarrollados, incluso cuando estos tienen un origen embriológico diferente. El ojo más evolucionado y el objeto de esta modelización es el ojo camerular. Asumiendo ciertas simplificaciones, como son la aproximación paraxial y la óptica geométrica, podemos modelizar el funcionamiento de este tipo de ojos usando ecuaciones físicas simples, como son la ecuación de las lentes delgadas y del aumento lateral.

Objetivos

- Comprobar en el laboratorio la ecuación de las lentes delgadas usando un banco óptico para estudiar su funcionamiento y el margen de error en que nos permite asumir la ecuación.
- Realizar un modelo sencillo que, usando ecuaciones físicas simples, sirva para entender en líneas generales como funciona la visión animal y nos permita hacer algunas predicciones.
- Estudiar la validez del modelo, sus predicciones y la diferencia que puede existir con la realidad debido a las simplificaciones que se asumen.

Parte experimental

Se usó un banco óptico para comprobar experimentalmente el funcionamiento de la ecuación de las lentes delgadas (Imagen 1). Se realizaron diversas medidas y se usaron varias lentes para comprobar si el resultado coincidía con lo que nos indicaba la ecuación. Se usaron solo lentes convergentes ya que la visión animal no presenta elementos divergentes. Para calcular la potencia de la lente, se coloca la fuente de luz lo más lejos posible y se mide el punto en el

que todos los rayos convergen. Para medir la distancia a la que se forma la imagen se coloca una pantalla con una abertura con forma conocida entre la fuente de luz y la lente y se busca en el disco que se encuentra después de la lente la misma forma invertida. Al mover ligeramente el disco se puede comprobar cómo se distorsiona la imagen a medida que nos alejamos de la distancia de enfoque. Los mejores resultados se obtuvieron al usar una cartulina negra con tres agujeros en forma de pirámide (Imagen 2). Al formar la imagen después de la lente se observan los tres mismos puntos pero formando una pirámide invertida.

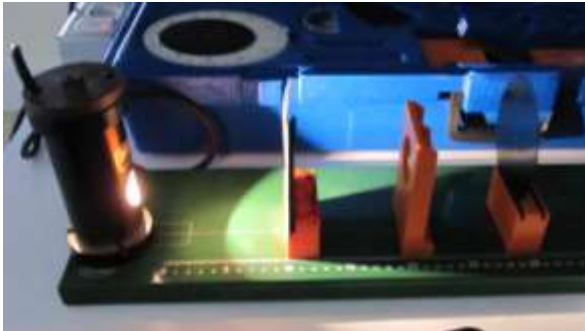


Imagen 1

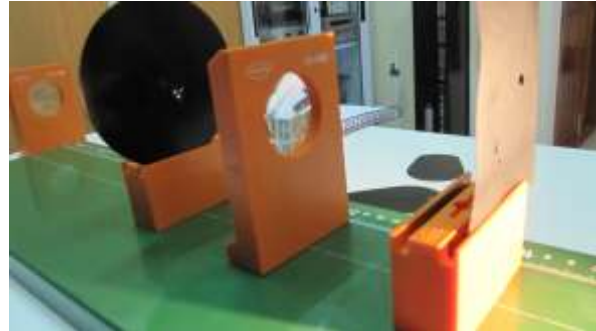


Imagen 2

Las medidas que se tomaron frente a las que predice la fórmula se plasman en la siguiente tabla.

Calculando s				Calculando s'				Calculando $1/f$			
s'	$1/f$	Obs.	Esp.	s	$1/f$	Obs.	Esp.	s'	s	Obs.	Esp.
0,03	+50	0,057	0,06	0,25	+50	0,025	0,0217	0,023	0,15	+50,15	+50
0,05	+50	0,03	0,03̂	0,08	+50	0,05	0,026̂	0,03	0,05	+53,3̂	+50
0,05	+100	0,013	0,0125	0,2	+100	0,01	0,0105	0,01	0,25	+104	+100
0,015	+100	0,03	0,03	0,04	+100	0,015	0,013̂	0,01	0,06	+116,6̂	+100

Tabla 1: resultados obtenidos experimentalmente frente a los esperados por la ecuación. Donde “s” es la distancia del objeto a la lente, “s’” es la distancia de la lente a la imagen formada y “ $1/f$ ” es la potencia de la lente. Ambas distancias están expresadas en metros y la potencia en dioptrías.

Contexto teórico

Este trabajo se fundamenta sobre una gran cantidad de información teórica tanto física como biológica. A continuación se encuentra una explicación de los principales conceptos a tener en cuenta.

Características físicas de la luz

- Onda y partícula

La luz presenta una naturaleza compleja, depende de cómo la observemos se manifestará como una onda (en el experimento de Young) o como una partícula (efecto fotoeléctrico). Estos dos estados no se excluyen, sino que son complementarios.

- Espectro electromagnético

La luz es un tipo de radiación que forma parte del espectro electromagnético. Consideramos luz a aquella que podemos ver, formando el espectro visible. Las diferentes longitudes de onda de este espectro representan los colores que podemos diferenciar. Algunos animales diferencian longitudes de onda que se salen de nuestro espectro visible como la luz ultravioleta o infrarroja.

- Propiedades

- Refracción

La velocidad de la luz al propagarse a través de la materia es menor que a través del vacío y depende de las propiedades del medio y de la longitud de onda de la luz. La relación entre la velocidad de la luz en el vacío y en un medio se denomina índice de refracción del medio. El índice de refracción del aire es de 1. Para calcular el índice de refracción de un medio se utiliza la siguiente fórmula:

$$n = \frac{c}{v}$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad de la luz en el medio.

Cuando la luz pasa de un medio a otro con diferente índice de refracción (mayor variación de la velocidad) cambia de dirección siempre y cuando el haz de luz incida oblicuamente en la superficie del otro medio. Esto lo podemos comprobar con un simple vaso de agua. Si introducimos algún objeto recto como un lápiz en el agua este parece que se curva.

El ángulo de refracción puede ser calculado usando la ley de Snell. Esta afirma que la multiplicación del índice de refracción del medio de partida por el seno del ángulo de incidencia es igual al índice de refracción del medio refractante por el seno del ángulo refractado.

$$n_1 \times \sin \theta_1 = n_2 \times \sin \theta_2$$

– Propagación

Una de las propiedades de la luz más evidentes a simple vista es que se propaga en línea recta cuando atraviesa un medio uniforme. Lo podemos ver, por ejemplo, en la propagación de un rayo de luz a través de ambientes polvorientos o de atmósferas saturadas. La óptica geométrica parte de esta premisa para predecir la posición de la luz, en un determinado momento, a lo largo de su transmisión.

– Difracción

La luz no siempre se propaga en línea recta. Cuando la atraviesa un obstáculo puntiagudo o una abertura estrecha, el rayo se curva ligeramente. Este fenómeno, denominado difracción, es el responsable de que al mirar a través de un agujero muy pequeño todo se vea distorsionado o de que los telescopios y microscopios tengan un número de aumentos máximo limitado. Esta propiedad es consecuencia de la naturaleza ondulatoria de la luz.

– Reflexión

Al incidir la luz en un cuerpo, la materia de la que está constituido retiene unos instantes su energía y a continuación la reemite en todas las direcciones. Este fenómeno es denominado reflexión. Sin embargo, en superficies lisas la mayor parte de la radiación se pierde, excepto la que se propaga con el mismo ángulo que incidió. Ejemplos simples de este efecto son los espejos, los metales pulidos o el agua de un río.

– Dispersión

En el vacío, la velocidad es la misma para todas las longitudes de onda del espectro visible, pero cuando atraviesa sustancias materiales la velocidad se

reduce y varía para cada una de las distintas longitudes de onda del espectro, este efecto se denomina dispersión. Gracias a este fenómeno podemos ver los colores del arcoíris. El color azul del cielo se debe a la luz del sol dispersada por la atmósfera. El color blanco de las nubes o el de la leche también se deben a la dispersión de la luz por las gotitas de agua o por las partículas de grasa en suspensión que contienen respectivamente.

– Interferencia

La forma más sencilla de estudiar el fenómeno de la interferencia es con el denominado experimento de Young que consiste en hacer incidir luz monocromática en una pantalla que tiene una rendija muy estrecha. La luz difractada que sale de dicha rendija se vuelve a hacer incidir en otra pantalla con una doble rendija. La luz procedente de las dos rendijas se combina en una tercera pantalla produciendo bandas alternativas claras y oscuras.

– Polarización

En una onda electromagnética, el campo magnético y eléctrico oscilan en direcciones diferentes pero perpendiculares entre si y la dirección de propagación de la luz. Por convenio se toma que el plano de polarización se refiere al campo eléctrico. El fenómeno de la polarización consiste en filtrar las ondas al pasar por un medio, dejando pasar solo a aquellas que oscilen en cierto plano. También se puede obtener luz polarizada a través de la reflexión de la luz. La luz reflejada está parcial o totalmente polarizada dependiendo del ángulo de incidencia. El ángulo que provoca una polarización total se llama ángulo de Brewster.

Propiedades de las lentes y los sistemas ópticos

Las lentes son objetos transparentes (normalmente de vidrio), limitados por dos superficies, de las que al menos una es curva. La mayoría de las lentes de uso no profesional son lentes esféricas, lo que quiere decir que su curvatura es igual a una parte de una esfera. El otro tipo de lentes son llamadas lentes asféricas, en las cuales la curvatura no es una porción de una esfera. Este tipo de lentes se usa en cámaras de fotos, en telescopios, en optometría, etc. La

ventaja de las lentes esféricas es que permiten corregir o reducir aberraciones ópticas como la aberración esférica y cromática. También permite remplazar un complejo sistema de múltiples lentes esféricas por una sola lente esférica.

- Tipos:

- Convergentes

Las lentes convergentes (o positivas) son más gruesas por su parte central y más estrecho en los bordes. Se denominan así debido a que unen (convergen), en un punto determinado que se denomina foco de imagen, todo haz de rayos paralelos al eje principal que pase por ellas.

- Divergentes

Las lentes divergentes (o negativas) son más gruesas por los bordes y presentan una estrechez muy pronunciada en el centro. Se denominan así porque hacen divergir (separan) todo haz de rayos paralelos al eje principal que pase por ellas, sus prolongaciones convergen en el foco imagen que está a la izquierda, al contrario que las convergentes, cuyo foco imagen se encuentra a la derecha.

- Características

- Foco y distancia focal:

El foco es aquel punto en el que convergen los rayos de luz colimada que llegan a la lente paralelos al eje óptico. En una lente convergente el foco es fácilmente observable, pero en una lente divergente es un concepto virtual. Este se encuentra en el mismo lado del que proceden los rayos, extendiendo hacia ese lado los rayos que han divergido. Geométricamente el foco es un punto sin extensión, pero las aberraciones ópticas causan que este foco sea más bien un círculo borroso. Aun sin aberraciones de importancia, debido a la difracción de la luz, se seguirá formando un círculo borroso llamado el disco de Airy. Cuanto más grande sea la apertura por donde entra la luz menor será el efecto causado por la difracción, pero mayor será el de las diferentes aberraciones.

La distancia focal es la longitud entre el eje de la lente y el foco. Esta distancia varía entre lentes de diferente potencia. Se representa con la letra “f”.

– Potencia y dioptría

La potencia indica la fuerza que tiene una lente para desviar los rayos de luz. Es igual a la inversa de la distancia focal y su unidad de medida es la inversa del metro, usualmente llamada dioptría. Las lentes convergentes tienen una potencia positiva, mientras que en las divergentes es negativa.

Simplificaciones de la óptica geométrica y aproximación paraxial

Para estudiar la interacción entre los rayos de luz y las lentes sin necesidad de complejas ecuaciones podemos asumir ciertas simplificaciones. Las simplificaciones que hace la óptica geométrica son las siguientes:

- Los rayos de luz se propagan en línea recta cuando viajan por un medio homogéneo.
- Se curvan, y en algunas circunstancias se pueden dividir en dos, al pasar entre dos medios diferentes.
- Siguen trayectorias curvas en medios en los que el índice de refracción cambia.
- Pueden ser absorbidos o reflejados.

En óptica geométrica también se descartan los efectos que producen los fenómenos de difracción e interferencia. Otra simplificación que se asume es la aproximación paraxial. La aproximación paraxial es una aproximación para ángulos pequeños que simplifica las leyes trigonométricas de los rayos que se encuentran cerca del eje de la lente, ya que se asume que la desviación que se produce tiene un ángulo que tiende a cero. Esto implica que el comportamiento matemático de estos rayos pasa a ser lineal por lo que los diferentes componentes y sistemas ópticos pasan a ser descritos por matrices simples. El estudio de estos rayos siguiendo la aproximación paraxial se conoce como óptica gaussiana y permite formular ecuaciones simples que nos sirven para calcular parámetros de la formación de imágenes como la distancia focal, la ampliación que produce una lente, etc.

Estudio de las lentes delgadas

Las lentes delgadas son aquellas en las que el grosor de la lente es más pequeño que el radio de la curvatura de la superficie de la lente.

Cuando dos o más lentes delgadas se encuentran juntas la potencia de las lentes combinadas es aproximadamente igual a la suma de las potencias de cada lente.

Para estudiar la formación de imágenes con lentes delgadas tenemos que asumir las siguientes propiedades de los rayos que las atraviesan:

- Todo rayo paralelo al eje principal se refracta pasando por el foco.
- Todo rayo que pasa por el centro óptico no se desvía.
- Todo rayo que pasa por el foco se refracta paralelo al eje principal.

Existen dos ecuaciones importantes para estudiar las lentes delgadas. Una es la ecuación del constructor de lentes y la otra es la propia ecuación de las lentes delgadas, que procede de la anterior.

La ecuación del constructor de lentes se deduce sumando las dos ecuaciones que se usan para calcular la distancia de formación de la imagen para la curvatura de cada superficie de la lente independientemente.

$$\left(\frac{1}{s} + \frac{n}{s'_1} = \frac{n-1}{r_1}\right) + \left(\frac{n}{-s'_1} + \frac{1}{s'} = \frac{1-n}{r_2}\right)$$

Donde n es el índice de refracción del material de la lente, r_1 y r_2 son los radios de curvatura de las dos superficies de la lente, s es la distancia del objeto a la lente y s' es la distancia donde se forma la imagen. s'_1 es la distancia de una imagen virtual formada por la primera curvatura, que es la imagen objeto de la segunda curvatura. Al sumar estas ecuaciones obtenemos la siguiente:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

Sabiendo que la distancia focal de una lente es la distancia imagen que corresponde a una distancia objeto infinita, así que haciendo $s = \infty$, s' sería igual a f . Por lo tanto podemos sustituir esto en la ecuación y obtenemos la ecuación del constructor de lentes.

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

r_1 y r_2 poseen diferentes signos si los dos son convergentes o divergentes, pero depende de cada autor el signo que colocan, por lo que puede haber diferentes ecuaciones para corregir estos cambios. En la ecuación que se encuentra más arriba r_1 es positivo si la primera superficie es convexa, y negativa si es cóncava. En r_2 se invierten los signos ya que se refieren a la otra cara de la lente.

Si unimos las dos anteriores ecuaciones obtenemos lo siguiente, que es la ecuación de las lentes delgadas.

$$\frac{1}{-s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

Con esta ecuación podemos calcular uno de los tres datos conociendo los otros dos, sin necesidad de complicadas formulas. Por ejemplo, conociendo la distancia del objeto a la lente y la distancia de la lente a la imagen podemos calcular la distancia focal y por ende la potencia de la lente. Si conocemos la potencia o distancia focal y una de las distancia podemos calcular la que nos falta. Es una ecuación muy simple y muy útil para estudiar y realizar modelos con lentes delgadas.

Si observamos el esquema de la trayectoria que siguen los rayos de luz podemos observar que se forman dos triángulos rectángulos en los que la altura del objeto, la imagen y la distancia de ambos a la lente serían los catetos mientras que el rayo que pasa por el centro óptico sería la hipotenusa. Como se tratan de triángulos complementarios podemos deducir la fórmula que nos permite calcular el aumento lateral, que utilizaremos para calcular el tamaño de la imagen formada, conociendo el tamaño del objeto que la forma.

$$M = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o} \quad \rightarrow \quad M = \frac{-s'}{s}$$

Donde M es el aumento lateral, h_i es la altura de la imagen, h_o es la altura del objeto, d_i es la distancia de la imagen a la lente (al igual que s') y d_o es la distancia del objeto a la lente (al igual que s). Esta información nos sirve si la comparamos entre diferentes especies de animales, ya que la cantidad de fotorreceptores por superficie varía entre cada una de ellas. De este modo se puede entender la diferencia en la agudeza visual entre diferentes animales.

Problemas físicos que dificultan la visión: Aberraciones

Las aberraciones son las pequeñas desviaciones que no se tienen en cuenta al usar las predicciones de la aproximación paraxial. Ocurren cuando la luz que procede de un punto del objeto no converge en un solo punto después de pasar por la lente. Esto es debido a que los rayos de luz que son desviados no forman un ángulo infinitamente pequeño con el eje óptico, por el contrario, cuanto más nos alejamos del eje óptico más grande es el ángulo que forman los rayos y peor es la distorsión. Las aberraciones producen una imagen borrosa, por ello los fabricantes de instrumentos ópticos procuran corregir estos fallos todo lo que pueden.

Las aberraciones pueden ser de dos clases:

- Monocromáticas

Se les llama así porque ocurren aun cuando usamos luz monocromática. Son causadas por la geometría de la lente. Hay de varios tipos.

- Esféricas

La óptica geométrica predice que la imagen de un punto formada por lentes esféricas no es un punto perfecto sino una pequeña mancha. Esto es debido a que las partes exteriores de una lente esférica tienen una distancia focal diferente a la de la zona central ya que la refracción de los rayos en los bordes es mayor que en el centro. Esto distorsiona la imagen formada y conlleva que un punto tenga una imagen en forma de círculo de bordes borrosos. Esta aberración puede ser corregida usando varias lentes convergentes y divergentes. Se suelen usar lentes asféricas para no tener que usar varias lentes y ocupar menos espacio, pero es más caro de producir.

- Comática

Esta aberración implica que los objetos que no están en el eje óptico aparecen distorsionados. Los rayos paralelos que llegan con cierto ángulo a la lente son desviados en diferente medida. Los que inciden en la parte más cercana se desvían menos que los que llegan a la parte más alejada de la lente formando un punto en forma de coma, como si tuvieran una cola, de ahí su nombre. Este efecto es más fuerte en las lentes parabólicas, por lo que supone un problema

para los telescopios que usan espejos parabólicos. Para solucionar este problema se suele escoger muy bien la curvatura de estos espejos y lentes.

– Astigmatismo

Una lente con astigmatismo es aquella en la que los rayos de luz que llegan en dos planos perpendiculares tienen un foco diferente. Para entenderlo mejor podemos imaginar que usamos una cruz para formar una imagen, la línea vertical y horizontal de la cruz no enfocarán en el mismo punto sino que tendrán dos distancias focales distintas. Este error es debido a que la curvatura de la lente no es simétrica, sino que es mayor en un meridiano que en otro.

– Curvatura de campo

La curvatura de campo es un efecto que produce que los rayos de luz que proceden de un objeto plano paralelo a la lente no forman una imagen bien enfocada en una superficie plana. Si imaginamos una lente sin ningún otro tipo de aberración sabemos que todos los rayos paralelos al eje óptico se enfocan en un solo punto a una distancia focal f de la lente. Si intentamos formar una imagen con esta lente veríamos que los rayos que proceden de puntos cercanos al eje óptico tendrán su foco en f pero a medida que nos alejamos del eje el foco se encontrará más cerca de la lente. Para que estuviera toda la imagen enfocada la superficie donde se enfoca debería ser curva, a pesar de que estos rayos proceden de un objeto plano. Esta aberración no es un verdadero problema para la visión ya que la retina, que es donde se forma la imagen, es curva. En fotografía y en los telescopios sí es un problema que solucionar, ya sea corrigiendo la lente o adaptando el lugar donde se forma la imagen.

• Cromáticas

El índice de refracción de una lente depende del material del que este hecho, pero además también depende de la longitud de onda de la luz que llega. Ante un mismo material, los rayos de luz con diferente longitud de onda son desviados con diferente intensidad. Este fenómeno es conocido como dispersión, y causa que cuando llega a una lente rayos procedentes de una imagen con diferentes longitudes de onda son desviados en diferente medida causando que se enfoquen en diferentes puntos. Esto

implica que en la imagen que se forma se observen márgenes distorsionados con “efecto arcoíris”.

Adaptaciones biológicas que permiten la visión

Tipos de ojos

El ojo es el órgano que permite la visión. Los ojos más simples solo detectan si hay oscuridad o luz, pero es suficiente para orientar al organismo o permitirle seguir un ritmo circadiano. Los ojos más desarrollados son capaces de distinguir diferentes longitudes de onda, regular la cantidad de luz que entra, y lo más importante, formar imágenes de lo que estamos observando. Existen diferentes tipos de ojos, explicados más adelante, y la morfología es bastante variada, pero el ojo más estudiado y mejor conocido es el humano.

Debido a las características físicas de la luz, la estructura de los órganos visuales están enormemente limitados. Por esto se producen fenómenos de convergencia evolutiva entre animales sin ninguna relación, como entre cefalópodos y vertebrados.

El ojo más simple que podemos encontrar está constituido por una foseta abierta y poco profunda tapizada de células fotorreceptoras. Se conocen por ojos en copa o cáliz. Los encontramos sobretodo en platelmintos. No permiten la formación de una imagen ya que a cada fotorreceptor llega luz de muchas direcciones.

El siguiente paso en complejidad es reducir la abertura para que funcione de forma similar a una cámara oscura, término que designa este tipo de ojo. El *Nautilus* es el mejor ejemplo ya que, a pesar de carecer de cristalino, sus ojos son relativamente avanzados.

Añadiendo un elemento refractante justo detrás de esta abertura mejoramos la formación de la imagen. Se denominan ojos en cámara o camerulares. Debido a las ventajas que presenta este diseño lo podemos encontrar en gran cantidad de animales, principalmente vertebrados y moluscos. La convergencia evolutiva ha jugado aquí un gran papel, y prueba de ello es el parecido entre un ojo humano y uno de pulpo.

Otra tendencia evolutiva son los ojos compuestos, que consisten en miles de unidades fotorreceptoras llamadas omatidios. Estos omatidios están formados por una cornea transparente y unas pocas células fotorreceptoras puestas en paralelo formando un rabdómero. Cada omatidio “ve” una pequeña porción del campo visual, que combinándolos todos nos da

una imagen en mosaico y no múltiples imágenes pequeñas como se suele creer. La superficie sobre la que se encuentran estos omatidios es convexa, otorgándoles un gran ángulo de visión.

La mayoría de animales con ojos compuestos presentan también ocelos, que son pequeñas estructuras fotorreceptoras de una sola lente. Existen dos tipos de ocelos, los dorsales o simples y los laterales o stemmata.

Los ocelos dorsales constan de una lente formada por la córnea y una capa de células fotorreceptoras, que puede estar pegada a la lente o separada por un espacio lleno de humor vítreo. Los fotorreceptores son siempre bastones y su número varía entre unos cientos y varios miles dependiendo de la especie.

Los stemmata se diferencian porque detrás de la córnea existe una pequeña lente, además, poseen un solo grupo de células fotorreceptoras denominadas retínula.

El ojo camerular

El ojo humano, y la mayoría de los ojos camerulares, están formados por tres capas. La capa más externa se llama túnica fibrosa y está compuesta por la cornea y la esclerótica. La capa intermedia es conocida como túnica vascular o úvea, formada por la coroides, el cuerpo ciliar y el iris. Entre la córnea y el iris se encuentra la cámara anterior, y la cámara posterior entre el iris y el cristalino. Ambas cámaras están llenas de humor acuoso. Por último, la capa más interna es la retina, que esta irrigada por los vasos sanguíneos de la coroides, visibles con un oftalmoscopio. El espacio comprendido entre la retina y el cristalino se denomina cámara vítrea está llena de humor vítreo. Estas son las principales partes del ojo camerular, si tomamos por ejemplo el ojo humano.

- Esclerótica:

Es la parte blanca visible que recubre y protege el ojo. Está formada por colágeno y fibras elásticas. No es blanca en todos los animales ya que hay algunos mamíferos en los que el color de la esclerótica coincide con el color del iris.

- Cornea:

Es una estructura en forma de menisco con una gran transparencia. Cubre el iris, la pupila y la cámara anterior. Está formada por células organizadas en capas sin ningún

tipo de irrigación sanguínea ya que la transparencia es muy importante, por lo que se nutren por difusión. La curvatura es mayor que la del globo ocular. En los humanos tiene un diámetro aproximado de 12 mm vista de frente. Ya que es la parte por donde penetra la luz hacia el interior del ojo es interesante saber que posee un índice de refracción de aproximadamente 1,37. La cornea es la parte del ojo donde se produce aproximadamente dos tercios de la refracción total, por lo que posee una potencia de aproximadamente 43 dioptrías. En la mayoría de los animales su distancia focal es fija. Sin embargo algunas aves tienen la capacidad de modificar la curvatura de su cornea, lo que les proporciona una mayor capacidad de acomodación.

- Humor acuoso y vítreo:

El humor acuoso es un líquido transparente similar al plasma, pero con una menor concentración de proteínas. Es secretado por el epitelio ciliar y se encuentra relleno en la cámara anterior y posterior. Sus funciones principales son mantener la presión intraocular para conservar la forma del ojo y proveer sustancias nutritivas a los tejidos avasculares que lo rodean. También evita que entre la cornea y el cristalino la refracción fluctúe, ya que posee un índice de refracción de 1,336 que se mantiene siempre estable y uniforme.

El humor vítreo o cuerpo vítreo es un gel transparente que rellena el espacio entre el cristalino y la retina. También es secretado por el epitelio ciliar, pero no se regenera continuamente sino que se mantiene en la cámara vítrea de manera indefinida. Tienen una composición parecida a la cornea, pero con más contenido de agua (98-99% frente al 75% en la cornea) y muchas menos células, siendo estas en su mayoría fagocitos que se encargan de eliminar los restos celulares y demás artefactos que se encuentran. El índice de refracción es de 1,337.

- Coroides:

Es la capa vascular del ojo y se encuentra entre la esclerótica y la retina.

- Cuerpo ciliar:

Incluye el epitelio ciliar y el músculo ciliar, que es el que controla la forma del cristalino. Tiene forma de anillo y se encuentra detrás de la córnea, rodeando al cristalino.

- Iris y pupila:

El iris es una estructura delgada y circular que se encarga de controlar el diámetro y la forma de la pupila. Para realizar esta labor cuenta con músculos dilatadores y un esfínter. La pupila es la apertura que queda en el iris y es por donde pasa la luz hacia la retina. En los humanos la pupila es redonda, pero en muchos animales esto no es así. Los gatos por ejemplo tiene una pupila linear vertical que al dilatarse se redondea, las cabras tienen pupilas alargadas horizontalmente, y las sepias tienen una pupila en forma de “w”.

- Cristalino:

Es una lente biconvexa transparente y flexible, lo que le permite cambiar su forma, y por lo tanto su distancia focal. La superficie anterior está en contacto con la cara posterior del iris y esta bañada por el humor acuoso. La superficie posterior está en contacto con el humor vítreo. El mecanismo mediante el cual se cambia la curvatura de la lente se llama acomodación, y es posible gracias a los músculos ciliares, que están fijados a la capsula del cristalino mediante unos ligamentos suspensorios.

En cefalópodos, peces y anfibios el cristalino es completamente esférico, ya que al estar bajo el agua el índice de refracción no varía mucho entre la córnea y el agua, por lo tanto necesitan una mayor curvatura en la lente para compensar. Como el cristalino no cambia su forma, el mecanismo de acomodación consiste en el movimiento de este hacia adelante o hacia atrás.

El índice de refracción del cristalino no es el mismo en toda su superficie debido a su estructura en capas y la compresión que se ejerce sobre las capas más internas. En el núcleo de la lente el índice de refracción es de alrededor de 1,41, mientras que en la periferia el índice tiene un valor aproximado de 1,38. Este aumento progresivo de la densidad óptica se traduce en un aumento del poder convergente y reduce la aberración esférica. Además, el efecto convergente del cristalino es mayor debido a que las sucesivas capas por las que está formado no son concéntricas. La curvatura de las capas exteriores es menor que la de las interiores, por lo tanto cada capa interna es más potente y tiene una curvatura mayor, lo que da lugar a una lente mucho más potente. Estas características del cristalino son muy importantes ya que permiten una mayor potencia refractiva, una disminución de las aberraciones esféricas y cromáticas

entre otras y que la acomodación sea mucho menor de lo que debería ser si no se cumplieran estas características.

Debido a estas cualidades, modelizar el cristalino y estudiarlo con una óptica geométrica básica es muy difícil. Sin embargo es posible utilizar una lente esférica con el mismo espesor y radios de curvatura si se asume un índice refractivo homogéneo y de aproximadamente 1,422 para que se aproxime a la potencia del cristalino de 21 dioptrías en humanos.

- Retina y fotorreceptores:

La retina es la capa del ojo sobre la que se proyecta y enfoca la imagen. Se extiende sobre la superficie interna posterior del globo ocular hasta llegar casi al cuerpo ciliar. Está formada por tres capas de neuronas interconectadas entre ellas. En contacto con el humor vítreo encontramos una capa de células ganglionares intrínsecamente fotosensibles. En la capa intermedia encontramos neuronas bipolares, amacrinas, y horizontales. Los fotorreceptores se encuentran en contacto con la coroides conformando la otra capa.

De estas neuronas, son sensibles a la luz los fotorreceptores y las células ganglionares. Estas últimas tienen varias funciones, entre las que destacan enviar información sobre la luminosidad ambiente para regular los ciclos circadianos y regular el tamaño de la pupila.

Existen dos tipos de fotorreceptores, los conos y los bastones. La retina humana posee seis millones y medio de conos y ciento veinte millones de bastones.

Los bastones otorgan la visión en blanco y negro y pueden trabajar en condiciones de baja luminosidad. Se encuentran en mayor número en los bordes de la retina ya que son usados para la visión periférica. No aportan agudeza visual ni información espacial. Solo tienen un tipo de pigmento fotosensible pero se encuentra en gran concentración.

Los conos son los responsables de la visión en color y funcionan en condiciones de buena luminosidad. Su concentración es mayor cuando nos acercamos a la mácula ya que nos permiten una mejor visión del detalle. Los humanos presentan tres tipos de conos, cada uno con un tipo de pigmento fotosensible. Los que detectan el azul se

denominan conos S, los que detectan el verde son conos M y los que detectan el rojo son conos L. El resto de colores se originan mediante interacción y sumación de estímulos procedentes de diferentes conos. Sin embargo en los demás animales no es siempre igual. La mayoría de los mamíferos presentan solo dos tipos. Los peces, los anfibios, los reptiles y las aves tienen cuatro tipos de conos. Además de los tres ya comentados también son capaces de detectar el ultravioleta con otro tipo de conos. Las palomas son un caso especial entre las aves, y presentan cinco tipos de conos. Pero el caso más extremo es el de la langosta mantis, que posee doce fotorreceptores.

En la mayor parte de la retina existen fenómenos de inhibición lateral, los cuales son llevados a cabo por las neuronas amacrinas y horizontales. Esto nos permite diferenciar mejor el contraste de los objetos, aunque pueda ocasionar algunas ilusiones ópticas, como las bandas de Mach o la cuadrícula de Hermann.

En la retina se pueden diferenciar varias zonas que poseen características peculiares. La mácula es la zona especializada en la visión fina de los detalles. En ella se encuentra la fovea, una depresión en la retina ocasionada por el desplazamiento lateral de las células ganglionares y bipolares. Además, en esta zona no se encuentran células amacrinas ni horizontales ya que no hay inhibición lateral. Cada cono está conectado con una célula ganglionar, implicando la mejor resolución posible para esta zona. Los bastones también se encuentran ausentes, por lo que todos los fotorreceptores son conos y están muy concentrados, en torno a unos 140000 por milímetro cuadrado en humanos. Este dato es un parámetro importante para determinar la agudeza visual del animal. Muchas aves superan el millón de conos por milímetro cuadrado, para hacernos una idea, esto sería igual a que nosotros utilizáramos unos binoculares con ocho aumentos.

La papila o disco óptico es el punto de la retina por donde salen los axones de las células ganglionares que llevarán los impulsos nerviosos al cerebro. Se encuentra ubicado en la parte nasal de la retina respecto a la fovea. No existen fotorreceptores en esta zona por lo que crea un punto ciego en la visión. El cerebro utiliza la imagen que rodea a este punto ciego para rellenarlo y que no se note su ausencia, pero con un sencillo experimento podemos comprobarlo.

Características propias de los principales grupos animales con ojos camerulares.

Invertebrados

- Moluscos cefalópodos: a excepción del nautilus con sus ojos de cámara oscura, el resto de cefalópodos poseen ojos camerulares. Estos ojos están orientados con estatocistos, por lo que la pupila está siempre horizontal. El origen embriológico de estos ojos son invaginaciones de la piel, mientras que en los vertebrados es el diencéfalo. La mayoría son ciegos para los colores, porque solo poseen un pigmento visual, pero su agudeza visual es excelente bajo el agua. Su cristalino es cilíndrico y el proceso de acomodación lo realizan desplazándolo hacia adelante o atrás. La organización retiniana está totalmente invertida en comparación con los vertebrados, así que los axones de las neuronas no tienen que atravesar la capa de fotorreceptores y por lo tanto no crea un punto ciego.

Al contrario que pasa con los vertebrados, la visión del organismo mejora con la edad. Esto así ya que el ojo del cefalópodo crece con el organismo, lo que le proporciona una mayor superficie en la retina, que es ocupada por nuevos fotorreceptores y además, la mayor superficie ocular le da una mayor capacidad de movimiento del cristalino y por tanto de enfoque.

Vertebrados

- Peces: la pupila suele tener un diámetro fijo, y solo algunos peces pueden variarlo. El cristalino es esférico como en los cefalópodos y también tienen que desplazarlo para realizar la acomodación. El ojo de los peces óseos está ajustado para la visión de cerca y tienen un músculo llamado *lenticular retractor* que mueve el cristalino hacia atrás para enfocar objetos distantes. En los peces cartilaginosos ocurre al contrario, este músculo se llama *lenticular transportator* y mueve el cristalino hacia adelante para enfocar los objetos cercanos, ya que la visión relajada está ajustada para la visión lejana. La mayoría son capaces de distinguir colores e incluso la luz ultravioleta y la luz polarizada, ya que poseen cuatro tipos de receptores del color.
- Anfibios: han desarrollado párpados y glándulas lacrimales para mantener el ojo húmedo y limpio de polvo. El cristalino también es esférico y realiza la acomodación del mismo modo que los peces cartilaginosos. Sin embargo la acomodación que tienen que realizar es menor ya que al estar expuestos al aire la córnea realiza gran parte de la

refracción. Poseen una buena visión a color ya que tienen cuatro tipos de conos, y además, perciben la profundidad.

- Reptiles: poseen párpados y glándulas lacrimales. El cristalino es flexible y tiene forma de lente biconvexa. La acomodación es llevada a cabo por los músculos ciliares, que cambian la curvatura, a excepción de las serpientes, que usan la contracción del iris para cambiar la posición y curvatura de la lente. La visión a color depende de los hábitos del animal, los nocturnos solo poseen bastones, sin embargo los diurnos poseen conos y bastones.
- Aves: la visión es el sentido más importante para estos animales, ya que es necesario para un vuelo seguro. Su agudeza visual es superior que la del resto de vertebrados. En proporción, las aves tienen los ojos más grandes de todo el reino animal. Esto causa que el movimiento ocular dentro de la cavidad ósea sea muy limitado. Sin embargo, se han adaptado y realizan movimientos compensatorios con el cuello para mantener la vista estable, además son capaces de girar la cabeza mucho más que otros animales para abarcar un mayor rango sin mover el cuerpo. A diferencia del ojo de los mamíferos, que es esférico, el de las aves es aplanado, lo que les permite enfocar un mayor campo visual. El cristalino es biconvexo y realizan movimientos de acomodación como los mamíferos, sin embargo algunas aves poseen un segundo juego de músculos, llamados músculos de Crampton, que modifican la curvatura de la córnea, dándoles una mayor amplitud de acomodación. Aproximadamente la mitad de las aves presenta dos fóveas, una para la visión binocular y otra para la visión monocular lateral. La cantidad de receptores por milímetro cuadrado es superior que en el resto de animales, y además, la cantidad de células ganglionares por receptor es mayor por lo que la información que llega al cerebro tiene mucho más detalle que en el resto de animales.

La mayor parte de las aves son tetracromáticas, aunque hay algunas, como las palomas, que son pentacromáticas. En contraste, las aves nocturnas no poseen conos, por lo que no distinguen los colores, pero tienen una gran cantidad de bastones, consiguiendo una agudeza visual excepcional en entornos oscuros. Hay estudios que sugieren que la capacidad de las aves de detectar los campos magnéticos es debido a que pueden “ver” estos campos gracias a sus fotorreceptores (Heyers et al., 2007).

- Mamíferos: para la mayor parte de las especies de esta clase la visión es el sentido más importante del que disponen. El ojo es esférico y la acomodación se realiza exclusivamente por cambios en la curvatura del cristalino. Los cetáceos presentan un cristalino casi esferoidal, pero con la musculatura ciliar atrofiada, por lo que son incapaces de variar la curvatura de esta lente. Esto se debe a que se encuentran en un medio marino que anula el poder refractivo de la córnea, por lo que lo tienen que compensar con una mayor curvatura del cristalino.

La visión en color está menos desarrollada que en reptiles y aves. Por lo general estos animales ven en blanco y negro, lo cual apoya la hipótesis de que los primeros mamíferos eran nocturnos. Sin embargo algunos grupos si han desarrollado la visión en color, como muchos primates, roedores o carnívoros. De estos, algunos como los felinos solo distinguen una gama limitada de color.

La visión binocular

La visión binocular es el tipo de visión en el que se utilizan los dos ojos para formar imágenes tridimensionales mediante la superposición de las imágenes que llegan por cada ojo. Por lo tanto es necesario que ambos ojos estén en al frente para que los campos de visión se superpongan. Los animales que tienen depredadores normalmente tienen los ojos más separados, a cada lado de la cabeza, lo que les da un mayor campo de visión pero un menor campo de visión binocular. Esto les permite ver a los depredadores con más facilidad. Por el contrario los animales depredadores suelen tener los ojos en la parte frontal, reduciendo su campo de visión pero aumentando su campo de visión binocular, ya que necesitan calcular bien las distancias para cazar. Esto también ocurre con algunos animales que, a pesar de no ser depredadores, necesitan distinguir bien la profundidad, como por ejemplo los monos.

Principales problemas biológicos de la visión.

- Miopía:

Es un defecto en la refracción del ojo en el cual los rayos de luz convergen delante de la retina en vez de en la misma. Esto es debido a un exceso de potencia convergente del ojo en relación a su longitud, por lo que se mide en dioptrías negativas. Existen

dos causas para la miopía, el ojo es más alargado de lo que debería en el eje óptico, teniendo forma de uva, o la córnea es demasiado curvada. También se puede dar una mezcla de ambas causas. La miopía provoca que no se puedan enfocar bien los objetos lejanos, pero no afecta a los objetos más próximos, ya que se compensa mediante la acomodación. Para corregir este defecto se usan lentes divergentes o la cirugía.

- Hipermetropía:

Es el defecto ocular contrario a la miopía. Los rayos de luz se enfocan detrás de la retina ya que la potencia del ojo es insuficiente en relación con su longitud. Afecta a la visión a corta distancia, ya que la potencia máxima del cristalino no es suficiente para un correcto enfoque, pero a larga distancia no presentan problemas porque se compensa mediante una pequeña acomodación. Normalmente es debido a la forma del ojo, que es muy corto en el eje óptico, pero también puede estar causado por una debilidad en los músculos ciliares, lo que impide una buena acomodación de la lente, o también puede deberse a una córnea mal formada. Los niños tienen un mayor poder de acomodación, por lo que este problema puede pasar desapercibido en los primeros años, pero este continuo esfuerzo puede ocasionar dolores de cabeza y fatiga visual. Para la corrección de este problema se utilizan lentes convergentes o cirugía.

- Astigmatismo:

Cuando existe una refracción diferente entre dos meridianos oculares impide un enfoque claro de ambos meridianos en un mismo plano. Este fenómeno está provocado por un error en la curvatura de la córnea. Para que la imagen se forme correctamente la córnea debe ser simétrica y regular. Existen muchos tipos diferentes de astigmatismo ya que cualquier irregularidad que se presente en la córnea puede causarlo. En la mayoría de los casos puede ser corregido con lentes cilíndricas, o esferotóricas cuando está asociado a miopía o hipermetropía, sin embargo en los casos más graves hay que recurrir a la cirugía, llegando incluso a ser necesario el trasplante de córnea cuando nos encontramos con situaciones como un queratocono.

- Daltonismo:

Es un defecto que afecta a la visión en color. Normalmente tiene una causa genética, por lo que es hereditario, el más común está ligado al cromosoma X, sin embargo también puede estar causado por daños cerebrales o en la retina, por degeneración

macular, incluso por deficiencia de vitamina A. Existen diferentes grados de daltonismo que se explican a continuación.

La incapacidad de discernir cualquier color, llamada acromatopsia, puede estar causada por razones neurológicas o por que el individuo no presenta ninguno de los tres conos. La visión se ve reducida a una escala de grises.

Cuando únicamente se puede discernir un color, a parte de la escala de grises, se considera un daltonismo monocromático. Y suele estar causado porque solo existe uno de los tres pigmentos de los conos.

Si el problema se encuentra en uno de los tres tipos de conos estaríamos hablando de un daltonismo dicromático que se nombra dependiendo del fotoreceptor afectado. Si afecta al rojo se denomina protanopia, si afecta al verde deuteranopia, y si afecta al azul tritanopia.

Por último también existe un daltonismo en el que se encuentran los tres tipos de conos pero con defectos funcionales, por lo que se confunde un color con otro. Es el daltonismo más común y al igual que en el dicromático existen tres tipos dependiendo del color afectado. El más usual es la incapacidad de detectar el color verde (deuteranomalia), seguido de la incapacidad de detectar el rojo (protanomalia), y el menos común es la incapacidad de detectar el azul (tritanomalia).

- Presbicia

Es la pérdida de la función de acomodación del cristalino. Esta pérdida es progresiva con la edad, aproximadamente dos dioptrías cada década. En torno a los 50 años se ha perdido casi la totalidad de la capacidad de acomodación. La causa más aceptada por la comunidad científica es la esclerosis del cristalino. Esta lente se va endureciendo con el paso del tiempo dificultando el cambio de su curvatura por los músculos ciliares.

El papel de nuestro cerebro

La tendencia más común al pensar en la visión es que percibimos nuestro entorno tal cual llega a nuestros ojos. Sin embargo la imagen que se proyecta en nuestra retina y la que nuestro cerebro nos reproduce pasa por varios procesos en los que se modifican muchos parámetros para que no solo veamos la imagen, sino que también la interpretemos.

Las principales labores que se realizan en estos pasos son: la inversión de la imagen, ya que al pasar a través de la lente se gira totalmente, se rellenan ambos puntos ciegos, se superponen las imágenes de ambos ojos para poder percibir la profundidad, y se le da continuidad al movimiento. Además, la imagen que llega al cerebro tiene mucha menos calidad de la que llega a la retina, ya que el nervio óptico está formado por muchos menos axones de los que deberían si cada fotorreceptor enviara una señal. Sin embargo el cerebro realiza un proceso de interpolación y relleno que aumenta tremendamente la calidad de esta imagen. Este proceso es muy parecido al que se realiza en las aplicaciones informáticas al comprimir y descomprimir una imagen.

La forma más sencilla de demostrar el papel del cerebro en la visión son las ilusiones ópticas. Estas ilusiones nos llevan a percibir características que no se corresponden con la imagen real, o nos dan dos interpretaciones diferentes de la misma imagen. Como estas ilusiones están causadas en su mayoría por los diversos procesos que el cerebro efectúa sobre la imagen que recibe podemos encontrar una gran diversidad de ilusiones ópticas, cada una con su explicación. A continuación se enumeran las más comunes y llamativas, ordenadas por categorías.

Organización perceptiva

- Imagen ambigua:

Son imágenes que utilizan similitudes gráficas para promover la interpretación por parte del sistema visual de dos o más formas distintas. La ilusión del pato-conejo (Imagen 3) y el jarrón de Rubin (Imagen 4) son los ejemplos más clásicos.

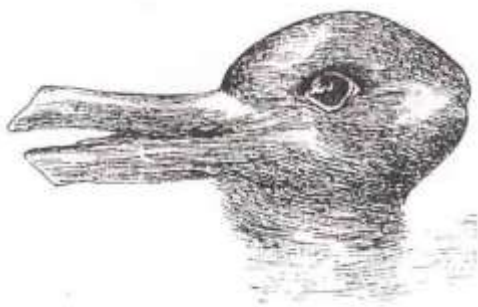


Imagen 3. Fuente: Wikipedia



Imagen 4. Fuente: Wikipedia

- Contornos ilusorios:

Se puede evocar una forma u objeto sin necesidad de que este tenga un contorno definido, simplemente usando otros elementos para que asemejen esta forma nuestro cerebro interpreta el resto. Esto es útil en la naturaleza para intuir objetos del mundo natural cuando no son enteramente visibles. Unos ejemplos de esto son el triángulo de Kanizsa (Imagen 5) o la ilusión de Ehrenstein (Imagen 6).

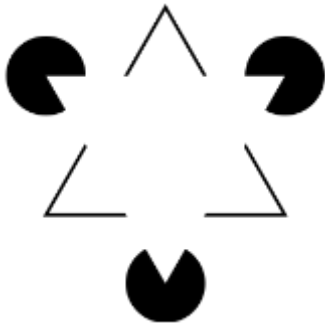


Imagen 5. Fuente: Wikipedia

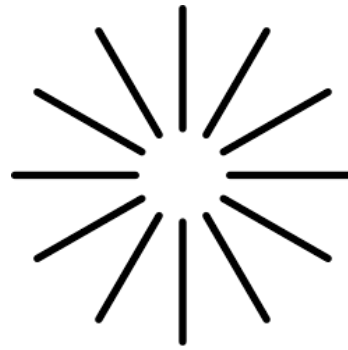


Imagen 6. Fuente: Wikipedia

Percepción de la profundidad y el movimiento

- Ilusión de Ponzo:

Dos líneas a pesar de ser exactamente iguales, son interpretadas de manera diferente dando la sensación de que una es mucho mayor que la otra debido a la sensación de perspectiva que sugiere la imagen de fondo (Imagen 7). Las líneas convergentes con forma de vía de tren son interpretadas como líneas paralelas que se alejan. La línea amarilla superior parece estar más lejos que la inferior y a pesar de que la imagen que ambas líneas forman en nuestra retina sea del mismo tamaño (Imagen 8), el cerebro interpreta que al estar una más lejos tiene que ser mayor.

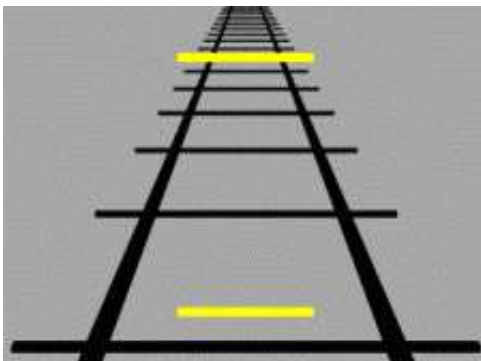


Imagen 7. Fuente: Wikipedia

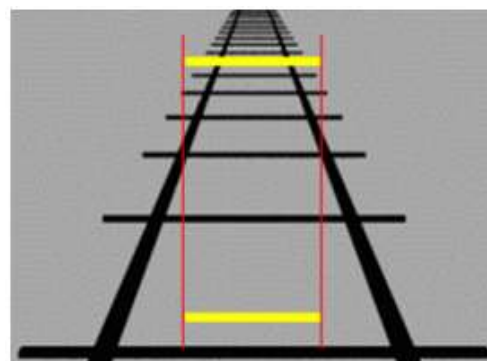


Imagen 8. Fuente: Wikipedia

- Ilusión vertical-horizontal:

Si dos líneas del mismo tamaño se encuentran una vertical y otra horizontal, la vertical parece ser mayor que la horizontal (Imagen 9). La explicación más aceptada es que estamos acostumbrados a un mundo llano, en el que no suelen haber estructuras que se eleven mucho en el eje vertical.

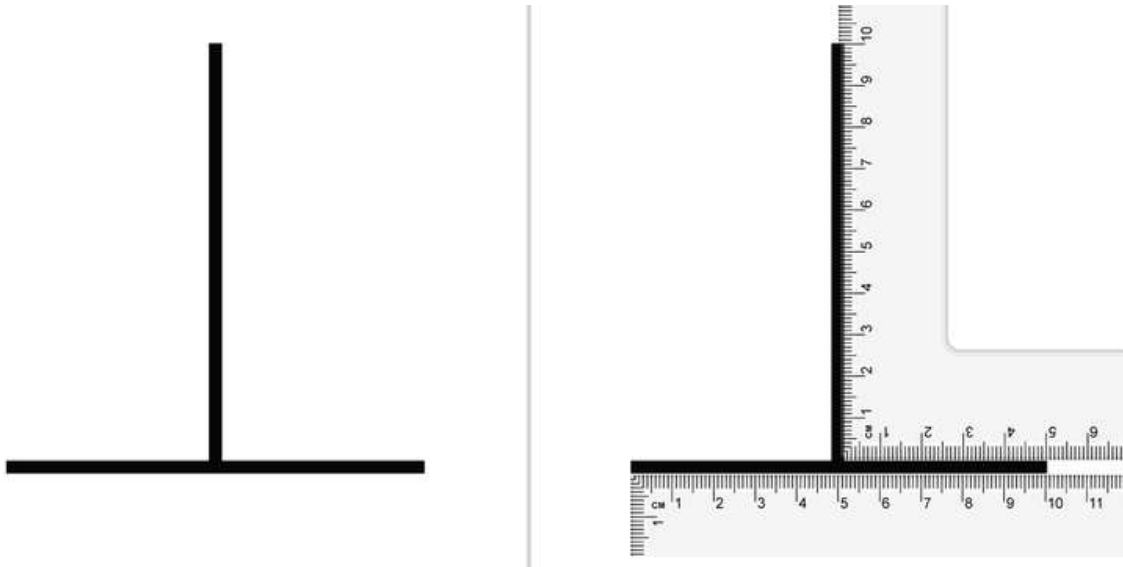


Imagen 9. Fuente: Wikipedia

Constancia de color y brillo

- Tablero de ajedrez de Adelson:

La imagen representa un tablero de ajedrez con casillas claras y oscuras (Imagen 10). La ilusión óptica es que el área de la imagen con la etiqueta A parece ser de un color más oscuro que el área de la imagen marcada B. Sin embargo, en realidad son exactamente del mismo color (Imagen 11). Esta ilusión funciona debido a que nuestro cerebro interpreta el tono de gris no solo dependiendo de la información visual concreta sino en comparación con su entorno. La casilla A está rodeada de casillas más claras, por contraste sabemos que es oscura, mientras que en la casilla B ocurre lo contrario. Ambas casillas son del mismo color porque la sombra del cilindro oscurece las casillas claras lo suficiente como para dejarlas del mismo tono que las oscuras, y las oscuras las oscurece aún más. Sin embargo, como la sombra no tiene un borde definido sino que es difuso, se tiende a ignorar este cambio de tonalidad.

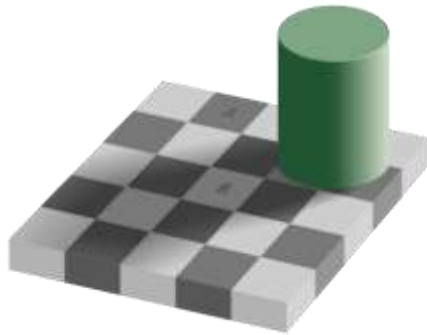


Imagen 10. Fuente: Wikipedia

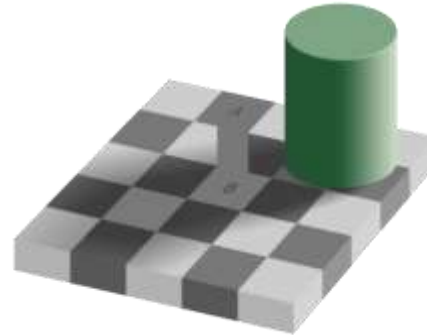


Imagen 11. Fuente: Wikipedia

Modelización

Debido a las diferencias físicas existentes entre los ojos que modifican la curvatura del cristalino y aquellos que lo desplazan para realizar la acomodación lo mejor es realizar dos modelos diferentes.

Los cefalópodos, los peces y los anfibios son los animales que presentan un cristalino redondo y realizan la acomodación desplazando esta lente. Si conocemos el tamaño del ojo y la distancia mínima a la que el animal es capaz de enfocar un objeto podemos calcular la potencia refractiva de su cristalino. Si tomamos un punto de enfoque más lejano y comprobamos donde formaría la imagen usando la potencia que acabamos de calcular, vemos que la distancia focal ahora es más pequeña, por lo que la imagen no se formaría en la retina sino antes, así que el ojo tiene que compensar esta distancia moviendo el cristalino hacia la retina.

Si se toma por ejemplo el ojo de un animal de 5 cm de diámetro que es capaz de enfocar un objeto a una distancia mínima de 10 cm se puede calcular la potencia del cristalino usando la ecuación de las lentes delgadas.

$$\frac{1}{-(-0,1)} + \frac{1}{0,05} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{f} = 30 \text{ dioptrías}$$

Sabiendo que la potencia del cristalino es de 30 dioptrías se puede calcular a qué distancia se formaría la imagen si el ojo se enfoca al infinito, para ello se despeja s' de la ecuación y se realizan los cálculos.

$$s' = \frac{1}{\frac{1}{-\infty} + 30}$$

$$s' = 0,0\hat{3} \text{ cm}$$

La imagen se formaría a $3,3$ cm del cristalino, por lo que si este permaneciera en el mismo lugar la imagen no estaría enfocada en la retina. Para corregir esto el cristalino tiene que moverse el resto de la distancia hasta los 5 cm, es decir, $1,6$ cm. Cualquier objeto a una distancia intermedia entre los 10 cm y el infinito podrá ser enfocado en ese rango de movimiento del cristalino.

Los reptiles, las aves y los mamíferos modifican la curvatura de su cristalino para realizar la acomodación. Usando la ecuación de las lentes delgadas para calcular la potencia del ojo cuando enfoca un objeto cercano y otro lejano se obtienen dos datos diferentes. La potencia máxima corresponde con el ojo enfocando un objeto cercano y la mínima cuando se enfoca el infinito.

Tomando por ejemplo un animal con un ojo de 3 cm de diámetro, que es capaz de enfocar desde el infinito hasta 15 cm de distancia se realizan los siguientes cálculos.

$$\frac{1}{-(-\infty)} + \frac{1}{0,03} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{f} = 33,3 \text{ dioptrías}$$

Esta sería la potencia del ojo enfocado al infinito

$$\frac{1}{-(-0,15)} + \frac{1}{0,03} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{f} = 40 \text{ dioptrías}$$

Esta sería la potencia del ojo enfocado a la distancia mínima capaz de ver con nitidez.

De esta forma se comprueba que el cristalino es capaz de cambiar su curvatura variando la potencia en $6,6$ dioptrías. Si se observan estas ecuaciones es fácil deducir que para un animal que enfoca en el infinito la potencia del ojo en este estado es simplemente la inversa del

diámetro en metros de dicho ojo. Además, para calcular cuánto varía la potencia al enfocar a la mínima distancia solo hay que calcular la inversa en metros de esta distancia.

Finalmente, para ambos casos, se puede calcular el tamaño de la imagen que se forma en la retina usando la ecuación del aumento lateral. Para ello necesitamos conocer las distancias entre la imagen y el objeto con la lente y el tamaño del objeto.

Tomando por ejemplo un objeto de 30 cm de alto a una distancia de 2 metros que está siendo observado por un animal con un ojo de 4 cm de diámetro se realizan los siguientes cálculos.

$$-\frac{d_i}{d_o} = \frac{h_i}{h_o}$$

$$h_i = 0,3 \left(-\frac{0,04}{-2} \right)$$

$$h_i = 0,006 \text{ metros}$$

La imagen que se forma en la retina mide 0,6 cm de alto. Conociendo la cantidad de fotorreceptores por milímetro se puede estimar la definición de la imagen. Realizando los mismos cálculos en diversas especies se puede comparar la agudeza visual de estas.

Discusión

La visión animal es muy compleja ya que depende de muchos factores, tanto características físicas como parámetros biológicos. Por ello, en este modelo se han asumido muchas simplificaciones, a continuación se enumeran las principales.

- La aproximación paraxial.
- La óptica geométrica.
- Tomar la córnea y el cristalino como una lente simple con un índice de refracción homogéneo.
- Asumir que la distancia entre la lente y la imagen es igual al diámetro del ojo.

Todas estas simplificaciones llevan un error asociado que se van sumando en un error total. Sin embargo, realizar los cálculos sin asumir estas simplificaciones sería complicado tanto a nivel matemático, ya que habría que estudiar la formación de la imagen en sistemas de lentes múltiples con índices de refracción variables, como de toma de datos, ya que tendríamos que

buscar una manera de medir de forma precisa la distancia entre el cristalino y la retina, el índice de refracción de las diferentes estructuras biológicas, etc.

El uso principal de este modelo es comparativo, ya que el error del modelo sería el mismo para todas las especies estudiadas. Sin embargo, también nos permite realizar estimaciones aproximadas sobre el movimiento o cambio de potencia del cristalino y la agudeza visual del animal realizando cálculos muy simples.

Conclusiones

- Este modelo asume ciertas simplificaciones, que conllevan un margen de error amplio, sin embargo esto reduce enormemente la complejidad del modelo, así que este margen de error es aceptable.
- Debido al margen de error que presenta el modelo, su uso principal está enfocado a ser comparativo entre diferentes especies animales, ya que así el error es menos significativo.
- Modelizar la visión animal es muy complicado si se quiere minimizar el error ya que depende de muchos parámetros físicos y biológicos, además de necesitar una toma de datos muy precisa.

Conclusions

- This model assumes certain simplifications, which carry a wide error range, however this greatly reduces the complexity of the model, so this error range is acceptable.
- Due to the error range that presents the model, its main use is focused to be comparative between different animal species, so the error is less significant.
- Modelling animal vision is very complicated if you want to minimize the error since it depends on many physical and biological parameters in addition need a very accurate data collection.

Bibliografía

- Guyton, A. y Hall J. 2006. Tratado de fisiología médica. Decimosegunda edición. Capítulo 49. Elsevier. Jackson, Mississippi, EEUU.
- Heyers D, Manns M, Luksch H, Güntürkün O, Mouritsen H (2007) A Visual Pathway Links Brain Structures Active during Magnetic Compass Orientation in Migratory Birds. PLoS ONE 2(9): e937. doi:10.1371/journal.pone.0000937.
- Hickman, C., Roberts, L., Keen, S., Larson, A., I'anson, H., Eisenhour, D. 2009. Principios integrales de zoología. Decimocuarta edición. Capítulo 33, páginas 747 a 750. McGraw-Hill.
- Kane, W., Sternheim, M., Vázquez, J., Mirabent, D. 1989. Física. Segunda edición. Capítulo 23 y 24, páginas 515 a 584. Reverte
- Puell, M. 2006. Óptica Fisiológica: El sistema óptico del ojo y la visión binocular., Universidad Complutense de Madrid.
- Silverthorn, D. 2008. Fisiología humana. Un enfoque integrado. Cuarta edición. Capítulo 10, páginas 357 a 370. Panamericana.

Enlaces (Todos han sido consultados con asiduidad entre Octubre de 2015 hasta Junio 2016)

- https://en.wikipedia.org/wiki/Bird_vision
- https://en.wikipedia.org/wiki/Cephalopod_eye
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Eye>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_optics
- https://en.wikipedia.org/wiki/Geometrical_optics
- https://en.wikipedia.org/wiki/Human_eye
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Lens_\(optics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Lens_(optics))
- https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_aberration
- https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_illusion
- https://en.wikipedia.org/wiki/Paraxial_approximation
- https://en.wikipedia.org/wiki/Small-angle_approximation
- https://en.wikipedia.org/wiki/Thin_lens
- https://en.wikipedia.org/wiki/Vision_in_fishes