

UNIDAD DIDÁCTICA

CIENCIA CON LUZ PROPIA

Aplicaciones
tecnológicas
de la **luz**



FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

Esta publicación está disponible gratuitamente, en formato PDF, en el apartado de publicaciones de la página web www.fecyt.es, con el fin de facilitar su acceso a la comunidad educativa.

La FECYT expresa su más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que han colaborado desinteresadamente con la cesión de textos e imágenes.

Edita y coordina

Unidad Didáctica *Ciencia con luz propia. Aplicaciones tecnológicas de la luz*: Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT).

Anexo *Ciencia con luz propia. Aplicaciones tecnológicas de la luz. Cuaderno de actividades*: Fundación SM.

Coordinación de contenidos

José Antonio García García. Facultad de Ciencias. Departamento de Óptica. Universidad de Granada.

Revisor didáctico

Francisco Javier Perales Palacios. Facultad de Ciencias de la Educación.
Departamento de Didáctica de la Ciencias Experimentales. Universidad de Granada.

Redacción de textos

Joaquín Campos Acosta
José Antonio García García
Luis Gómez Robledo
Javier Hernández Andrés
Enrique Hita Villaverde
Rafael Huertas Roa
Miguel Ángel Martínez Domingo
M.^a Sagrario Millán García-Valera
Ignacio Moreno Soriano
Juan Luis Nieves Gómez
M.^a Angustias Pérez Fernández
Javier Romero Mora
Eva M.^a Valero Benito
M.^a Josefa Yzuel Giménez

Fotografía de portada

El péndulo caótico

Autor: Alexandre Wagemakers

Obra seleccionada de la 8.^a edición del Certamen de Fotografía Científica FOTCIENCIA

Revisión ortotipográfica

Caja Alta Edición & Comunicación (www.cajaalta.es)

Diseño y maquetación

a.f. diseño y comunicación (www.afgrafico.com)

Impresión

Imprenta Mundo

Depósito legal

M-26468-2015

NIPO PAPEL

270-15-110-1

e-NIPO

720-15-111-7

En todos los casos, se prohíbe el uso no autorizado de las imágenes.

UNIDAD DIDÁCTICA

CIENCIA CON LUZ PROPIA

Aplicaciones
tecnológicas
de la **luz**

Índice

I. Presentación	9
II. Prólogo	11
Capítulo 1 ¿Qué es la luz?	14
Capítulo 2 Fuentes y detectores de luz	28
Capítulo 3 Óptica geométrica. Espejos	42
Capítulo 4 Lentes e instrumentos ópticos	56
Capítulo 5 Polarización de la luz	70
Capítulo 6 Interferencias y difracción	84
Capítulo 7 El ojo humano	100
Capítulo 8 El color de la luz y los objetos	114
Capítulo 9 Problemas visuales	126
Capítulo 10 Imágenes y percepción visual	136
III. Justificación de la estructura de la obra y relación con los bloques de contenidos curriculares de la ESO y el Bachillerato	149
IV. Glosario	153
V. Equipo	157

I. Presentación

El 20 de diciembre del 2013, la Organización de las Naciones Unidas, en su 68.^a Asamblea General, proclamó 2015 como el Año Internacional de la Luz y las Tecnologías basadas en la Luz, con el fin de concienciar a la sociedad de la importancia de esta fuente de energía y de sus tecnologías asociadas para el desarrollo de la vida y del bienestar humano.

Hoy en día, el uso de la luz es imprescindible. Difícilmente puede concebirse una sociedad sin electricidad, desde una simple bombilla hasta los lectores de códigos de barras o los dispositivos de telecomunicación. La luz ha revolucionado, entre otros aspectos, la medicina, a través de distintos instrumentos y máquinas, pero también ha posibilitado el desarrollo de Internet, abriéndonos un sinfín de posibilidades a nuestro alcance: correo electrónico, prensa digital, gestiones administrativas... ¿Quién podría imaginar, hace unos años, que podríamos realizar transferencias bancarias desde casa?

La ciencia forma parte de nuestras vidas. Utilizamos la tecnología, la medicina y los transportes sin reparar en toda la investigación previa que ha hecho posible los avances que nos permiten disfrutar de una gran calidad de vida.

Los cambios tecnológicos y científicos de las últimas décadas han sido extraordinarios y fruto del trabajo de un gran número de científicos y tecnólogos. Ellos son, y serán, una pieza clave en el desarrollo de nuestra sociedad. Por eso, es preciso que los jóvenes que ahora están en las aulas despierten su vocación científica y acepten el reto de convertirse en profesionales de la ciencia y la tecnología.

La Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT), como principal impulsora a nivel nacional de la difusión de la ciencia en España, ha querido sumarse a esta iniciativa del Año Internacional de la Luz y, a lo largo del año 2015, ha desarrollado distintas actividades relacionadas con esta temática, entre las que se encuentra esta Unidad Didáctica, dirigida al profesorado de la Educación Secundaria y el Bachillerato.

¿Qué es la luz? ¿Cómo es nuestro ojo? ¿Vemos lo que queremos ver? Estas son algunas de las preguntas a las que da respuesta esta publicación, coordinada por el profesor José Antonio García García, del Departamento de Óptica de la Universidad de Granada, y en la que han participado profesores e investigadores del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) y la Universidad Miguel Hernández (UMH).

Los ejercicios, anécdotas y ejemplos que encontramos en cada uno de los diez capítulos, así como los materiales auxiliares —películas, revistas y páginas web— ofrecen a los docentes las herramientas necesarias para apoyar su labor y contribuir a incrementar el interés de los estudiantes por la ciencia, uno de nuestros objetivos prioritarios.

La editorial SM ha colaborado en esta Unidad Didáctica con la realización de un cuaderno de actividades, ideado y diseñado por profesores con una larga experiencia en la docencia de la Educación Secundaria y el Bachillerato.

La versión electrónica de esta Unidad Didáctica, así como las ediciones anteriores, que llevan realizándose desde el año 2003, están disponibles para su descarga en nuestra página web www.fecyt.es.

José Ignacio Fernández Vera

Director general

Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT)

II. Prólogo

Con motivo de la proclamación del 2015 como el Año Internacional de la Luz y de las Tecnologías basadas en la Luz por parte de la Asamblea General de las Naciones Unidas, la FECYT se ha querido sumar a esta iniciativa con la elaboración de esta Unidad Didáctica. Dos de los objetivos de dicha celebración han constituido la razón de ser de la misma:

- Mejorar la **comprensión pública** acerca de cómo la luz y las tecnologías relacionadas con esta afectan a la vida cotidiana y son esenciales para el futuro desarrollo de la humanidad.
- Fomentar la **capacidad educativa** mediante actividades orientadas a la difusión de la cultura científica entre los jóvenes de todo el mundo.

No vamos a insistir aquí en la importancia que la luz y sus tecnologías tienen para nuestras vidas, pues basta pensar en las limitaciones que poseen los invidentes o en las múltiples molestias que nos causarían en nuestro día a día no disponer de luz eléctrica.

No obstante, la luz constituye un fenómeno complejo de entender desde un punto de vista científico, y así lo ha mostrado la historia de la ciencia al retrasar el consenso científico sobre su naturaleza hasta principios del siglo XX. A su vez, la luz es un elemento que pone en conexión múltiples facetas del conocimiento y la tecnología desarrollados por el ser humano (física, química, biología, astronomía, ingeniería, arte...). Ello nos lleva a intuir que la luz constituye un fenómeno cuya naturaleza última escapa a la población que no dispone de una cultura científica específica en este campo. Las causas de este hecho son múltiples, aunque básicamente las podríamos atribuir a la propia complejidad de los mecanismos de generación, transmisión y detección de la luz, a unos enfoques inadecuados de enseñanza (o a una ausencia de esta) o a las propias limitaciones cognitivas de los estudiantes.

A estos obstáculos habría que sumar otros que tienen que ver con la doble dimensión de todos los fenómenos de la naturaleza: microscópica y macroscópica. Si ya de por sí es difícil para los estudiantes más jóvenes comprender algunos fenómenos ópticos observables, más complejo resulta conectarlos con los mecanismos microscópicos (atómicos) que permitirían justificarlos. Sin embargo, no se debería renunciar a este último objetivo. Y es que una comprensión global acerca del fenómeno de la luz exige un conocimiento acerca de sus múltiples características (a saber, su doble naturaleza ondulatoria y corpuscular, sus posibilidades de interacción con la materia, etc.), las cuales se van a tratar a lo largo de la presente obra. Resulta, pues, oportuno, a nuestro juicio, aprovechar la aludida proclamación del Año Internacional de la Luz para presentar una Unidad Didáctica como esta, que trata de poner a disposición del profesorado y del alumnado de la Educación Secundaria y el Bachillerato los principales fenómenos, dispositivos y órganos relacionados con la luz y la vida cotidiana.

A la hora de asumir la elaboración de la Unidad Didáctica, nos planteamos que cada capítulo comenzara señalando la importancia de los fenómenos y conceptos en el mundo actual, pensando, especialmente, en las aplicaciones más próximas a los alumnos de la Educación Secundaria. Buscando un mayor entendimiento, hemos reducido el uso del lenguaje muy técnico y hemos evitado, en la medida de lo posible, las ecuaciones físico-matemáticas de cierta complejidad. Se han utilizado, además, recursos cercanos a ellos, actividades teórico-prácticas y notas históricas que indican la evolución de los contenidos abordados. Hemos incluido en el anexo III los contenidos relacionados con la luz en el nuevo currículo de la Educación Secundaria derivado de la LOMCE, así como su vinculación con los distintos capítulos del libro. Por último, quisiéramos mostrar nuestro agradecimiento a la FECYT por haber hecho posible esta publicación y deseamos que sirva para cumplir los objetivos que con tanta ilusión y esfuerzo nos hemos planteado.

Francisco Javier Perales Palacios
José Antonio García García



UNIDAD DIDÁCTICA

CIENCIA CON LUZ PROPIA

Aplicaciones
tecnológicas
de la **luz**



A photograph of a dirt path winding through a dense forest. Sunlight filters through the trees, creating a dappled light effect on the path and surrounding foliage. The trees are tall and thin, with a thick canopy of green leaves. The path is covered in fallen leaves and small plants.

Capítulo 1

¿Qué es la luz?

Javier Romero Mora

Introducción

La pregunta que da título a este primer capítulo de la Unidad Didáctica es tan antigua como la inquietud científica del ser humano. Es razonable suponer que, cuando nuestros antepasados empezaron a interesarse por comprender el mundo que les rodeaba, lo primero que quisieron conocer fue el porqué de los acontecimientos más inmediatos de su entorno, como, por ejemplo, el motivo por el cual el Sol se puede ver cuando amanece o por qué se observan fenómenos luminosos en la naturaleza, como el arcoíris. Se dice que las tres grandes preguntas que se plantearon los filósofos de la Grecia clásica, a los que podemos considerar como los primeros científicos, fueron: ¿de qué está constituida la materia?, ¿qué leyes rigen el movimiento de las estrellas y planetas? y ¿por qué vemos? Esta última cuestión, en términos más actuales, se podría formular de la siguiente manera: ¿qué es la luz?

Es normal que, en aquella época, en vez de utilizar el término moderno «luz», se empleara el concepto de «visión»; de hecho, la palabra que da nombre a la rama de la física que estudia la luz, la óptica, tiene su origen etimológico en la palabra griega *optikos*, es decir, «relativo o perteneciente a la visión». Esta raíz lingüística no debería sorprendernos, ya que la visión, que tiene su origen en la luz, posibilita al ser humano el contacto inmediato con el mundo exterior. Habitualmente, se considera que recibimos entre el 60% y el 80% de la información que nos rodea a través del sentido de la vista; sin duda, esta es una de las razones que impulsó a los primeros científicos a intentar comprender por qué vemos o qué lo hace posible.

A lo largo de los siglos, el estudio de la visión se fue haciendo independiente del interés por el agente físico que la provoca (la luz), si bien para comprender el fenómeno de la visión se necesitan conocimientos sobre aquella y dicho estudio aún continúa. Sin embargo, desde la Edad Media se empezó a analizar la luz como un fenómeno aislado, sin ligarlo necesariamente a la visión. Desde el momento en el que se describió la luz a partir de

las fuentes que la emiten, naturales o artificiales, se han realizado investigaciones a fondo a través del estudio de los fenómenos luminosos que esta genera; por ejemplo, se ha intentado identificar las leyes que rigen su propagación, las reacciones que provoca al incidir en algunos materiales o el motivo por el cual, al sumar luces de distintos colores, se puede conseguir luz blanca.

Como procedimiento habitual en el ámbito de la física, se buscan explicaciones a los fenómenos de la naturaleza mediante modelos, y estos son útiles si proporcionan un razonamiento convincente de dichos fenómenos e, incluso, posibilitan desarrollos tecnológicos. En el caso de la luz, se han presentado tres modelos exitosos a lo largo de la historia para dar respuesta a la pregunta «¿qué es la luz?». Estos modelos son, según el orden cronológico en el que se propusieron, el geométrico, el ondulatorio y el cuántico. El modelo geométrico se utiliza principalmente para explicar los fenómenos de propagación de la luz, las trayectorias que sigue esta al propagarse y la reflexión y la refracción lumínicas sobre distintos medios materiales. Sus aplicaciones tecnológicas han sido innumerables, sobre todo en la fabricación de instrumentos ópticos para la formación de imágenes.

En física, cuando un determinado modelo no puede explicar unos fenómenos concretos, se elabora un nuevo modelo; este es el caso del modelo ondulatorio, que se introdujo para explicar fenómenos de difracción, interferencia y polarización de la luz. Este modelo, que se completó con la idea de que la luz son ondas electromagnéticas, dio lugar también a la explicación de fenómenos en los que la luz interactúa con la materia, como la dispersión de la luz en la atmósfera o la absorción de la luz en materiales. El modelo ondulatorio también está relacionado con multitud de aplicaciones tecnológicas, como, por ejemplo, el procesado óptico de imágenes o la **interferometría**, que permite medir con una precisión máxima.

Posteriormente, fue necesaria la introducción de un nuevo modelo, el cuántico, a través del cual se explican fenómenos de interacción de la luz con la

materia a nivel microscópico, como, por ejemplo, el efecto fotoeléctrico. Sobre la base de este nuevo modelo, en los últimos años se ha desarrollado de forma espectacular la ciencia conocida como «fotónica», de la que forman parte innovaciones como los láseres, las tecnologías de las comunicaciones ópticas o los detectores de **radiación** basados en **semiconductores**, como los que tenemos en las cámaras fotográficas.

En este punto, es necesario indicar que estos tres modelos conviven en armonía en la actualidad; es decir, la aparición de un modelo nuevo no ha invalidado ninguno de los anteriores. Esto se debe a que siempre hay que adoptar el modelo que explica un fenómeno de la forma más sencilla; por ejemplo, resultaría absurdo recurrir al modelo cuántico para explicar por qué se refleja la luz en un espejo.

Por otra parte, el hecho de que se mantengan vigentes los distintos modelos es un buen ejemplo

de la naturaleza de la ciencia en general y de la física en particular, que elabora modelos para explicar los aspectos más íntimos y abstractos de la naturaleza, y dicha explicación ha de ser satisfactoria y, si es posible, sencilla.

Este capítulo se presenta con un doble objetivo: por una parte, pretende dar una primera respuesta a la pregunta «¿qué es la luz?», por lo que en los tres apartados siguientes se ampliarán las ideas sobre los modelos de la luz que se han esbozado en esta introducción, definiendo algunos conceptos fundamentales intrínsecos a ellos. Y, por otra parte, pretende servir como introducción al resto de la obra, con ánimo de motivar el desarrollo del resto de los temas. De esta forma, si se cita, por ejemplo, la difracción de la luz, no se explicará aquí este fenómeno en profundidad, sino que servirá para motivar su estudio dentro del contexto global del conocimiento de la luz y de los fenómenos lumínicos.

El modelo geométrico

La luz es energía. Esta afirmación parece clara, ya que sabemos que la energía se transforma en otra forma de energía o es capaz de realizar un trabajo. Si recibimos la luz del Sol, somos conscientes de que nuestro cuerpo se calienta, pues ha habido una absorción de la luz y ello ha dado lugar a una serie de cambios, como una subida de temperatura o el enrojecimiento de nuestra piel.

En el modelo geométrico de la luz, esta se considera una energía que es emitida (o radiada) por una serie de fuentes emisoras (el Sol, las estrellas, una lámpara de incandescencia, un led o un láser), y sabemos, desde hace mucho tiempo, que se propaga a una gran velocidad por el aire, a unos 300 000 km/s. Además, desde la Antigüedad clásica se entiende que esta propagación suele ser en línea recta (Figura 1A) cuando se trata de trayectos cortos en la atmósfera, dentro de una habitación o a través de un vidrio. Sin embargo, la luz también puede seguir trayectorias curvas (Figura 1B) cuando realiza trayectos largos en la atmósfera o

en los conocidos como «medios GRIN», que veremos posteriormente.



Figura 1A

Ejemplo de trayectoria rectilínea de la luz.

Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo y Luis Gómez Robledo.

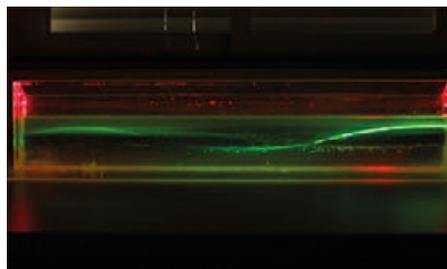


Figura 1B

Ejemplo de trayectoria curvilínea de la luz.

Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo y Luis Gómez Robledo.

Las trayectorias que sigue la luz cuando viaja de un punto a otro se llaman «rayos de luz» y, normalmente, se dibujan como vectores. Esto resulta válido para aquellos casos en los que la luz sigue líneas rectas en su propagación. Si miramos la lámpara con la que se iluminan las páginas cuando estamos leyendo un libro, por ejemplo, la luz se emite en un punto determinado de la lámpara y llega hasta nuestro ojo siguiendo una línea recta, es decir, dibujando un rayo rectilíneo. Este es el mismo recorrido que sigue la luz que ilumina ese libro.

Como sabemos por nuestra experiencia, las lámparas que nos encontramos en nuestra vida cotidiana emiten luz en todas direcciones. La prueba es que podemos ver la luz que emiten cuando nos situamos en distintas posiciones con respecto a ellas. No ocurre lo mismo con los láseres, que emiten en un cilindro de luz muy fino, llamado «haz», en una sola dirección. Dos errores frecuentes son suponer que una fuente de luz, como el Sol o un led, emite rayos y llamar «rayo láser» a la fuente de luz láser. El concepto de «rayo» es puramente matemático, una trayectoria, y no podemos suponer que una fuente de luz emite rayos como si fueran flechas, aunque se representen de este modo.

Unido al concepto de velocidad finita de la luz (en la Antigüedad se creía que era infinita) se encuentra el concepto de índice de refracción del medio material por el que viaja la luz. Este concepto se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío (aproximadamente la misma que en el aire) y la velocidad de la luz en el medio, normalmente menor. Es decir:

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

Este concepto caracteriza a los medios y, dependiendo de su valor, dicho medio se puede considerar homogéneo —si el índice es constante, como sucede con los vidrios y muchos plásticos— o heterogéneo —si el índice varía de un punto a otro, como en el caso de la atmósfera en su conjunto o de los **medios GRIN (de gradiente de índice)**, muy utilizados en la fabricación de fibras ópticas—. También existen medios en los que la velocidad

de la luz es distinta según las direcciones dentro del medio, como es el caso de la mayoría de los cristales (aquí, es muy importante no confundir «cristales» con «vidrios»).

En este sencillo modelo, en el que la luz es energía que se propaga en línea recta (en los medios homogéneos) o siguiendo unas trayectorias curvas que pueden ser calculadas gracias a las ecuaciones que las rigen, se incluyen también las primeras explicaciones sobre los fenómenos de la reflexión y la refracción de la luz.

La reflexión es el fenómeno que ocurre cuando la luz incide sobre la superficie de un medio material y parte o el total de dicha luz no entra en el material, sino que vuelve al medio del que provenía (Figura 2). Se distinguen dos tipos de reflexión: la especular (cuando la superficie está pulida) o la difusa (cuando la superficie es rugosa). En la Figura 2 se muestran representadas las trayectorias de la luz (rayos) en cada caso. Cuando se produce una reflexión especular —como sucede en el caso de un espejo, por ejemplo— la luz que incide en una dirección se redirige también en una sola dirección y obedece a la ley de la reflexión, conocida ya en la Grecia clásica. En cambio, en la reflexión difusa, la luz vuelve al medio del que provenía en muchas direcciones. El fenómeno de la reflexión especular se explicará con detalle en el capítulo 3.

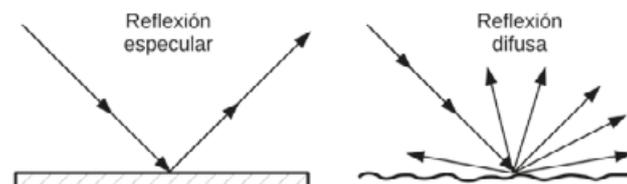


Figura 2
Reflexión de la luz en una superficie pulida (izquierda)
y en una superficie rugosa (derecha).

Fuente: Javier Romero.

En el caso de que la luz penetre en el medio y viaje o se transmita dentro de él (Figura 3), puede seguir una sola dirección —conforme a la ley de la refracción, también conocida como ley de Snell o

1 ¿Qué diferencia hay entre «cristal» y «vidrio»?

ley de Descartes—, pero cambiando su dirección, salvo si incide perpendicular a la superficie, o puede seguir varias direcciones si la superficie es rugosa, dando lugar a un medio al que llamaríamos «translúcido».

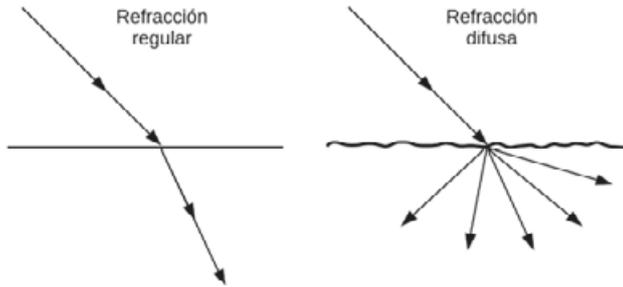


Figura 3
Refracción de la luz en una superficie pulida (izquierda) y rugosa (derecha).
Fuente: Javier Romero.

Cuando la luz se propaga por un medio, siempre hay algo de absorción, pero si se absorbe poca luz, hablamos de un medio transparente; sin embargo, si crece la absorción, se transmite menos luz, pudiendo llegar a no transmitirse y, entonces, hablamos de medio opaco. Piénsese en un vidrio en el que, al llegar la luz, parte se refleja, casi ninguna se absorbe y el resto se transmite: para nosotros es transparente. Si el vidrio está coloreado, absorbe más unas longitudes de onda que otras y, si está tintado negro (como los vidrios que se usan para ver el Sol en un eclipse), casi nada se transmite.

Con estos sencillos conceptos y leyes, diversos científicos y tecnólogos a lo largo de la historia fueron capaces de diseñar y construir los primeros telescopios para formar imágenes del universo, los microscopios para observar los objetos más diminutos o las cámaras fotográficas para registrar imágenes de forma permanente.

Algo de historia

Euclides, en su libro *Óptica* (280 a. C.), ya dice que la luz viaja en línea recta y apunta, por tanto, al concepto de «rayo de luz». De acuerdo con la escuela platónica, sigue considerando la visión como una propiedad del alma y que los rayos emergen de los ojos del observador hasta alcanzar (palpar) los objetos. A pesar de que hoy en día sabemos que estos conceptos son erróneos, en la Grecia clásica se produjeron avances notables en el estudio de la luz, como la enunciación correcta de la ley de la reflexión. Muy posteriormente, tras periodos de tiempo de escasos o nulos avances, Alhacén de Basora (965-1039 d. C.) apunta a la idea de que las fuentes de luz iluminan los objetos y que la luz que emerge de estos llega a los ojos, permitiendo la visión. Alhacén tenía un buen conocimiento del interior del ojo gracias a la descripción anatómica del mismo realizada por Galeno (130-201 d. C.).

2 Investiga acerca de la obra de científicos como Euclides, Arquímedes o Alhacén.

El modelo ondulatorio

La luz es una onda. Esta afirmación es un poco arriesgada y abstracta, por lo que conviene explicarla y matizarla. Desde el siglo xvii en adelante, varios científicos, como Christiaan Huygens y otros muchos, se ocuparon de estudiar fenómenos luminosos en los que se observaba que la luz se comporta de forma parecida a la de otras ondas ya conocidas. Cuando se interponen pequeños obstáculos en su trayectoria, la luz se

difracta, se puede polarizar o puede interferir con otras luces.

Pero antes de seguir profundizando en este tema, parece imprescindible explicar qué es una onda. Una onda es una perturbación que se propaga en el espacio y cambia en el tiempo. Un ejemplo cercano es la onda que se produce al dejar caer una piedra en el agua (Figura 4). En ese caso, la perturbación que se propaga es una elevación y un

descenso del agua en varios puntos. Los distintos puntos del agua son alcanzados por la onda (la perturbación) y, a causa de esto, sus partículas suben y bajan.



Figura 4
Ondas en el agua.
Fuente: Luis Gómez Robledo.

También es interesante ver cómo estas ondas pueden sufrir una difracción si colocamos un obstáculo en su camino (Figura 5). Profundizaremos sobre este tema en el capítulo 6.

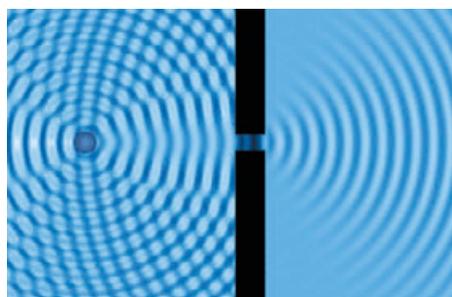


Figura 5
Difracción de ondas.
Fuente: Javier Romero.

En las Figuras 6A y 6B observamos qué le sucede a la luz si la hacemos pasar por una rendija que la limite. En vez de obtener una luz con un contorno delimitado por una sombra, se obtiene luz donde no se esperaba, algo que se conoce como «patrón

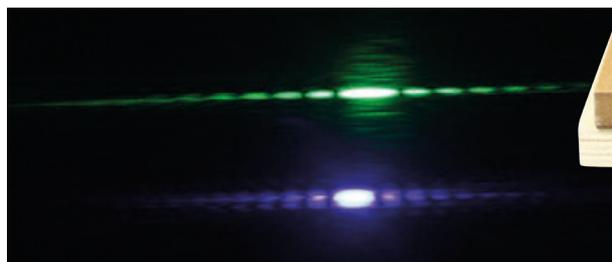


Figura 6B
Ejemplos de patrones de difracción obtenidos en la pantalla del experimento realizado.
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo y Luis Gómez Robledo.

de difracción». Este es un fenómeno típicamente ondulatorio, e hizo pensar a científicos, ya en el siglo XVII, que la luz podía ser un tipo de onda. A lo largo de los años, se demostró también que dos luces podían interferir entre ellas y generar zonas claras y oscuras en las zonas en las que se superponen (Figura 7). Que la suma de dos luces pueda generar oscuridad o una luz de intensidad mayor que la suma simple de ambas es un fenómeno típicamente ondulatorio, ya que otras ondas, como las del sonido, también lo presentan.

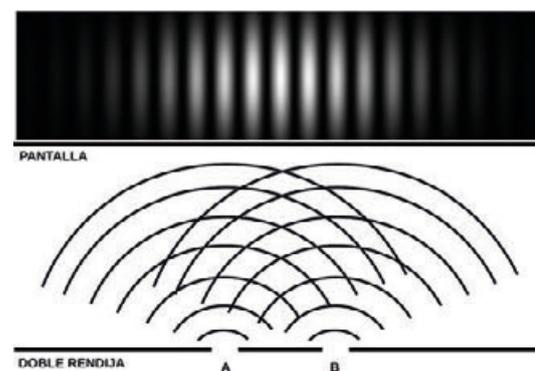


Figura 7
Interferencias de luz con doble rendija.
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

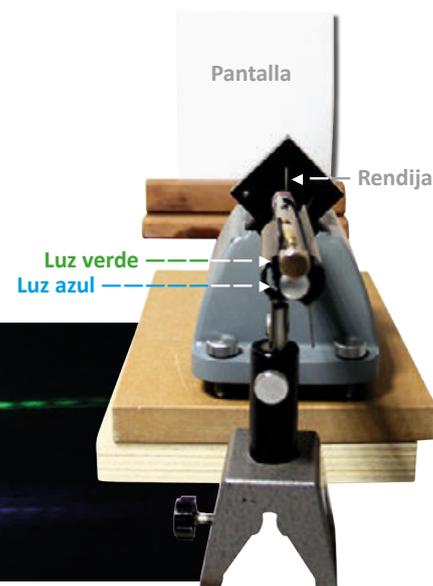


Figura 6A
Dispositivo para observar la difracción de la luz por una rendija.
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo y Luis Gómez Robledo.

También se descubrió que la luz se comporta como una onda transversal; es decir, que, al igual que en las ondas de agua que veíamos anteriormente, la perturbación es perpendicular a la dirección de propagación. El movimiento vertical de cada partícula de agua es perpendicular a la dirección en la que avanza la onda (radial).

Asimismo, se dice que la luz presenta polarización. Las experiencias con polarizadores nos dan idea de ello (Figura 8 y Vídeo 1). Si interponemos dos polarizadores frente a la luz, esta se ve o no en función de la orientación de uno con respecto al otro. Esto indica que algo ocurre en la dirección transversal a la dirección de propagación de la luz. Profundizaremos sobre este tema en el capítulo 5.

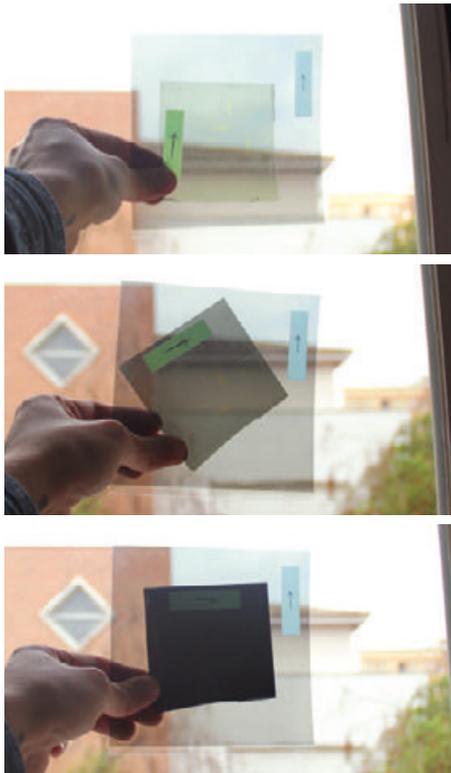


Figura 8 y Vídeo 1
Experiencias con dos polarizadores lineales (vídeo de este proceso en <https://goo.gl/xDtwwk>).
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.



En las ondas podemos definir lo que llamamos «longitud de onda» o distancia entre dos puntos consecutivos con igual valor de la perturbación (λ) (Figura 9).

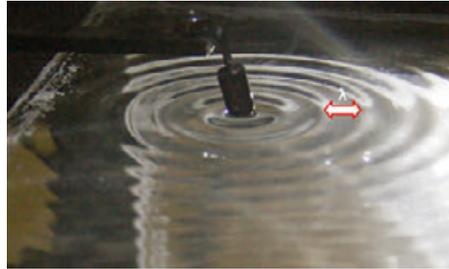


Figura 9
Ondas de agua y concepto de longitud de onda (λ).
Fuente: Luis Gómez Robledo.

Si pudiéramos detener el tiempo, en el caso de las ondas en el agua, la longitud de onda sería la distancia entre dos crestas consecutivas. También se define la frecuencia (f) o velocidad a la que se repite la perturbación en un punto dado. Esta se medirá en ciclos por segundo (hercios). La frecuencia, la longitud de onda y la velocidad a la que se propaga la onda se relacionan mediante la fórmula:

$$v = \lambda f$$

Como se puede apreciar, a igual velocidad, cuanto mayor sea la frecuencia, menor será la longitud de onda.

Si volvemos al tema de la luz, se plantea entonces una duda importante a resolver: ¿qué tipo de onda es? o ¿qué tipo de perturbación se propaga? J. C. Maxwell proporcionó la respuesta a estas preguntas a finales del siglo XIX, cuando predijo la existencia de ondas electromagnéticas e incluyó la luz entre ellas. Los trabajos experimentales de Heinrich Rudolf Hertz lo corroboraron posteriormente. ¿Qué se quiere decir con que la luz es una onda electromagnética? Significa que lo que se propaga es un campo eléctrico y otro magnético, simultáneos y perpendiculares entre sí, y, a su vez, perpendiculares a la dirección de propagación de la luz. Este concepto es, sin duda, un poco abstracto, y más si tenemos en cuenta que estas ondas se propagan también en el vacío, sin necesidad de un soporte material.

La mayor parte de las radiaciones que nos rodean y utilizamos son ondas electromagnéticas: la luz, los rayos X, las radiaciones infrarroja y ultravioleta, las ondas de radio o de televisión y las microondas. ¿Cuál es la diferencia fundamental entre unas y otras? Sus frecuencias o longitudes de onda.

La luz se puede considerar como una onda electromagnética con una longitud de onda, cuando se propaga en el aire, de entre 380 y 760 nm (nm es el símbolo de «nanómetro», que equivale a 10^{-9} m, es decir, a una milmillonésima parte de un metro). Como vemos, las longitudes de onda son muy pequeñas. Considerando que la velocidad de la luz en el aire es de 300 000 km/s, al aplicar la fórmula anterior nos saldrán frecuencias muy altas, del orden de 10^{14} ciclos/s (hercios). Algunas radiaciones electromagnéticas tienen frecuencias todavía más altas, como es el caso de la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma, y otras son de frecuencia menor, como los rayos infrarrojos, las microondas y las ondas de radio, en las que se alcanzan longitudes de onda de varios kilómetros.

Para fijar el concepto de luz en el contexto de las ondas electromagnéticas, debemos hablar también de la **sensibilidad espectral** de los detectores de radiación. Como veremos en el capítulo siguiente, existen muchos materiales que son sensibles a la radiación, es decir, que producen una respuesta cuando son alcanzados por la misma. Así, un mando a distancia emite radiación infrarroja que, cuando llega al detector que está en la televisión, hace que este tenga una respuesta eléctrica que se convierte en una orden para cambiar el canal, por ejemplo. El detector es sensible al rayo infrarrojo y produce una respuesta de tipo eléctrico. Si a nuestra piel llega radiación ultravioleta, las moléculas pueden sufrir cambios que causen un cambio en la pigmentación o, incluso, una quemadura. En este ejemplo, la respuesta es químico-molecular.

En el caso de la luz que llega a nuestro ojo, las células fotosensibles de nuestra retina, llamadas conos y bastones, solo son sensibles a las radiaciones electromagnéticas con longitudes de onda entre 380 y 760 nm. Gracias a esto puede tener lugar el proceso de la visión. Como veremos en un próximo capítulo, el ojo humano forma imágenes del mundo exterior mediante la luz que capta nuestra retina, y esta imagen se convierte en impulsos nerviosos que van al cerebro gracias a que los conos y bastones de la retina son sensibles a la luz y producen una respuesta.

Al resto de las radiaciones electromagnéticas no se las llama luz, porque no sirven para ver. A veces se utilizan los términos «luz ultravioleta» o «luz infrarroja», queriendo poner de manifiesto que sus longitudes de onda son próximas a las de la luz y su tratamiento experimental y teórico, similar a la de esta.

Los conceptos de «longitud de onda» y de «sensibilidad a la radiación» nos conducen al de «sensibilidad espectral». Los detectores de radiación no suelen ser igual de sensibles a todas las longitudes de onda. Así, en el caso del sistema visual humano, existe una mayor sensibilidad, como veremos, hacia las longitudes de onda de la mitad del espectro visible —es decir, alrededor de 555 nm—, disminuyendo su sensibilidad a medida que nos acercamos a los extremos de longitud de onda.

Una vez que hemos establecido el concepto de luz a partir del de sensibilidad espectral del sistema visual humano, debemos volver a las fuentes de luz y caracterizarlas por su espectro; es decir, cada fuente de luz emitirá radiación con longitudes de onda de entre 380 y 760 nm, pero puede que no la misma cantidad (energía) en cada longitud de onda, e, incluso, puede que haya longitudes de onda del espectro visible a las que no emita. Se habla entonces de «curva de emisión espectral» de una fuente de luz o de «distribución espectral de potencia» de la misma. Pongamos tres ejemplos de ello. En la Figura 10 observamos un ejemplo de la distribución espectral de la luz del Sol que nos llega a la superficie terrestre. Como vemos, es

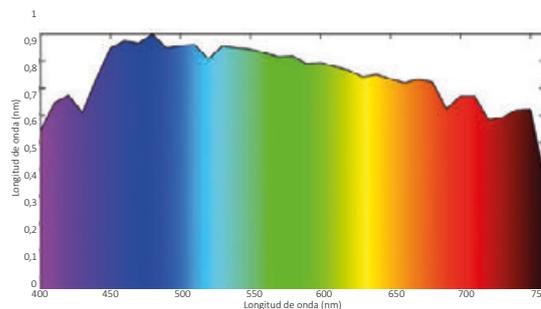


Figura 10
Distribución espectral de potencia de la luz solar en la superficie terrestre.
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

continua, es decir, que nos llega en todas las longitudes de onda del espectro visible, pero en distinta proporción, alcanzando su máximo alrededor de los 500 nm. Del Sol también nos llega bastante infrarrojo (longitudes de onda superiores a 760 nm) y algo de ultravioleta (longitudes de onda menores de 380 nm).

Si consideramos la luz del Sol en su conjunto, es decir, según nos llega, observamos que es de color blanco o ligeramente amarillento. Sin embargo, si la descomponemos en su espectro mediante algún elemento óptico, como un prisma (Figura 11A) o una red de difracción (Figura 11B), veremos que cada longitud de onda se corresponde con una luz de distinto color, desde el violeta al rojo. Por lo tanto, decimos que la luz es la suma de luces de distintos colores en la proporción adecuada.



Figura 11A

Dispersión espectral de luz blanca en un prisma.

Fuente: Luis Gómez Robledo y José Antonio García García.

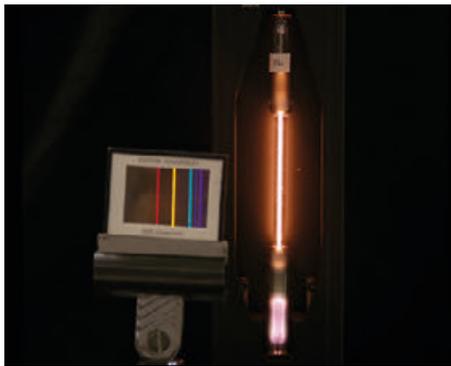


Figura 11B

Espectro con una red de difracción.

Fuente: Luis Gómez Robledo y José Antonio García García.

En un segundo ejemplo, vemos ahora el espectro de una lámpara de sodio (Figura 12A) y de una de mercurio (Figura 12B). Como podemos comprobar, la emisión no es ahora continua, sino discreta; es decir, solo se produce en determinadas longitudes de onda del espectro. Por último, si observamos la distribución espectral de potencia de un láser verde (Figura 12C), veremos que se produce

alrededor de una sola longitud de onda, por lo que se dice que el láser emite de forma monocromática o casi monocromática.

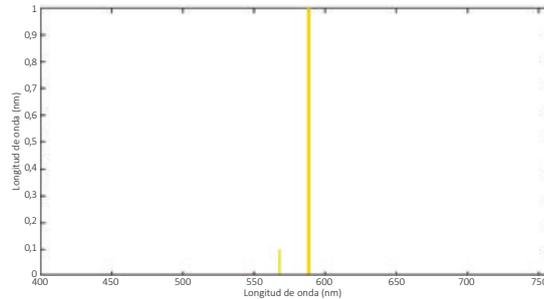


Figura 12A

Espectro de luz emitido por una lámpara de sodio.
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

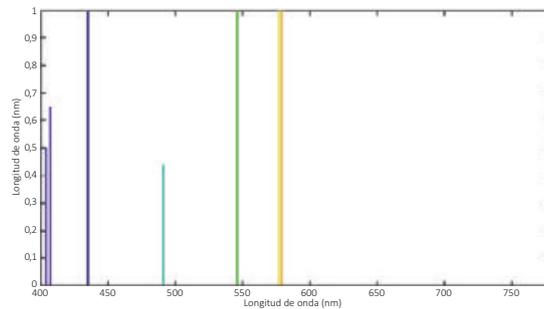


Figura 12B

Espectro de luz emitido por una lámpara de mercurio.
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

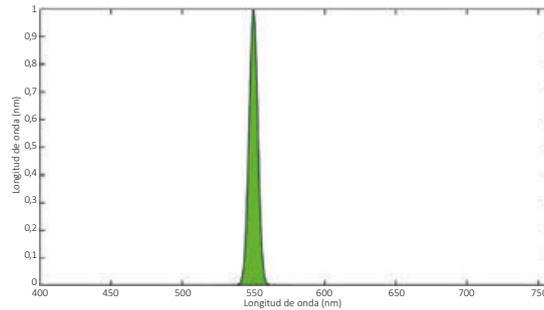


Figura 12C

Espectro de luz emitido por un láser verde.
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

Como podemos deducir de lo expuesto hasta ahora, considerar la luz como ondas electromagnéticas de distintas longitudes de onda dentro de un rango espectral nos abre un gran abanico de posibilidades para explicar fenómenos luminosos y aplicaciones tecnológicas. Por ejemplo, si volvemos a plantear el tema de la absorción de la luz por materiales que veíamos en el apartado anterior, ahora podemos explicar por qué un objeto iluminado con luz blanca puede verse rojo o verde, dependiendo de cómo absorba las distintas longitudes

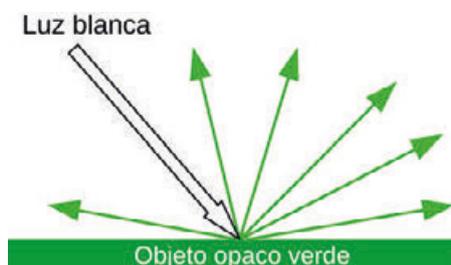


Figura 13
Reflexión difusa de luz en
un objeto opaco verde.
Fuente: Javier Romero.

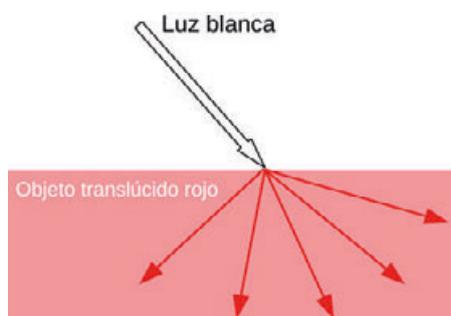


Figura 14
Transmisión de luz en un
objeto translúcido rojo.
Fuente: Javier Romero.

de onda. Por ejemplo, si es opaco y verde, es porque refleja principalmente las longitudes de onda verdes del espectro y absorbe el resto (Figura 13) y tiene, por tanto, una absorción espectral selectiva. Si se trata de un vidrio rojo (Figura 14), es que transmite la luz roja y absorbe el resto.

Las aplicaciones del modelo ondulatorio-electromagnético a la tecnología son amplísimas, desde

el tratamiento de imágenes a la metrología, en cualquier campo de las ciencias. A menudo, los métodos de análisis químico se basan en propiedades ondulatorias de la luz, como la difracción o la polarización, y, por ejemplo, la definición actual del metro patrón se basa en métodos interferométricos. Estos son solo algunos ejemplos de los muchos que pueden plantearse.

Algo de historia

Se considera al científico holandés Christiaan Huygens (1629-1695) el primero en elaborar un modelo ondulatorio de la luz con el enunciado de su famoso principio. Sin embargo, Isaac Newton (1642-1727) había elaborado un modelo corpuscular de la luz en el que se consideraba que esta era una corriente de partículas con masa, distinta según su color. A pesar de las cada vez mayores evidencias a favor de la teoría ondulatoria y en contra de la teoría de Newton, el peso de este en la ciencia era tal que no fue hasta que Thomas Young (1773-1812) explicó satisfactoriamente los fenómenos de interferencias de luz a través del modelo ondulatorio y Augustin Fresnel (1788-1827), los de difracción, cuando se aceptó definitivamente el modelo de Huygens.

El modelo cuántico

La luz es una corriente de fotones. Y... ¿qué es un fotón? Se trata de un concepto introducido a principios del siglo XX por Max Planck y Albert Einstein debido a la necesidad de «cuantizar la radiación» para explicar algunos fenómenos, como la emisión del cuerpo negro o el efecto fotoeléctrico.

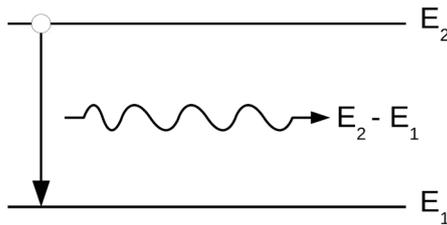
La base fundamental de la teoría de estos científicos fue suponer que la energía en forma de radiación se intercambia, es decir, se absorbe o se emite, en un número entero de una unidad a la que llamamos «cuanto» o, en el caso de la luz, «fotón». Podríamos decir que una fuente de luz emite un

número entero de fotones; puede que sea tan grande como trillones, pero entero. De igual forma, cuando un medio material absorbe radiación, lo hace en un número entero de estos cuantos de radiación. Aunque el concepto de fotón tiene, por tanto, un significado en el contexto de la explicación microscópica de fenómenos de interacción de la luz con la materia, podríamos aventurarnos a decir que la luz se podría considerar como una corriente de fotones.

Unido a los conceptos de fotón y cuantificación de la radiación apareció el de cuantificación de la

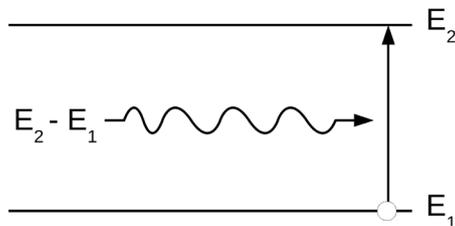
materia. Erwin Schrödinger y otros científicos concibieron la materia, en su estructura más íntima, como una formación de partículas (moléculas, átomos, núcleos, etcétera) que ocupan distintos niveles de energía, y dichos niveles de energía son diferentes en cada material, es decir, están «cuantizados». De esta forma, podría establecerse un nexo entre la cuantización de la materia y la radiación a través de la explicación de los fenómenos de absorción y de emisión. Así, si un átomo de un material tiene una energía determinada y la pierde para adquirir la energía de otro de los estados posibles, emitirá un fotón cuyo valor es la diferencia entre la energía de los dos estados, el inicial y el final, y se producirá el fenómeno de emisión de radiación (Figura 15).

Figura 15
Salto cuántico y
emisión de luz.
Fuente: Miguel Ángel
Martínez Domingo.



De forma inversa, si se hace incidir en el material un fotón de una determinada energía, siendo esta la diferencia entre dos estados de energía, un átomo en el estado de energía más baja podrá absorber dicho fotón y ocupar un lugar en el estado de energía más alta (Figura 16).

Figura 16
Salto cuántico y
absorción de luz.
Fuente: Miguel Ángel
Martínez Domingo.



Planck estableció, además, la relación inmediata entre el modelo cuántico y el ondulatorio de la radiación mediante su famosa fórmula para la energía del fotón:

$$E = hf$$

E es la energía del fotón, h es la constante de Planck y f es la frecuencia de la radiación entendida como onda electromagnética.

De esta sencilla forma, podemos empezar a comprender los procesos de emisión y absorción a nivel microscópico. Como podemos deducir, no todas las longitudes de onda o frecuencias son emisiones o absorciones posibles; solo son válidas aquellas que permiten las diferencias de energía entre estados en un material.

Existen multitud de fenómenos de emisión de luz que pueden ser explicados según este modelo cuántico, a los cuales podemos englobar bajo el término general de «luminiscencias», a las que pertenecen desde la «quimioluminiscencia», en la que se obtiene luz a partir de una reacción química entre compuestos, hasta la «bioluminiscencia», en la que algunos organismos (bacterias) emiten luz al realizar determinadas funciones, como degradar un contaminante. Entre ellos, nos gustaría citar también las «fluorescencias», que se presentan en algunos materiales que absorben radiación de una determinada longitud de onda (por ejemplo, la ultravioleta), saltan sus átomos a estados de mayor energía y luego los emiten, pero pasándolos a estados de energía intermedia; por lo tanto, emiten un fotón de menor energía y frecuencia que el absorbido, pero con una mayor longitud de onda, por ejemplo, en el azul del espectro visible. Los materiales fluorescentes son muy frecuentes en nuestra vida ordinaria y merecen esta anotación.

A la vista de lo expuesto, los fotones de la luz serán más energéticos que los del infrarrojo, pero de menor energía que los del ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. De hecho, a estas radiaciones se las llama «radiaciones ionizantes», ya que sus fotones son lo suficientemente energéticos como para producir cambios estructurales en la materia cuando son absorbidos por ella, en especial, en los tejidos vivos. De ahí la precaución que se ha de tener con estas radiaciones para no recibir dosis altas y ni siquiera bajas.

Por el contrario, apenas se habla de fotones infrarrojos, y mucho menos de cuantos de microondas u ondas de radio. De hecho, para la explicación de los fenómenos asociados a estas radiaciones se

suele necesitar más el modelo ondulatorio que el cuántico, mientras que para las radiaciones ionizantes se debe usar a menudo el modelo cuántico. Se puede decir que la luz se sitúa en un término medio en el que los modelos conviven y comparten las explicaciones de los fenómenos luminosos.

La aplicación tecnológica más llamativa del modelo cuántico ha sido el desarrollo de los láseres. Es obvio indicar el gran aporte de esta fuente

de luz en nuestras vidas, ya que incluso sus aplicaciones en nuestra vida cotidiana son evidentes: comunicaciones ópticas, sistemas de lectura de información (códigos de barras, lectores de CD/DVD...), avances médicos (en cirugía, tratamientos faciales...), etcétera. Sin embargo, también está relacionado con muchas otras aplicaciones, en especial, las relativas al desarrollo de detectores, emisores led o **sistemas de computación cuántica**.

Comunicarse con luz

Vemos, gracias a la luz, que existe esta radiación que es emitida por unos cuerpos y reflejada, transmitida, absorbida o difundida por otros, y que nuestro sistema visual es sensible a dicha radiación. La luz es el vehículo principal del que disponemos para comunicarnos con el mundo que nos rodea, y todo ello gracias a las imágenes que el ojo forma en la retina.

En el capítulo 7 de esta obra se describirá el ojo humano como un sistema de lentes capaz de formar imágenes de lo que observamos en una pantalla a la que llamamos retina, de igual forma que el objetivo de una cámara fotográfica forma imágenes en una película o en un sensor electrónico. La diferencia fundamental radica en que, mientras que con una cámara fotográfica podemos hacer un registro permanente de una escena al captar una imagen, con el ojo captamos continuamente imágenes que se almacenan en el cerebro de forma selectiva. Gracias a la luz, formamos estas imágenes del mundo que nos rodea y tenemos conocimiento del mismo. La cantidad de información obtenida es extraordinaria y se procesa en el cerebro para poder distinguir formas, texturas, colores, movimientos, etcétera, y así identificar objetos.

Cuando las imágenes que forma el ojo humano no han sido suficientes para conocer la naturaleza, el ser humano ha diseñado y construido instrumentos que ayudan al ojo a ver. Por ejemplo, ya que nuestra capacidad para ver detalles es limitada por mucho que nos acerquemos a un objeto,

el ser humano inventó los microscopios para observar así las cosas que son demasiado pequeñas para que el ojo humano pueda distinguirlos. Desde hace más de 300 años, disponemos de estos equipos que nos permiten adentrarnos en la estructura de los seres vivos o los materiales.

En sentido contrario, también se han construido telescopios con lentes y espejos que permiten observar en detalle los cuerpos muy lejanos. Los telescopios –en cualquiera de sus tipos: astronómicos, terrestres, prismáticos, anteojos, etcétera– permiten ver aumentados los cuerpos distantes que, aunque sean de gran tamaño, para nosotros son casi invisibles, como las estrellas y los planetas.

Además, con las cámaras fotográficas y de vídeo conseguimos, como ya hemos dicho, hacer registros permanentes de imágenes. Y, gracias a los ordenadores, podemos tratar dichas imágenes para mejorarlas o para encontrar en ellas información más detallada oculta a simple vista.

En la actualidad hay otros muchos dispositivos basados en la combinación de óptica y electrónica que ayudan al ojo a ver o a registrar imágenes, como los escáneres, las impresoras, las fotocopiadoras, los monitores o los intensificadores de imágenes para visión nocturna. Otras veces se utilizan otras radiaciones para ver, como con las cámaras térmicas, que tienen visión en el espectro infrarrojo.

Está claro que la luz nos sirve para conocer el mundo que nos rodea y comunicarnos con imágenes,

pero no solo a través de ellas. Las comunicaciones telefónicas por cable, ya sean de conversaciones o de datos, se hacen en la actualidad introduciendo luz en fibras ópticas y transmitiendo esa luz a cualquier distancia. De esta forma, se ha conseguido aumentar extraordinariamente la capacidad para enviar simultáneamente conversaciones y datos con menos pérdidas y mayor fiabilidad. Todo ello gracias no solo al desarrollo de las fibras ópticas (medios transparentes a la luz en la que esta viaja confinada), sino también al desarrollo

de los láseres para las comunicaciones y a los dispositivos optoelectrónicos para la comunicación: intensificadores, moduladores, conmutadores, etcétera.

En resumen, la luz es el medio fundamental para la comunicación de los seres humanos y el vehículo que mayor información aporta a nuestro cuerpo para el conocimiento del mundo exterior. En esta obra pretendemos ampliar estas ideas a través de la descripción de muchos de los aspectos esbozados en este capítulo introductorio.

ENLACES WEB

10 experimentos caseros de óptica para educación primaria:

► <https://goo.gl/BVES8S>



Historia de las ecuaciones de Maxwell (en formato HTML):

► <http://goo.gl/mJ0xW>



Texto sobre las ecuaciones de Maxwell (en formato PDF):

► <http://goo.gl/TPhtkk>



Original para descarga gratuita de *First Book of Opticks*, de Newton (en inglés):

► <https://goo.gl/64HYql>



Programa para dibujar marchas de rayos (en francés):

► <http://goo.gl/1rn82l>



Experiencias con dos polarizadores lineales:

► <https://goo.gl/xDtuwk>



Principio de Huygens explicado en seis minutos (en inglés):

► <https://goo.gl/Lo0UOv>



Manuscritos originales de Thomas Young (en inglés):

► <https://goo.gl/2T9YuF>



Efecto fotoeléctrico (simulador):

► <http://goo.gl/ZkRH64>



Manuscrito original de *La Luz de los ojos y el paisaje iluminado de la visión*, de Alhacén (en árabe):

► <http://goo.gl/wH5JQC>



BIBLIOGRAFÍA

- Hecht, E. (2000): *Óptica*. Addison-Wesley.
- Klein, M. V. y Furtak, T. E. (1986): *Optics*. Wiley.
- Malacara, D. (2006): *Óptica básica*. Fondo de Cultura Económica de España.
- Ronchi, V. (1991): *Optics: The Science of Vision*. Dover Publications.



Capítulo 2

Fuentes y detectores de luz

Joaquín Campos Acosta

Introducción

El Sol ilumina la Tierra desde su origen. Ha contribuido a la generación de vida en ella y a establecer sus ritmos con periodos de luz y oscuridad. La luz es imprescindible para la vida y también para la actividad humana; por ello, desde sus orígenes, el ser humano intentó disponer de fuentes de luz artificiales que le permitieran desarrollar su vida con independencia del Sol.

¿Cómo serían nuestras vidas sin las fuentes de luz ni los detectores inventados por el ser humano? ¿Cómo desarrollaríamos multitud de actividades en el interior de edificios u otros espacios cerrados? ¿Cómo nos comunicaríamos sin la transmisión de información por fibra óptica, que implica generar señales y recibirlas con fuentes y detectores de luz? ¿Cómo recibiríamos información sin pantallas?

¿Cómo se diagnosticarían enfermedades sin fuentes ni detectores de luz? ¿Cómo se controlarían los procesos de fabricación? ¿Cómo accederíamos a los sótanos y garajes de nuestras casas?...

La utilización de la luz, su control y el desarrollo de nuevas fuentes y detectores han ayudado a mejorar las condiciones de vida del ser humano en la Tierra y a resolver problemas acuciantes en distintos momentos de la historia, como ocurre actualmente con el objetivo global de ahorro energético y de disminución de residuos perjudiciales para el medioambiente.

Por tanto, dada su importancia histórica y actual, en este capítulo nos centraremos en las fuentes y detectores de luz, su funcionamiento, sus tipos y sus características generales.

Fuentes de luz

A través de la observación de la naturaleza, se puede comprobar que la luz se produce en objetos que están muy calientes, en ciertas reacciones químicas como la combustión o en descargas eléctricas como los relámpagos de las tormentas.

Cada una de estas circunstancias responde a un fenómeno físico diferente, y cada uno de ellos se puede utilizar de forma artificial para producir luz. El fuego, además de proporcionar calor, fue la primera fuente artificial de luz y la única utilizada a lo largo de muchos siglos de historia (Figura 1). La combustión de un gas o un líquido de forma controlada fue la primera fuente de luz que aprendió a crear y manejar el ser humano. Este tipo de fuente se podía controlar a voluntad con cierta facilidad, se podía regular la cantidad de luz y se podía transportar si era necesario. No obstante, la cantidad de luz producida era pequeña solo permitía realizar tareas visuales en las proximidades de esa fuente de luz.



Figura 1
El fuego: primera fuente de luz artificial.
Fuente: Galería bolas de fuego, Nejapa 2013, Elmer Guevara, Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0 (<http://goo.gl/a5XXp>).

1 ¿Qué fuentes de luz basadas en la combustión conoces? ¿Qué elementos tiene una antorcha y qué papel desempeñan?

Lámparas de incandescencia

El desarrollo de nuevos materiales y el descubrimiento de la corriente eléctrica permitieron la invención de las lámparas de incandescencia. Un metal (el wolframio) se calienta al pasar la corriente eléctrica por él (efecto conocido en física como «efecto Joule»), elevando su temperatura hasta el extremo de aparecer luminoso, muy luminoso en algunos casos, y radiar luz (Figura 2). Este tipo de fuente de luz ha sido la más utilizada hasta muy recientemente y ha estado presente en todo tipo de ambientes, instrumentos y sistemas. Es una fuente que emite en todo el espectro visible, por lo que es útil para percibir toda la gama cromática, como ocurre con la luz solar. Tanto es así que ha sido considerada hasta la fecha como uno de los **iluminantes patrones** de la **Comisión Internacional de Iluminación (CIE)**.

No obstante, el proceso de generación de luz en estas lámparas es poco eficiente desde el punto de vista energético, ya que la cantidad de luz que proporcionan es pequeña en comparación con la potencia radiante total que generan (radiación visible, infrarroja y algo de ultravioleta), como se puede observar en la Figura 3, donde se muestra un espectro de emisión típico de una lámpara de incandescencia.



Figura 2
Lámpara de incandescencia clásica.
Fuente: Gluehlampe 1, KMJ, Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0 (<http://goo.gl/a5XXp>) y GFDL (<http://goo.gl/WnaU>).

La potencia radiada en el espectro ultravioleta es del 1% de la total (color azul en la Figura 3), la radiada en el espectro visible es del 15% de la total (color verde en la Figura 3) y el resto se radia en el espectro infrarrojo (color marrón en la Figura 3). Las lámparas de incandescencia han llegado a ser muy fiables y su fabricación, muy asequible. Su vida útil es del orden de miles de horas y estuvieron presentes en nuestras vidas por doquier. Pero, dada su baja eficacia luminosa, actualmente la Unión Europea ha prohibido su producción y distribución. Solo se permite su fabricación para aplicaciones especiales en que no puedan ser sustituidas todavía por otras fuentes de luz de mayor rendimiento energético.

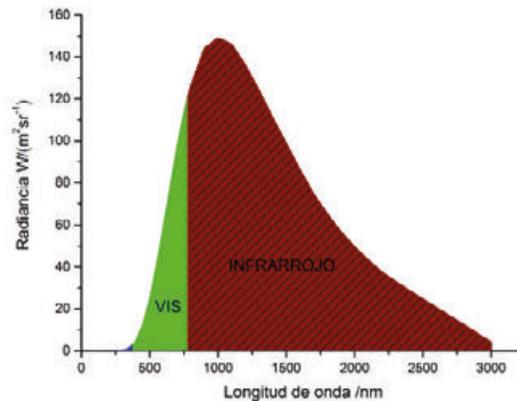


Figura 3
Distribución espectral de la emisión de radiación de una lámpara de incandescencia.
Fuente: Joaquín Campos Acosta.

Lámparas de descarga

Quien ha tenido la oportunidad de observar una tormenta en el campo, a buen recaudo de los rayos, habrá observado cómo se ilumina el cielo. Tras aprender a controlar las descargas eléctricas y a restringirlas a un entorno pequeño, el ser humano fue capaz de crear una nueva fuente de luz conocida como «lámpara de descarga en gases».

La descarga eléctrica excita los electrones, que emiten luz al desexcitarse. Este tipo de lámpara es la más eficiente en generación de luz de alta potencia y, por ello, se usa en la iluminación de exteriores como las carreteras, los polideportivos, etcétera. El aspecto, o color de la luz producida por estas fuentes depende del



Figura 4
Lámparas de bajo consumo.
Fuente: Joaquín Campos Acosta.

medio (gas) en el que se produzca la descarga eléctrica. Generalmente no se genera luz de todos los colores en estos medios, por lo que su uso directo tiene un rendimiento cromático pobre, es decir, no reproducen bien toda la gama de colores de los objetos. Para mejorar este aspecto, se utilizan materiales fluorescentes adheridos a la pared de la cavidad en la que se produce la descarga, de manera que la radiación de fluorescencia se añade a la de la descarga eléctrica en el gas, produciendo así luz en un intervalo espectral más amplio y mejorando el rendimiento cromático de estas fuentes de luz, aunque no llega a tener, en este sentido, la calidad de las lámparas de incandescencia.

Las lámparas de descarga con material fluorescente en el bulbo son muy habituales en ambientes interiores. Las más antiguas se conocen como «tubos fluorescentes», o como «fluorescentes»

simplemente, debido a la forma cilíndrica de la cavidad que contiene el gas (mercurio), que es también la superficie emisora. Posteriormente, se fabricaron de tamaños y formas muy diferentes (Figura 4), y se conocen como «lámparas de bajo consumo», haciendo referencia al menor consumo de electricidad necesario para producir luz con estas lámparas en comparación con las de incandescencia. La eficacia luminosa de estas fuentes es, por tanto, mayor que la de las lámparas de incandescencia, ya que, con un consumo eléctrico del orden del 20% del de las lámparas de incandescencia, producen una cantidad de luz similar. Sin embargo, se prevé que dejen de utilizarse cuando puedan ser reemplazadas de forma fiable por otras fuentes de luz, debido a que el mercurio, el gas de excitación empleado, es una sustancia tóxica.

Diodos emisores de luz (ledes)

Un diodo emisor de luz (led) es un dispositivo microelectrónico en el que se produce una excitación de electrones al hacer pasar una corriente eléctrica. Los electrones no pueden permanecer excitados permanentemente y, al volver a su estado normal, generan luz. Este fenómeno físico se conoce como «electroluminiscencia». Por tratarse de una emisión por desexcitación de electrones, el espectro de emisión no ocupa todo el intervalo visible, sino solo una banda relativamente estrecha. Esto, unido al menor consumo eléctrico, hace que los ledes sean más eficaces en la producción de luz que las lámparas de incandescencia y las de bajo consumo, motivo por el cual están sustituyendo a ambas en los sistemas de iluminación.

Si se tiene en cuenta que aproximadamente el 19% de la electricidad producida a nivel mundial

se emplea en iluminación, se entiende que la Unión Europea haya puesto un gran interés en mejorar la eficacia de las fuentes de luz que se utilizan para alumbrar su territorio. La Agencia Danesa de la Energía ha publicado un informe donde se expone que si la prohibición de vender bombillas poco eficientes (todas excepto los ledes) comenzara en el 2016, el ahorro de consumo eléctrico sería de 79 teravatios-hora (TWh) y supondría un ahorro de 15,8 billones de euros para el conjunto de la Unión Europea en los próximos diez años.

Los primeros ledes se empezaron a usar en los años 60 del siglo xx. Emitían en la zona roja del espectro visible y se usaron fundamentalmente como indicadores («encendido/apagado»), controles remotos o en señales de tráfico, ya que no emitían suficiente cantidad de luz para otros usos.

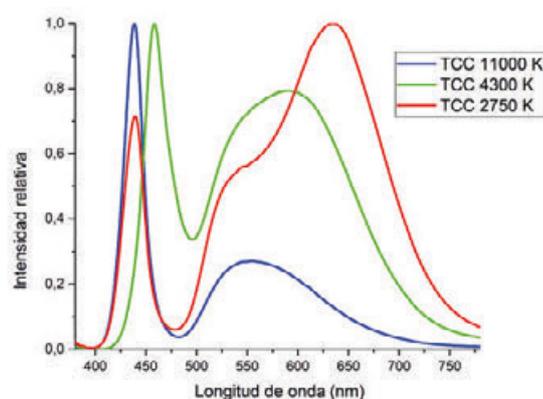
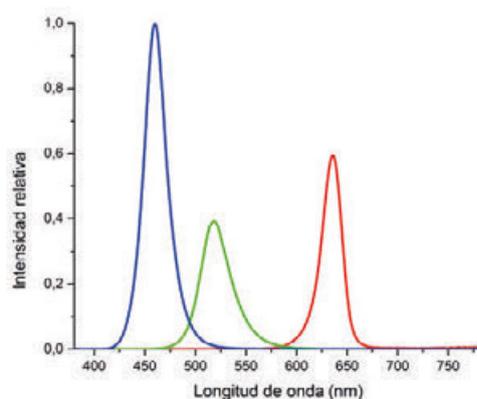


Figura 5
Espectros de emisión de un led tricromático (izquierda) y de un led blanco (derecha).

Fuente: Joaquín Campos Acosta.

Posteriormente, se fueron desarrollando en el espectro infrarrojo y en longitudes de onda más cortas (amarillos y verdes), por lo que crecieron sus posibilidades de utilización.

Para que una fuente de luz sea interesante en el campo de la iluminación, debe ser capaz de reproducir la gama cromática de la forma más amplia posible, por lo que se necesita luz, por lo menos, en las regiones roja, verde y azul. Por ello, la aparición de ledes que emiten en la región azul del espectro y con una potencia mayor ha permitido su utilización en el campo de la iluminación. La importancia de este descubrimiento queda avalada por la concesión del Premio Nobel de Física en el año 2014 a sus descubridores, Isamu Akasaki e Hiroshi Amano, de la Universidad de Nagoya (Japón), y Shuji Nakamura, de la Universidad de California en Santa Bárbara (Estados Unidos).

Los dispositivos ledes que se utilizan en el campo de la iluminación, como los que se tienen habitualmente en casa, son algo más que un simple chip led. Los hay esencialmente de dos tipos: los tricromáticos, que combinan un led rojo, otro verde y otro azul, generando así luz policromática; y los ledes blancos, que tienen un chip azul y un recubrimiento fluorescente, parecido al de los tubos fluorescentes o lámparas de bajo consumo, para generar luz policromática. Las distribuciones espectrales características de unos y otros se muestran en la Figura 5. En el caso de los ledes blancos, se puede variar el aspecto cromático variando la relación entre la potencia emitida en la zona azul y la emitida en la zona

de la banda de fluorescencia. A la vista de esta Figura 5, y en comparación con la Figura 3, se entiende que la eficacia luminosa de los ledes es mucho mayor que la de las lámparas de incandescencia, pues toda la emisión de aquellos se produce en el intervalo visible (380-760 nm), mientras que en las lámparas de incandescencia era de solo un 15%.

La emisión de los ledes no se produce por igual en todas las direcciones, sino que hay un rango de direcciones privilegiadas, que es menor que el de las lámparas de bajo consumo.

Además del chip led y del recubrimiento en el que se deposita el material fluorescente, estas fuentes de luz tienen un sistema de transformación de la corriente y otro de disipación de calor. Por tanto, es más correcto llamar a estos dispositivos «lámparas led».

Los tipos de fuentes que se usan en cada caso dependerán del objetivo que se pretenda alcanzar. Con solo mirar a nuestro alrededor podemos descubrir que el número de elementos disponible es bastante elevado.

2 ¿Cuántas bombillas hay en tu casa? ¿De qué tipo son? ¿Se podría disminuir el consumo de electricidad manteniendo el mismo número de lámparas? ¿Cuánto se ahorraría en consumo eléctrico?

Láseres

Las fuentes de luz comentadas anteriormente emiten en una gama más o menos amplia de direcciones del espacio y, aproximadamente, con la misma intensidad luminosa. Sin embargo, una fuente láser se caracteriza por tener una dirección de emisión privilegiada. La emisión de la luz se produce por amplificación de la misma en un medio. Por tanto, se necesita generar una cantidad de luz inicial que luego se amplifica, alcanzándose una potencia de emisión muy elevada, lo cual tiene una gran aplicación tecnológica para cambiar las propiedades y la forma de los materiales. El término «láser» proviene del acrónimo formado por las palabras en inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*.

El espectro de emisión de un láser depende del medio en el que se produce la amplificación de la luz y de la cavidad óptica en la que se encuentra el medio. En general, es un espectro discreto o de bandas estrechas, lo que hace que los láseres sean fuentes de luz de un solo color habitualmente, si se separa la emisión de esas líneas. Existen láseres de banda espectral más ancha que se usan en aplicaciones científicas y tecnológicas.

El tipo de luz que emiten los láseres se conoce como «coherente», es decir, que se emite siempre el mismo tipo de onda, lo que hace posible que, al interactuar entre ellas, produzcan con

facilidad los fenómenos propios de interacción de ondas: difracción e interferencia.

Los láseres se inventaron en la década de los años 60 del siglo XX, tras haber podido desarrollar un medio, un material, capaz de soportar la generación de luz amplificada en su seno. El primer láser se consiguió en una barra de rubí. Desde entonces hasta ahora han proliferado también en otros medios.

Por las características de su emisión, los láseres son fuentes imprescindibles en muchas aplicaciones tecnológicas: lectores y grabadores de CD/DVD; sistemas de transmisión de información; dispositivos de diagnóstico médico y de uso terapéutico y quirúrgico; sistemas de alineamiento, como el paralelo de las ruedas de los coches; dispositivos de medida para grandes distancias; soldadura de metales, o el común puntero láser. Además de las mencionadas, las aplicaciones científicas son también muchas e importantes.

Los láseres son realmente muy útiles en muy diversos ámbitos, pero ha de tenerse presente que deben ser usados con propiedad y mucho cuidado, sobre todo en sus aplicaciones en seres humanos, ya que un uso incorrecto puede producir daños en los ojos y quemaduras en la piel.

3 ¿Hay láseres en tu casa? ¿Y en tu clase? En caso afirmativo, ¿para qué se usan? ¿Por qué?

Características de una fuente de luz

Al hablar de los anteriores tipos de fuentes de luz, se han ido mencionando aspectos de la emisión de luz que diferenciaban a unos y otros. Cabe preguntarse qué aspectos o parámetros caracterizan

la emisión de una fuente de luz de manera que, al identificarlos, se puede tener una descripción completa de la emisión.

Distribución espectral de la luz emitida

La distribución espectral indica la cantidad de luz de cada longitud de onda o color que emite la

fente. La forma de la distribución espectral está íntimamente ligada con el fenómeno físico en el

que se basa la emisión de luz, como se ha comentado anteriormente.

En las fuentes en que la emisión se produce en intervalos discretos, la emisión se caracteriza por la longitud de onda central de ese intervalo y la anchura del mismo (conocida como anchura de banda), si esta es significativa. Así, un láser de He-Ne se identifica por la longitud de onda de 632,8 nm y no se indica una anchura de banda, habitualmente; un led rojo, por ejemplo, se identifica por la longitud de onda de 640 nm y una anchura de banda de 20 nm.

Las fuentes que emiten en intervalos discretos y una banda de fluorescencia se identifican por el medio en el que se produce la emisión discreta (Hg, por ejemplo) y un código que caracteriza la banda de fluorescencia. Estos códigos han sido definidos por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE).

En las fuentes en que la emisión se produce de forma continua en todo el intervalo visible, la forma del espectro se identifica mediante el parámetro

temperatura de color correlacionada (TTC), que caracteriza el aspecto cromático de la fuente. Este parámetro es la temperatura absoluta que tendría el emisor térmico de luz de aspecto cromático más próximo a la fuente en cuestión. Las fuentes de luz más habituales tienen valores de temperatura de color correlacionada (TTC) en el rango que se indica en la siguiente tabla.

Tipo de lámpara	Temperatura de color correlacionada/K
Incandescencia	2 700 a 3 100
Bajo consumo	2 700 a 6 500
Ledes	3 000 a 6 700

Tabla 1
Valores típicos de la temperatura de color correlacionada de diversas fuentes de luz.

La distribución espectral de emisión de una fuente puede variar ligeramente con variables como la temperatura de funcionamiento (por ello, hay que tener cuidado al instalar lámparas en luminarias muy cerradas), la tensión de alimentación eléctrica y el tiempo de uso.

Distribución espacial de la radiación emitida

Hay fuentes de luz que emiten en todas las direcciones, como las que se usan en aplicaciones de iluminación, mientras que otras emiten de forma que hay una o más direcciones privilegiadas. Un ejemplo de estas últimas son los láseres, que

emiten en una dirección, y los ledes, que emiten en un ángulo sólido definido. Cabe destacar que los ledes pueden encontrarse integrados en lámparas que emiten en todas las direcciones, como es el caso de los ledes que se usan en iluminación.

Cantidad de luz

La cantidad de luz se define como la potencia radiada por una fuente ponderada espectralmente

con la curva de eficacia luminosa del ojo humano. Por tanto, la cantidad de luz emitida por una fuente

Magnitud	Significado	Unidad en el Sistema Internacional de Unidades
Flujo luminoso	Cantidad de luz total emitida por la fuente.	Lumen (lm)
Intensidad luminosa	Cantidad de luz emitida por la fuente por unidad de ángulo sólido en una dirección dada.	Candela (cd)
Luminancia	Cantidad de luz emitida por la fuente en una dirección dada por unidad de ángulo sólido y unidad de superficie de la misma proyectada sobre la dirección del ángulo sólido.	Candela por metro cuadrado (cd/m ²)

Tabla 2
Magnitudes que indican la cantidad de luz emitida por una fuente de luz.

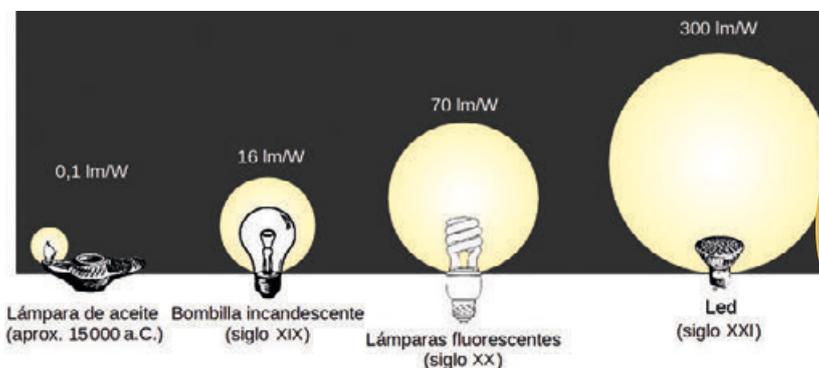
depende de su distribución espectral, pues la eficiencia de la radiación óptica sobre el ojo humano no es uniforme en todo el espectro visible, como se ha visto en el capítulo anterior.

La cantidad de luz que emite una fuente se puede especificar con varias magnitudes, como se indica en la Tabla 2. Estas magnitudes se conocen como «magnitudes fotométricas».

Cuando las fuentes emiten en intervalos discretos, (como los láseres o las lámparas de descarga de

gases) y no se usan en iluminación, se suele indicar la potencia de la radiación emitida en las longitudes de onda de interés en lugar de en las magnitudes anteriores. Las magnitudes que no ponderan la potencia óptica con la respuesta del ojo humano se denominan como las de la tabla anterior, pero cambiando el adjetivo «luminoso» por «radiante». Aunque por distinto motivo, para las fuentes que emiten fuera del intervalo visible tampoco se pueden dar estas magnitudes fotométricas.

Figura 6
Cantidad de luz emitida por fuentes artificiales de luz a lo largo de la historia.
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.



4 En la Figura 6 se muestra cómo ha evolucionado la eficacia luminosa de las fuentes de luz a lo largo de la historia. ¿Qué elementos han influido en esta mejora?

Tiempo de uso o vida útil

La vida útil es el tiempo promedio de funcionamiento de una fuente de luz. Su valor varía de unos tipos de fuente a otros y es importante tener en cuenta que el tiempo de vida se define en unas condiciones de uso determinadas y que, si se cambian esas condiciones, el tiempo de uso puede variar drásticamente. Por ejemplo, una lámpara de ledes puede tener una vida útil de miles de

horas funcionando a temperatura ambiente, pero, si esa lámpara se introduce en una luminaria que no elimina bien el calor generado, la vida útil se puede reducir incluso a la décima parte. Obsérvese que en muchas luminarias se establece una limitación sobre las lámparas que se pueden usar en la misma, generalmente establecida en términos de consumo eléctrico.

Otros parámetros o características

Hay otras características de las fuentes de luz que pueden ser más o menos relevantes según la aplicación en la que se usen. Entre ellas cabe destacar:

Capacidad de modulación

La capacidad de transmitir información está ligada a la capacidad de modular temporalmente la luz

emitida, de hacer variar en el tiempo la luz emitida o recibida. Por ello, esta propiedad es importante en todos los sistemas en que se usan fuentes para proporcionar información, como las pantallas, los sistemas de transmisión de datos o de comunicación en general. Los ledes y los láseres son las fuentes de luz en las que se puede variar la

emisión de forma más rápida y en la propia fuente, sin artefactos ajenos a ella, por lo que son las fuentes más usadas en dichos sistemas.

Coherencia

La coherencia de una fuente es una propiedad muy importante en aplicaciones científicas y tecnológicas. Se puede hablar de coherencia temporal y de coherencia espacial. La coherencia temporal hace referencia a la duración de la emisión dentro

de la cual se pueden producir fenómenos típicos de ondas, como las interferencias. Está muy ligada a la anchura de banda de la emisión. Los láseres tienen una coherencia temporal mayor que las demás fuentes de emisión.

La coherencia espacial hace referencia a la **congruencia de la luz** emitida desde distintos puntos de una fuente extensa.

5 ¿Qué tiempo de vida media y qué cantidad de luz son características de las fuentes de luz que hay en tu casa?

Detectores de luz

Un detector de luz es un dispositivo que produce una respuesta cuando la luz incide sobre él. La respuesta puede ser más o menos inmediata, más o menos intensa y de distinta índole. Por ejemplo, la piel enrojece cuando se expone a la radiación solar. Pero los detectores más interesantes y, por ello, más usados son los que producen una respuesta de tipo eléctrico, pues es la más fácil de analizar y utilizar posteriormente.

Al igual que distintas respuestas, hay distintos efectos físicos que la radiación puede producir

sobre los objetos, pero, desde el punto de vista de la detección de la radiación, los más útiles son el de calentamiento—y consiguiente aumento de temperatura: efecto térmico— y el de excitación electrónica—**efecto fotoeléctrico interno y externo**—.

Por tanto, el efecto que produce la luz sobre el detector da lugar a la clasificación de los detectores en detectores térmicos o de excitación electrónica.

6 ¿Qué otros dispositivos conoces que cambien cuando absorben la luz? ¿Serían útiles como detectores?

Fotodiodos

Un fotodiodo (Figura 7) es un dispositivo optoelectrónico que produce una corriente eléctrica cuando absorbe radiación de un cierto intervalo de longitud de onda. Para la radiación fuera de ese intervalo espectral no hay respuesta.

Los fotodiodos están contruidos con materiales semiconductores en los que se puede generar una unión «p-i-n» o «p-n», y se basan en el efecto fotoeléctrico interno en esos materiales. El límite superior de longitud de onda para el que es sensible el detector viene dado por la diferencia de energía entre la banda de valencia y la de conducción del material, puesto que se han de excitar electrones a la banda de conducción para producir la corriente. El límite inferior de longitud de onda

viene dado por el índice de refracción del material y la arquitectura o diseño del dispositivo. Los materiales usados con más frecuencia para construir fotodiodos y su intervalo espectral de uso se muestran en la Tabla 3.

Los fotodiodos son los detectores más frecuentes en los sistemas de detección: lectores de CD/DVD, sistemas de comunicación basados en fibra óptica, células de control de paso (garajes, ascensores, etcétera), medidores de luz, cámaras de fotos... En particular, los fotodiodos de silicio, por su polivalencia espectral, son los más usados.



Figura 7
Fotodiodo.
Fuente: Fototranzystor,
Paweł Wiesław Kaczorowski,
Wikimedia Commons, CC BY-SA
2.5 (<https://goo.gl/ok9hc>).

Tabla 3
Materiales semiconductores más frecuentes en fotodiodos.

Material	Intervalo espectral de respuesta/nm
Silicio	190 a 1 100 (ultravioleta, visible e infrarrojo)
Germanio	800 a 1 900 (infrarrojo)
Indio-galio-arsénico	800 a 2 600 (infrarrojo)

Detectores matriciales

Un detector matricial es un conjunto de detectores acoplados en un plano que son capaces de dar una respuesta independiente unos de los otros, como es el caso de los receptores de luz de la retina del ojo humano. Los hay de dos dimensiones y de una sola dimensión o lineales. Son los detectores que se usan en las cámaras optoelectrónicas, entre otros dispositivos. Estos detectores transforman una imagen óptica en un conjunto de señales electrónicas, correspondientes a cada zona de la imagen, que permite el tratamiento digital de la misma. Se conocen también por el término que los describe en inglés: *array*.

El elemento detector está incluido en un chip electrónico que contiene otros elementos de control y lectura de la respuesta. Tanto por su intervalo espectral de

respuesta como por la compatibilidad con los dispositivos electrónicos, la mayor parte de detectores matriciales están contruidos sobre silicio, aunque también se fabrican con otros materiales semiconductores. El aspecto del conjunto se muestra en la Figura 8. Existen dos arquitecturas para construir estos detectores matriciales que se conocen como «CCD» y «CMOS», respectivamente. Se diferencian en su estructura interna y en la forma en que se realiza la lectura de cada elemento de la matriz, cada píxel. La arquitectura CMOS permite tener acceso a los píxeles de forma individual y asociar su respuesta, si se desea, con mayor facilidad.

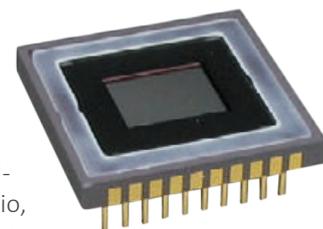


Figura 8
Detector matricial CCD.
Fuente: CCD Image sensor, Sphl, Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0 (<http://goo.gl/a5XXp>) y GFDL (<http://goo.gl/WnaU>).

7 ¿Sabrías averiguar qué tipo de detector matricial lleva tu teléfono móvil? ¿Y la webcam de una tableta digital o de un ordenador portátil?

Radiómetros

Un radiómetro es un instrumento diseñado para la medida de la radiación óptica. Consta de un detector y de los componentes electrónicos necesarios para indicar la cantidad de radiación medida. Algunos de ellos pueden llevar también otros elementos ópticos como atenuadores, para aumentar el rango dinámico de respuesta, o difusores. En algunas aplicaciones concretas reciben nombres específicos, como es el caso de los piranómetros, que son radiómetros para

la medida de la irradiación solar, como el que se muestra en la Figura 9.

Cuando los radiómetros están diseñados para medir potencias radiantes altas (por encima de 10 MW, aproximadamente), el detector es de tipo térmico y son radiómetros de respuesta espectral amplia. Estos instrumentos se usan para medir la potencia de los láseres, por ejemplo.



Figura 9
Piranómetro: radiómetro usado para la medida de la irradiación solar.
Fuente: Piranómetro, Hukseflux, Wikimedia Commons.

Fotómetros

Un fotómetro es un radiómetro que mide la cantidad de luz, es decir, la potencia radiante ponderada con la distribución de eficacia luminosa espectral del ojo humano. Al igual que los radiómetros, un fotómetro está integrado por un detector y los componentes electrónicos necesarios para indicar la cantidad de luz medida. Suele incluir, además, elementos ópticos, filtros –para llevar a cabo la ponderación espectral de la radiación– y difusores conocidos como correctores coseno –para ponderar la respuesta de la luz que incide en diferentes direcciones–. Los fotómetros están presentes en todos los dispositivos que adquieren imágenes (cámaras fotográficas, teléfonos móviles, etcétera) para regular el tiempo de exposición. En la Figura 10 se muestra un fotómetro de uso general.

La medida de la cantidad de luz es muy importante para establecer los ambientes luminosos adecuados para que la tarea visual se realice de forma cómoda. Esta cantidad depende de factores muy diversos, entre los que cabe destacar las dimensiones de los objetos a observar o manipular, el contraste, la dificultad de la tarea (duración, velocidad de respuesta...), etcétera.



Figura 10
Fotómetro manual en el que se puede ver la parte para la detección de luz y la parte electrónica de lectura.
Fuente: Lux meter for measuring illuminance, Hankwang, Wikimedia Commons.

Tabla 4

Niveles de iluminación recomendados según la tarea visual a realizar.

Ambiente	Nivel de iluminación
Quirófano hospitalario	
Biblioteca o habitación de estudio	
Clase	
Calle o vías de circulación	
Zonas de ocio	
Garajes	

8 Investiga qué niveles de iluminación se recomiendan en ambientes visuales como los que se indican en la Tabla 4.

9 ¿Se puede considerar que un panel de energía solar es un detector? ¿Qué tipo de elementos se usan en las centrales de energía solar? ¿Por qué?

Características de la luz

Las características a tener en cuenta en un detector de luz son las que definen la relación entre la luz que incide sobre él y su respuesta. Hay otras características, como su tamaño o su

compatibilidad con circuitos eléctricos, que son importantes para el diseñador de dispositivos, pero que no se tratarán aquí.

Intervalo espectral de respuesta

El intervalo espectral de respuesta es el intervalo de longitudes de onda en el que el detector es

sensible. Cualquier detector no responde a todas las longitudes de onda de la luz que incide sobre

él. Los hay que responden en un intervalo muy amplio (ultravioleta, visible e infrarrojo) y los hay que responden en un intervalo más corto. Esta característica está muy relacionada con el fenómeno físico que produce la luz en el detector. Aquellos detectores que se basan en el

efecto térmico tienen un intervalo espectral de respuesta más amplio; en cambio, los que se basan en el efecto fotoeléctrico tienen un intervalo de respuesta limitado a las longitudes de onda capaces de producir esa excitación, como se ha mencionado al hablar de los fotodiodos.

Responsividad

La responsividad se define como el cociente entre la respuesta del detector a la luz y la cantidad de luz que recibe. La responsividad será un número con sus unidades correspondientes si el detector responde por igual a todas las longitudes de onda dentro de su intervalo de respuesta, lo que ocurre en los detectores térmicos. Sin embargo, en los

detectores que se basan en el efecto fotoeléctrico, la respuesta depende de la longitud de onda de la luz incidente y, por lo tanto, la responsividad también. Por ello, para este tipo de detectores, se define la responsividad espectral como el cociente entre la respuesta y el flujo radiante incidente por unidad de intervalo espectral.

Ruido

El ruido es la oscilación de la respuesta de un detector en el tiempo aun cuando la luz que incide sobre él permanezca constante. En la Figura 11 se representa la respuesta de un hipotético detector a una cantidad de luz constante, pudiéndose observar esa oscilación. El ruido tiene varios orígenes, es inherente al proceso de detección y no se puede eliminar, pero sí minimizar. Una forma de reducir el ruido es enfriar el detector. En general, los detectores de tipo térmico son más ruidosos que los basados en el efecto fotoeléctrico.

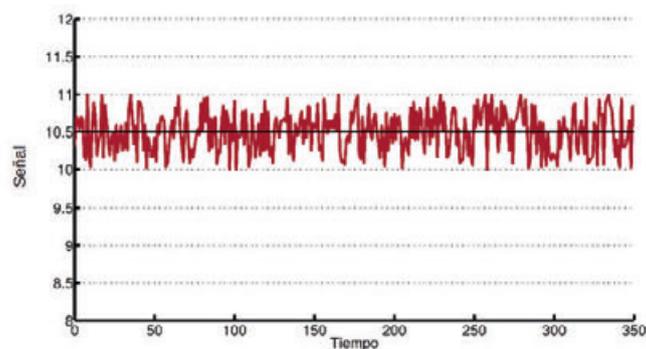


Figura 11
Variación temporal de la respuesta de un detector.
Fuente: Joaquín Campos Acosta.

Detectividad

Conocer el nivel de ruido es importante para estimar la mínima cantidad de luz que se puede detectar. Esa mínima cantidad se identifica mediante la detectividad, que es inversamente proporcional al ruido. Es una característica importante, puesto que limita la medida de señales luminosas débiles y ayuda en la precisión de la medida.

Dado que el nivel de ruido depende del área del detector y para poder comparar detectores de distinta área se define la detectividad específica (D^*), cuanto mayor sea la detectividad de un detector, mayor será su capacidad de detección, es decir, más pequeña será la cantidad de luz que podamos detectar con él.

Rango de respuesta

Al igual que ocurre con la longitud de onda, un detector no responde a cualquier cantidad de luz que incida sobre él. Existe un límite superior de cantidad de luz para el que se produce la saturación de la respuesta y un límite inferior de cantidad de luz que viene dado por el nivel de ruido. Este intervalo de respuesta se conoce también como «rango dinámico del detector». Comparado con el ojo humano, los detectores tienen un rango dinámico menor.

Los detectores térmicos tienen un límite inferior de respuesta más alto que los de tipo fotoeléctrico, pues su nivel de ruido es mayor. Su límite superior de respuesta también es más alto. Por ello, en aplicaciones donde la fuente emite una cantidad de luz grande, como el Sol, y se quiere medir todo lo que emite, se usan detectores de tipo térmico. Los detectores basados en la excitación electrónica son capaces de detectar las menores cantidades de luz.

10 ¿Qué tipo de detector utilizarías para medir la luz en cada una de las situaciones de la Tabla 5? ¿Por qué?

Situación de medición	Térmico	Excitación electrónica
Radiación solar		
Potencia de un puntero láser		
Lámpara de bronceado		
Luz de la Luna		

Tabla 5
Situaciones en las que se usan radiómetros para medir la radiación o cantidad de luz.

Linealidad

Se dice que un detector es lineal cuando la respuesta luminosa es proporcional a la cantidad de luz. El intervalo en el que un detector se comporta linealmente es más corto que su rango de respuesta o rango dinámico. Por otra parte, el intervalo de linealidad no es algo intrínseco al detector solamente, sino que depende también del sistema de control electrónico asociado al detector.

La linealidad de respuesta es una característica muy importante en cualquier detector, puesto que en muchas aplicaciones de los mismos se quiere conocer el cociente de dos cantidades de luz que inciden sobre el detector, lo cual es inmediato si la respuesta es lineal, es decir, proporcional a la cantidad de luz.

Otras características de la respuesta

La respuesta de un detector también puede cambiar con otras condiciones de la luz que incide sobre él, como el estado de polarización, la distribución espacial y angular, y el tiempo de respuesta. De ellas, la más importante es esta última. En algunas aplicaciones, como las comunicaciones ópticas, la luz no incide continuamente sobre el detector, sino que la respuesta está modulada

en el tiempo para transmitir información. El cambio de respuesta con esta característica de la luz está determinado por el tiempo de respuesta del detector.

Tiempo de respuesta

El tiempo de respuesta se define como el tiempo que transcurre desde que una cantidad constante

de luz incide sobre un detector hasta que este alcanza el nivel de respuesta correspondiente a esa cantidad de luz. Todos los detectores no son capaces de responder al cambio de la luz en el mismo tiempo. El tiempo de respuesta está muy relacionado con el efecto físico en que se basa la detección de la luz (efecto térmico o efecto fotoeléctrico). Los detectores térmicos son más lentos que los del efecto fotoeléctrico.

Respuesta a la frecuencia de modulación de la luz

La respuesta en frecuencia de un detector indica cómo varía la respuesta máxima del detector para una cantidad de luz dada a medida que se modifica la frecuencia de modulación de la luz que incide sobre el detector. En general, la respuesta va disminuyendo conforme aumenta la **frecuencia de modulación**. El límite superior está relacionado

con el inverso del tiempo de respuesta del detector. Puesto que los procesos electrónicos son mucho más rápidos que los térmicos, los detectores basados en el efecto fotoeléctrico responden a frecuencias de modulación mucho mayores que los térmicos. Por este motivo, los detectores usados en sistemas de comunicación de fibra óptica son los fotodiodos, basados en el efecto fotoeléctrico interno.

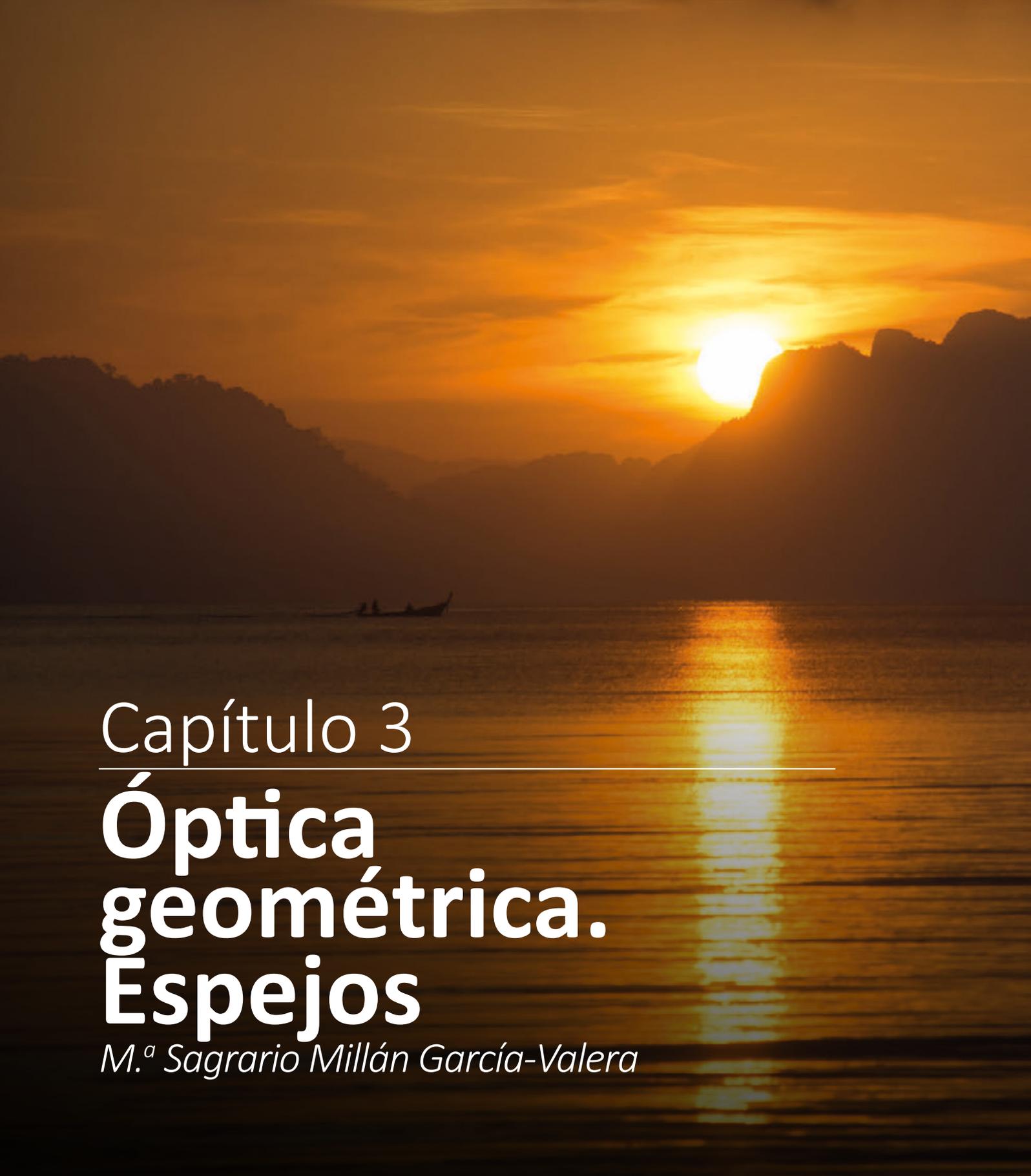
Resolución espacial

Esta característica es importante en los detectores matriciales que se usan para imágenes. La resolución espacial viene determinada por la inversa de la distancia entre centros de los elementos detectores o píxeles de la matriz. No siempre la mayor resolución es lo más idóneo.

11 ¿Por qué crees que no siempre una mayor resolución es lo más adecuado?

BIBLIOGRAFÍA

- Campos, J. (2014): «¿Sabías que la cantidad de luz que emiten las lámparas se mide en lúmenes?», *E- Medida, Revista Española de Metrología*, número 6, junio del 2014.
- Comisión Internacional de Iluminación: vocabulario internacional de iluminación (<http://eiv.cie.co.at>).
- Comité Español de Iluminación (2011): *El libro blanco de la Iluminación*. CEI (Madrid).
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Ministerio de Trabajo e Inmigración: *Evaluación y acondicionamiento de la iluminación en puestos de trabajo* (<http://goo.gl/JA4J5x>).
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Ministerio de Trabajo e Inmigración: *NTP 211: Iluminación de los centros de trabajo* (<http://goo.gl/xCcC39>).
- Philips: cómo elegir una bombilla (<http://goo.gl/Q1oRya>).
- Philips: instrucciones de iluminación (<http://goo.gl/vCOqsO>).
- Philips: wiki de iluminación (<http://goo.gl/1Na8qt>).

A sunset scene over a body of water. The sun is low on the horizon, partially obscured by dark, silhouetted mountains. The sky is a gradient of orange and yellow. The sun's reflection is visible on the water's surface. A small boat is visible on the water in the distance.

Capítulo 3

Óptica geométrica. Espejos

M.^a Sagrario Millán García-Valera

Introducción

La óptica geométrica se ocupa de describir la trayectoria de la luz en su propagación a través de uno o más medios materiales. Se trata de una primera aproximación que se sitúa en la escala macroscópica, la más habitual en nuestra vida diaria y que podemos apreciar fácilmente, a diferencia de la escala microscópica. La óptica geométrica establece las bases de la formación de imágenes a través de los componentes ópticos, que más adelante veremos, y determina las características de dichas imágenes en función de la configuración geométrica y de las propiedades ópticas de los materiales que intervienen.

Este capítulo se centra en los principios fundamentales de la óptica geométrica y, por tanto, no tiene

en cuenta el modelo ondulatorio ni el modelo fotónico de la luz, sino que se ocupa de las trayectorias luminosas sencillas y de la formación de imágenes a través de componentes elementales y de geometría simple (superficie plana o superficie esférica). A continuación explicaremos el funcionamiento esquemático de elementos tales como el espejo y el **dioptrio**, y ofreceremos diversos ejemplos de aplicación que ayudarán a relacionarlos con nuestra experiencia cotidiana. Comprender su funcionamiento será esencial para, posteriormente, comprender la formación de imágenes a través de elementos más complejos, como las lentes, los instrumentos ópticos y otros diversos sistemas en los que se profundizará en el siguiente capítulo.

Propagación de la luz en un medio natural

Como decíamos en el capítulo 1, un medio material es transparente cuando deja pasar la luz de manera que puedan verse otros objetos a través de él (Figura 1: agua). Esto implica que los haces de luz apenas alteran su energía, orden y estructura cuando se propagan en él. Algunos ejemplos de medios transparentes son el aire, el agua y el vidrio. La transparencia nunca es total debido al fenómeno de la absorción, es decir, a que el propio medio absorbe parte de la luz recibida. Dicha absorción depende del espesor del medio, entre otras características.

En otros materiales se produce esparcimiento, es decir, la luz se difunde al propagarse en el medio;

son los llamados «translúcidos». Estos materiales no permiten ver nítidamente los objetos a través de ellos, como sucede cuando miramos a través de un papel vegetal, un vidrio opalino o ciertos plásticos y gelatinas (Figura 1: agua con unas gotas de leche).

Por otra parte, un medio opaco no permite el paso de la luz, como sucede, por ejemplo, con la madera y los metales (Figura 1: leche).

Un medio ópticamente homogéneo presenta las mismas propiedades ópticas en todos sus puntos, mientras que en un medio ópticamente heterogéneo estas propiedades varían de un punto a otro. El índice de refracción (n) es una de las características más importantes de un medio en relación con la propagación de la luz en su seno. Se define como el cociente de dos velocidades:

$$n = c/v$$

donde $c=3\cdot 10^8$ m/s es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad de la luz en el medio considerado.

Figura 1
Medio transparente (agua), translúcido (agua con unas gotas de leche) y opaco (leche).
Fuente: M.ª Sagrario Millán.



En un medio homogéneo, el índice de refracción es constante en toda su extensión. Por ejemplo: el aire, a presión y temperatura constantes, es homogéneo, pero en la atmósfera es heterogéneo.

Los vidrios, cristales y plásticos que se utilizan para construir componentes ópticos son, por lo general, materiales homogéneos.

1 Busca índices de refracción de distintos materiales ópticos comunes y comenta qué significa que tengan un valor determinado.

Leyes fundamentales de las trayectorias luminosas

A continuación vamos a ver cinco leyes sobre las trayectorias luminosas que derivan del hecho de que la luz se propaga por el camino más rápido (principio de Fermat).

1. La luz se propaga en línea recta en el seno de un material transparente y homogéneo

Esta propiedad permite representar las trayectorias luminosas mediante trazos rectos (que llamamos «rayos de luz») y explicar, entre otros efectos, la formación de sombras y penumbras, los eclipses y la alineación óptica de objetos. Asimismo, permite establecer el principio de formación de imágenes en una cámara oscura (o «cámara estenopeica»).

2 Construye una cámara oscura o estenopeica a partir de las siguientes referencias:

- Alley, R. E. (1980): *The Camera Obscura in Science and Art. The Physics Teacher*.
- Mitjà, C.: *Imágenes estenopeicas (II). Imágenes sin cámara.*
En <http://goo.gl/VBqNGD>.
- Grepstad, J.: *Pinhole Photography. History, Images, Cameras, formulas.*
En <http://goo.gl/wmFnBU>.

directamente sobre el suelo está más caliente que las capas superiores, produciéndose un gradiente térmico que lleva asociado un gradiente de índice. El índice de refracción de las capas cercanas al suelo es menor (zonas más calientes, menos densas) que el índice de las capas más elevadas (zonas más densas). Como consecuencia, los rayos de luz se curvan de manera que parecen reflejarse en el suelo (Figura 2A). Las visiones de «agua» en este tipo de espejismos se explican por el brillo que produce la reflexión del cielo sobre el suelo (Figura 2B).

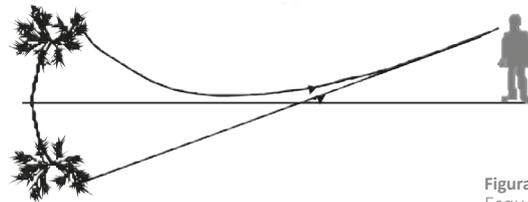


Figura 2A
Esquema del espejismo inferior.

Fuente: Millán, M. S.; Escofet, J., y Pérez, E. (2004): *Óptica geométrica*. Ariel Ciencia (Barcelona).



Figura 2B
Ejemplo de espejismo inferior.

Fuente: *A highway mirage*, Michael Gil, Flickr, CC BY 2.0 (<https://goo.gl/sZ7V7x>).

Saber más

Propagación en medios no homogéneos. Espejismos

En un medio no homogéneo cuyo índice de refracción (n) varía continuamente con la altura, la luz describe trayectorias curvas. Dichas curvas presentan una concavidad en la dirección de aumento del índice. Los espejismos son fenómenos asociados a la propagación de la luz en medios no homogéneos y pueden clasificarse en inferiores y superiores. El espejismo inferior se produce en días calurosos, cuando la capa de aire que está

Por el contrario, el espejismo superior se produce cuando el índice de refracción disminuye con la altura, fenómeno que suele darse en zonas frías, donde la capa de aire próxima al suelo es muy fría y es más densa que las capas superiores.

2. Ley de la reflexión

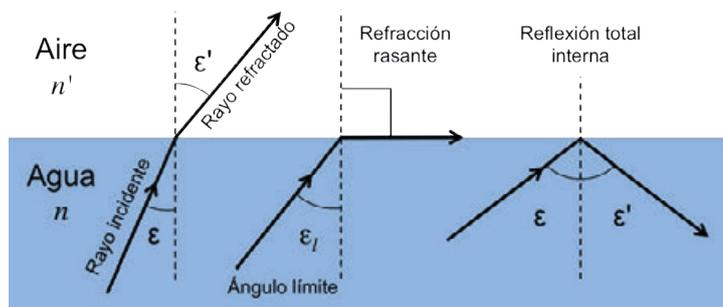
La luz que incide en una superficie lisa y pulimentada se refleja de manera que las trayectorias de la luz incidente y de la luz reflejada son simétricas con respecto a la recta normal (línea perpendicular a la superficie en el punto de incidencia de la luz). En otras palabras, el ángulo de incidencia, que es el ángulo que forma el rayo incidente con la normal, es de igual magnitud y de sentido contrario que el ángulo de reflexión o ángulo que forma el rayo reflejado con la normal. Esta es la llamada «reflexión especular», y es típica de espejos, metales pulidos, superficies de agua en estanques y lagos en calma, etcétera. Por otra parte, en una superficie rugosa e irregular, se produce la reflexión difusa (como hemos visto en el capítulo 1).

3. Ley de la refracción

Si la luz incide sobre la superficie de separación de dos medios transparentes, la trayectoria de la luz que se propaga en el segundo medio satisface la relación $n \sin \varepsilon = n' \sin \varepsilon'$, donde n y n' son los índices de refracción del primer y segundo medio, respectivamente; ε es el ángulo de incidencia, y ε' es el ángulo de refracción (o ángulo que forma el rayo refractado con la normal).

Si la luz pasa de un medio de índice menor a otro de índice mayor ($n < n'$) –por ejemplo, de aire a agua– su trayectoria se acerca a la normal. Por el contrario, si la luz pasa de un medio de índice mayor a un medio de índice menor ($n > n'$) –por ejemplo, de agua a aire– su trayectoria se aleja de la normal (Figura 3A). Esta última situación puede dar lugar a la reflexión total interna, que se

Figura 3A
Refracción, ángulo límite
y reflexión total interna.
Fuente: M.ª Sagrario Millán.



produce en el medio de mayor índice (en este caso, el agua) cuando la luz incide sobre la superficie con un ángulo superior al ángulo límite o crítico ($\varepsilon_i = \sin^{-1} [n'/n]$).

Esta situación se le puede presentar, por ejemplo, a un submarinista, que, al observar la superficie libre del agua, la percibirá plateada como un espejo (Figura 3B).



Figura 3B
Ejemplo de reflexión
total interna del
caparazón de una
tortuga marina en la
superficie del agua, en
una fotografía captada
por un submarinista.
Fuente: Green sea turtle,
Chelonia mydas and his
total internal reflection,
Broken Inaglor, Wikimedia
Commons, CC-BY-SA-4.0
(<https://goo.gl/Bt9Pwr>) y
GFDL (<http://goo.gl/WnaU>).

La reflexión total interna es el principio sobre el que se basan los prismas de reflexión, componentes que actúan como espejos y que están incorporados en diversos instrumentos ópticos. Por ejemplo, la combinación de dos prismas de reflexión, como el de la Figura 4, facilitó el paso de los antiguos e incómodos catalejos a los modernos prismáticos (a los que, como puede observarse, dieron nombre). Los prismáticos son instrumentos ágiles, compactos y, en general, binoculares.

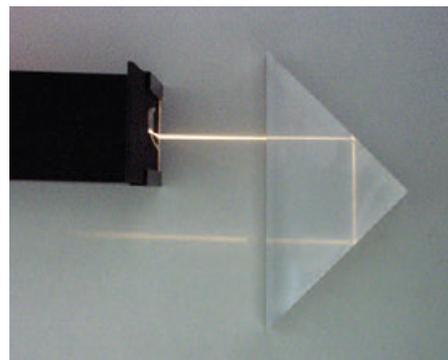


Figura 4
Prisma de reflexión
total (prisma de Porro).
Fuente: Retroreflexión
en un prisma, Zátanyi Sándor
(ifj) Fizped, Wikimedia
Commons, CC BY-SA 3.0
(<http://goo.gl/a5XXp>) y
GNU (<http://goo.gl/WnaU>).

Asimismo, la reflexión total interna (Figura 5) es el principio básico para la propagación de la luz en fibra óptica, componente óptico muy útil en campos tan diversos como las comunicaciones (permite la transmisión de señales por cable), la medicina (por ejemplo, para realizar endoscopias) o el interiorismo (con posibilidades en iluminación y decoración).

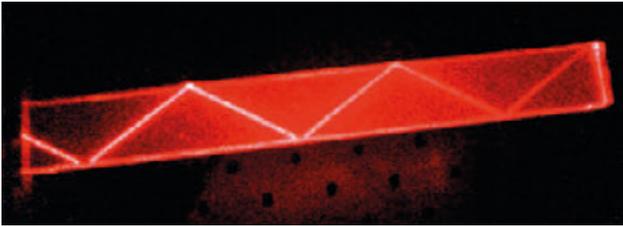


Figura 5

Propagación por reflexión total interna.

Fuente: *Total internal reflection in a bar of PMMA. The laser is HeNe laser*, Sai2020, Wikimedia Commons.

4. Conservación del plano de incidencia en la reflexión y la refracción

El plano de incidencia está definido por el rayo incidente y la normal en el punto de incidencia. Los rayos reflejados y refractados están contenidos en ese mismo plano.

5. Las trayectorias de luz son reversibles

Esto implica que si para ir desde un punto A a otro B, la luz ha seguido una trayectoria I; para ir desde B hasta A, seguirá la misma trayectoria I.

El índice de refracción de un material, generalmente, depende de la longitud de onda de la luz. Por esta razón, la luz blanca, al refractarse y penetrar en un medio transparente, se descompone en diferentes colores (descomposición cromática) que siguen trayectorias ligeramente distintas. El arcoíris y la descomposición cromática en prismas (Figura 6) son fenómenos relacionados con esta propiedad de los materiales. Esto no sucede, sin embargo, en la reflexión, ya que las trayectorias de los rayos reflejados son independientes de la longitud de onda.

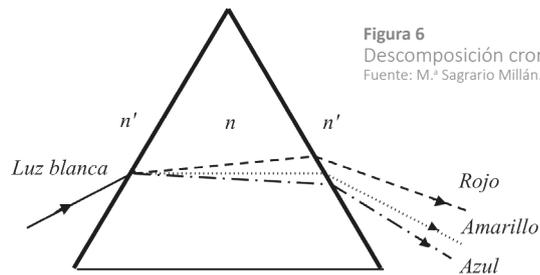


Figura 6

Descomposición cromática en un prisma.

Fuente: M.ª Sagrario Millán.

Reparto de energía

En la superficie de separación de dos medios transparentes se suelen producir los fenómenos de reflexión, refracción y absorción. La energía de la luz incidente se distribuye entre ellas dependiendo de diferentes variables: los materiales en contacto (a través de sus índices de refracción, n_1 y n_2), el ángulo de incidencia y las componentes del vector eléctrico paralela y perpendicular al plano de incidencia que se considere.

Las ecuaciones de Fresnel permiten calcular el coeficiente de reflexión —«reflectancia» (R) o fracción de la potencia energética reflejada sobre la potencia incidente— y el coeficiente de transmisión —«transmitancia» (T) o fracción de la

potencia energética transmitida sobre la potencia incidente—.

La conservación de la energía establece que la suma de los coeficientes de reflexión, transmisión y absorción ha de ser la unidad. Cuando la luz incide normal en la superficie, la luz reflejada y la transmitida solo dependen de los índices de refracción de los dos medios. Si se produjese el caso extremo de que estos fuesen iguales, toda la luz se transmitiría y nada se reflejaría, lo que nos llevaría a que no viésemos dicha superficie. Un ejemplo de esto son las bolitas de poliácridamida, que, al introducirlas en agua, son totalmente invisibles (puede verse en el siguiente vídeo: <https://goo.gl/gmi4Km>).

Formación de la imagen

Consideremos un punto emisor de luz O , que puede ser emisor de luz propia (fuente primaria) o puede reenviar la luz que recibe de otra fuente (fuente secundaria). Se forma una imagen de O cuando los rayos emitidos por este punto, tras reflejarse o refractarse en una o varias superficies ópticas, se reúnen en un nuevo punto O' . En este caso, se dice que O' es la imagen de O , o también que (O, O') es un par objeto-imagen conjugado a través del **sistema óptico** compuesto por una o más superficies (Figura 7).

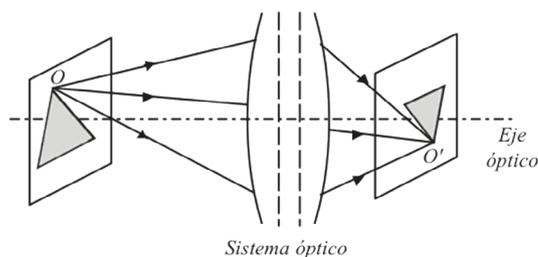


Figura 7
Formación de una imagen en un sistema óptico perfecto.
Fuente: M.^a Sagrario Millán.

Puede ser que los rayos emergentes converjan y se corten realmente en O' , en cuyo caso hablamos de imagen real (Figura 7), o que salgan divergentes y sean sus prolongaciones hacia atrás las que se corten en el punto O' , en cuyo caso hablamos de imagen virtual.

En la práctica, una imagen real puede ser proyectada sobre una pantalla (por ejemplo, sobre una pantalla de cine) o ser captada por un sensor (por ejemplo, por el sensor de una cámara fotográfica o por la retina del ojo humano). Una imagen virtual, sin embargo, no puede ser recogida para proyectarla en una pantalla, aunque nos produzca una fuerte impresión de presencia real. Las imágenes virtuales más comunes son las que percibimos cuando nos miramos en un espejo plano, un escaparate o en la superficie de un estanque de agua. Para captar una imagen virtual se requiere un sistema óptico adicional –por ejemplo, una cámara fotográfica o el ojo humano– que proporcione de ella una imagen final real sobre la posición del sensor.

La mayoría de los objetos están compuestos por un conjunto continuo de puntos materiales que emiten o difunden luz. La imagen de un objeto extenso está compuesta por el conjunto de las imágenes puntuales de todos los puntos que forman ese objeto. La imagen de un objeto extenso puede ser real o virtual. Además, si atendemos a otros criterios, una imagen puede ser directa o invertida en función de su orientación respecto del objeto que representa y puede ser una imagen mayor o menor según la relación de tamaño o aumento lateral entre la imagen y el objeto.

Para que la formación de imágenes sea perfecta, se deben cumplir las tres condiciones de Maxwell:

- Estigmatismo o correspondencia punto a punto, es decir, todos los rayos que proceden de un mismo punto objeto se cortan, real o virtualmente, en el mismo punto imagen.
- Correspondencia plano a plano: los puntos contenidos en un mismo plano objeto tienen su imagen contenida en un mismo plano imagen.
- Razón de semejanza entre objeto e imagen: las figuras que conforman el objeto y la imagen guardan entre sí una relación de proporcionalidad.

El cumplimiento estricto de estas condiciones es extraordinariamente difícil y solo se consigue en casos muy concretos, como, por ejemplo, en el caso del espejo plano de superficie óptica, es decir, un espejo que refleja en su primera superficie (no tiene la capa protectora de vidrio que tienen los espejos de uso doméstico).

Para otros sistemas y componentes ópticos, estas condiciones se satisfacen solo de forma aproximada cuando todos los ángulos que intervienen son pequeños (considerando entre ellos los ángulos de incidencia, reflexión y refracción). En sistemas ópticos formados por superficies centradas y alineadas sobre un eje común («eje óptico»), tener ángulos pequeños implica utilizar objetos de pequeña extensión situados a distancias relativamente grandes de las superficies ópticas, que, a su vez, serán de un reducido tamaño (apertura) y tendrán grandes radios de curvatura.

Cuando un sistema óptico forma imágenes en tales condiciones, se dice que opera en «aproximación paraxial». La imagen paraxial es idealmente de elevada calidad, pero, en la práctica, adolece de restricciones importantes, como, por ejemplo, pequeña extensión observable, iluminación pobre, etcétera. Cuando no se cumplen las condiciones de la aproximación paraxial, las imágenes

presentan deficiencias («aberraciones») que les restan calidad.

El diseño de sistemas ópticos trata de responder a todas estas dificultades estudiando la combinación de materiales y superficies que mejor se adapte a los requisitos de una aplicación óptica concreta.

Espejo plano

La formación de imágenes a través de un espejo plano de primera superficie es perfecta para cualquier posición de un objeto. La imagen especular de un objeto real tiene las siguientes características (Figura 8):

- Es virtual.
- Tiene el mismo tamaño que el objeto.
- Se encuentra a la misma distancia del plano del espejo que el objeto.
- Es simétrica respecto del objeto (la denominada «inversión parcial o especular»).

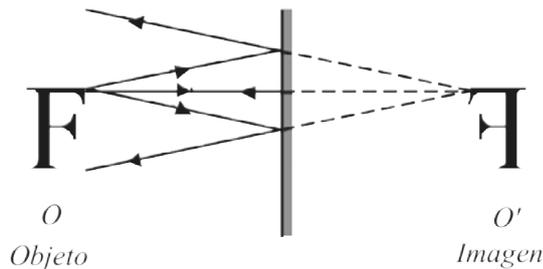


Figura 8
Formación de la imagen en un espejo plano.
Fuente: M.º Sagrario Millán.

El campo de un espejo plano es la extensión del objeto cuya imagen se observa a través del espejo desde una posición determinada. El campo depende del tamaño del espejo y de las posiciones relativas del objeto, del espejo y del observador. Se determina a partir de los rayos que se reflejan en los extremos del espejo y que alcanzan al observador (Figura 9).

Cuando un espejo plano gira un cierto ángulo, los rayos reflejados y, por tanto, también la imagen,

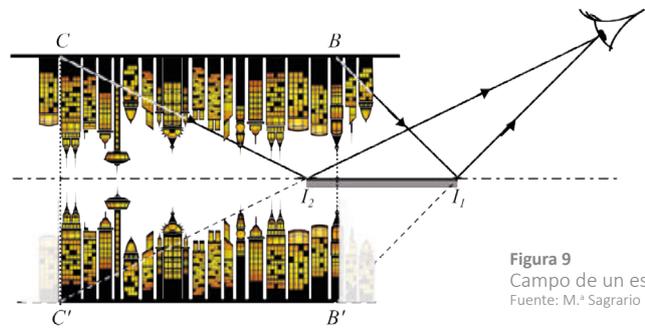


Figura 9
Campo de un espejo plano.
Fuente: M.º Sagrario Millán.

giran en el mismo sentido, pero el doble del ángulo de rotación del espejo («palanca óptica»). Por otra parte, si un espejo se aleja una cierta distancia de un objeto fijo, la imagen se desplaza en el mismo sentido que el espejo, en una distancia doble. De forma análoga, si el espejo se acerca al objeto fijo, sucede lo mismo: la imagen se desplaza en el mismo sentido que el espejo y también en una distancia doble. Estos efectos se explican a partir de la ley de la reflexión.

Combinaciones de espejos planos

El denominado «principio del periscopio» consiste en la asociación de dos espejos planos en paralelo (Figura 10). Este instrumento se utiliza para ver los objetos que están a una altura distinta del observador, como sucede en el caso de un submarino.

Si dos espejos planos se asocian, pero esta vez formando un ángulo inferior a 180° , se pueden formar imágenes múltiples por combinación de reflexiones en uno y otro espejo. El número de imágenes aumenta a medida que el ángulo entre los dos

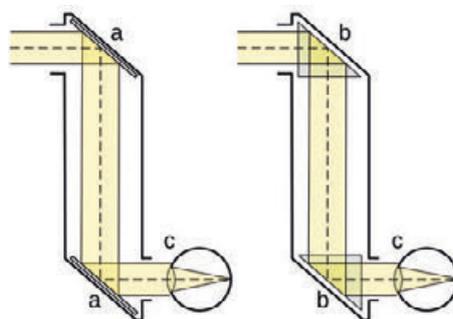


Figura 10
Esquema de un periscopio de espejos o de prismas de reflexión.
Fuente: *Principio del periscopio*, Christian Schirm, Wikimedia Commons.

espejos disminuye, creando efectos sorprendentes que se utilizan a menudo en espacios decorativos o recreativos (Figura 11A).



Figura 11A
Combinaciones de espejos planos. Sala de espejos.
Fuente: *Mattress factory 029 Yayoi Kusama*, Infinity dots mirrored room, Marius Watz, Flickr, CC BY-SA 2.0 (<https://goo.gl/lrxv4>).

Si se añade un espejo más y se asocian tres espejos planos en 60° (prisma equilátero), las imágenes se multiplican formando bonitas figuras simétricas, como en el caso del calidoscopio de la Figura 11B.

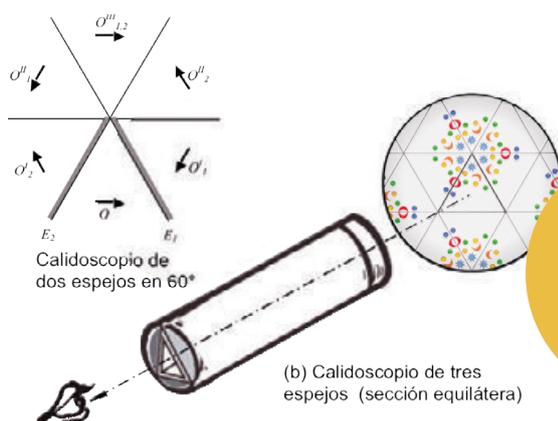


Figura 11B
Calidoscopio.
Fuente: M.º Sagrario Millán.

Saber más Cubo retrorreflector

Un cubo retrorreflector consiste en la asociación de tres espejos planos perpendiculares entre sí (como las paredes de la esquina de una habitación) y tiene la propiedad de retornar los rayos de luz en la misma dirección con la que llegan. En la Figura 12 se muestra el funcionamiento del cubo para rayos con direcciones incidentes distintas (líneas negras y rojas). Cada rayo se refleja tres veces, una en cada espejo, tras lo cual emerge del cubo con la misma dirección que la incidente, pero en sentido contrario.

En lugar de con espejos, también se puede construir tallando un cubo de vidrio óptico que funciona por reflexión total interna o mediante capas metálicas depositadas en las caras del cubo. Además, se puede obtener una superficie retrorrefractora extensa asociando numerosos cubos pequeños. Dispuestos de esta forma, se utilizan en señalización pasiva y para mejorar la visibilidad de objetos y personas (en carretera, vehículos, ciclistas y prendas de protección). También se utilizan para reflejar ondas de radio, en la detección por radar y se han instalado en la Luna para el reenvío de señales a la Tierra.

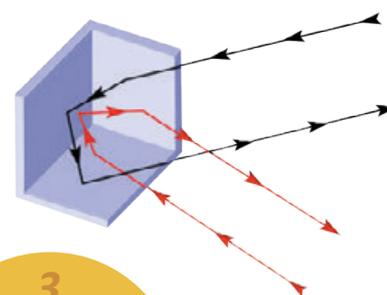


Figura 12
Cubo reflector.
Fuente: *Corner reflector*, Chetvornov, Wikimedia Commons.

3
Construye un periscopio (Figura 10) y un calidoscopio con espejos planos (Figura 11B).

Superficie plana refractante o dioptrio plano

En la formación de imágenes a través de una superficie plana refractante no hay estigmatismo, ya que todos los rayos que salen de un punto objeto, tras refractarse en la superficie plana, ya no vuelven a juntarse en un único punto imagen y, en consecuencia, la posición de la imagen es diferente según la inclinación del haz de rayos que llega al observador. Por ejemplo, la Figura 13 muestra un caso particular para un objeto sumergido en el agua cuya imagen (virtual) es observada desde el exterior ($n > n'$). Si el observador se desplaza desde la vertical (V) a otras posiciones (P_1 o P_2), verá que la imagen también cambia de posición, de forma transversal y en cuanto a su profundidad.

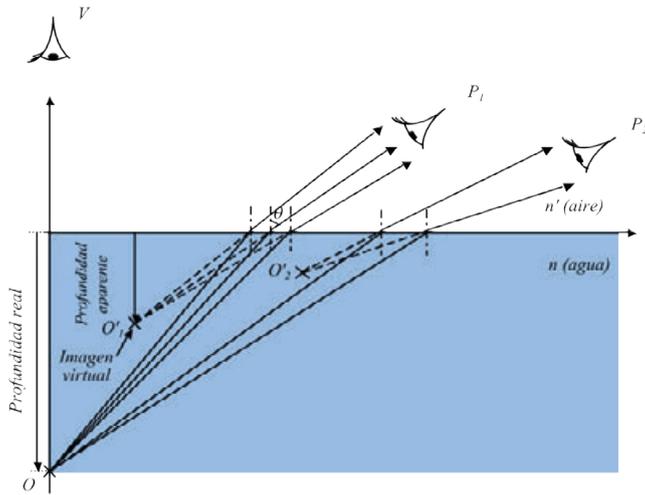


Figura 13
Imagen a través de una superficie plana refractante. Variación de la profundidad aparente con la posición del observador.
Fuente: M.º Sagrario Millán.

La profundidad aparente, que es la posición de la imagen respecto de la superficie del agua, es menor que la profundidad real a la que está el objeto y disminuye aún más cuando los rayos emergentes que llegan al observador son muy inclinados (posición P_2 del observador respecto a las posiciones P_1 y V). Considerando que la observación

se realiza en la dirección normal a la superficie («aproximación paraxial»), podemos calcular la posición aparente de la imagen s' a partir de la expresión $\frac{n}{s} = \frac{n'}{s'}$, donde n y n' son los índices de refracción del primer y segundo medio (del agua y del aire en el ejemplo de la Figura 13), respectivamente, y s es la posición real del objeto respecto a la superficie. La imagen a través de la superficie plana refractante tiene el mismo tamaño que el objeto.

También es importante destacar que es habitual combinar una superficie plana refractante con otra. Esta asociación en paralelo da lugar a una «lámina planoparalela». Un ejemplo de lámina planoparalela es el vidrio de una ventana. La imagen que vemos a través de una lámina planoparalela de índice n y grosor d , sumergida en un medio de índice n' , está desplazada respecto del objeto en una cantidad D , que viene dada por $D = \frac{n-n'}{n}d$. Por lo general, el reducido grosor del vidrio, en comparación con la distancia a la que está el objeto cuya imagen observamos a través de la ventana, hace que no sea perceptible ese pequeño desplazamiento de la imagen respecto al objeto. Por otra parte, si la asociación de dos superficies planas refractantes se realiza en ángulo, constituye un prisma de desviación y tiene un efecto de giro sobre la imagen, siendo la arista del prisma el eje de giro. Los prismas de desviación apenas se utilizan en sistemas formadores de imagen por sus importantes inconvenientes de descomposición cromática y los bordes irisados que producen en las imágenes. En cambio, sí que se utilizan si se trabaja con ángulos pequeños (prismas delgados). Un ejemplo de aplicación serían los prismas delgados de uso oftálmico, que se utilizan para compensar descentramientos en la visión binocular (por ejemplo, estrabismos).

Convenio de signos

Para utilizar las ecuaciones de correspondencia objeto-imagen e interpretar correctamente los resultados que se obtengan, se debe tener en cuenta el siguiente convenio de signos:

- El vértice V de la superficie reflectante o refractante es el origen de distancias sobre el eje óptico, como en un sistema cartesiano normal. De forma análoga, las distancias transversales son positivas hacia arriba y negativas hacia abajo. De esto se deriva que un aumento positivo

indica una imagen directa, mientras que un aumento negativo indica una imagen invertida respecto de la orientación del objeto.

- El ángulo que forma un rayo con el eje es positivo si al llevar el rayo a coincidir con el eje por el camino angular más corto, se realiza el movimiento en sentido antihorario (levógiro), y es negativo si se realiza en el sentido de las agujas del reloj (dextrógiro).

Espejo esférico

Un espejo esférico es una superficie reflectante con forma de casquete esférico. El eje óptico del espejo esférico une el centro de curvatura con un punto de la superficie o vértice (Figura 14). En aproximación paraxial, la posición de la imagen a través de un espejo esférico s' puede calcularse mediante la expresión $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$, donde s y s' son las distancias medidas desde el vértice del espejo al objeto y la imagen, respectivamente, y R es el radio. En un espejo esférico, el aumento lateral o transversal m (relación del tamaño de la imagen O' al tamaño del objeto O) vale $y = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$. La imagen a través de un espejo esférico, por estar basada en la reflexión, no presenta aberraciones cromáticas, es decir, está libre de las irisaciones producidas por la descomposición cromática de la refracción.

La imagen de punto objeto lejano ($s = -\infty$) en la dirección del eje se forma sobre el foco del espejo (F), en un punto cuya posición viene dada por la distancia focal del espejo ($f = R/2$). En otras palabras, si un rayo incide sobre el espejo paralelo al eje, al reflejarse, pasa—real o virtualmente—por el foco del espejo. Si un rayo incide en la dirección del radio, se refleja sobre la misma dirección, pero en sentido contrario. El rayo que incide apuntando al vértice de un espejo se refleja siguiendo una trayectoria simétrica respecto al eje óptico.

Un espejo puede ser cóncavo o convexo, según sea su curvatura en relación con la luz incidente.

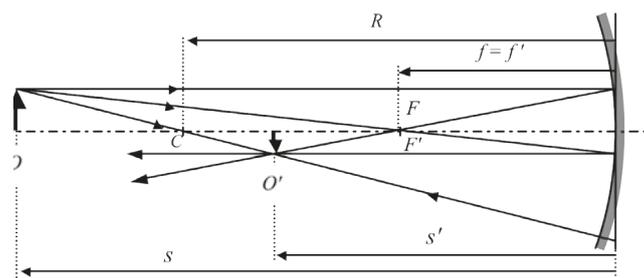


Figura 14
Obtención gráfica de la imagen en un espejo esférico cóncavo.
Fuente: M.º Sagrario Millán.

Un cuenco de metal pulido es un ejemplo de un espejo cóncavo, mientras que una bola de Navidad metalizada es un ejemplo de espejo convexo. Un espejo cóncavo tiene radio negativo y un espejo convexo tiene radio positivo.

Si se sitúa un objeto real frente a un espejo convexo, generalmente, la imagen es virtual, directa y menor (Figura 15A). El espejo convexo permite la observación de un campo objeto muy extenso, por lo que es muy utilizado para la visión panorámica en sistemas de seguridad, para mejorar la visibilidad en cruces de vías estrechas, en espejos retrovisores, etcétera (Figura 15B).

Sin embargo, si se sitúa un objeto real frente a un espejo cóncavo, las características de la imagen dependerán en gran medida de la posición del objeto, pudiéndose distinguir cinco configuraciones de interés (Figura 16).

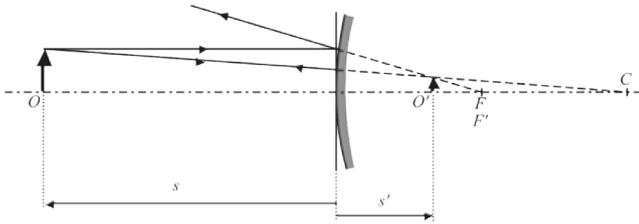


Figura 15A

Formación de la imagen de un objeto real a través de un espejo cóncavo.

Fuente: M.º Sagrario Millán.



Figura 15B

El espejo cóncavo ofrece un gran campo de visión. Ejemplo de aplicación: vigilancia en supermercados.

Fuente: M.º Sagrario Millán.

Si el objeto está entre el foco y el vértice del espejo (E), la imagen es virtual, directa y mayor. Un espejo de tocador es un claro ejemplo de esta configuración. Cuando el objeto está entre el foco y el centro de

curvatura (C), la imagen es real, invertida y mayor, y se forma por detrás del objeto. Cuando el objeto está sobre el centro de curvatura del espejo (B), la imagen real se forma en ese mismo plano, con el mismo tamaño, pero invertida. Estas dos últimas configuraciones se utilizan en trucos de magia, efectos especiales, instalaciones recreativas, etcétera.

Cuando el objeto está lejos del espejo (A), se forma su imagen real, invertida y menor en una posición cercana al foco. Esta última configuración, llevada al extremo, se utiliza para concentrar los rayos solares y producir fuego en el foco (de ahí el origen etimológico de la palabra «foco»). Ahora bien, como la superficie esférica reflectante no es estigmática para un punto objeto lejano, la confluencia de rayos en el foco es deficiente («caústica»). En este caso, la solución consiste en utilizar un espejo de sección parabólica, que sí es estigmático para el par (objeto lejano en el eje, imagen en el foco).

Saber más Espejos de precisión

El espejo parabólico se utiliza en el espejo primario de los telescopios a fin de mejorar la calidad de las imágenes astronómicas. Para poder captar una gran cantidad de información astronómica (objetos lejanos en el universo, discos planetarios y planetas, la luz emitida por las estrellas, etcétera), es recomendable que el espejo primario tenga un gran tamaño (apertura o diámetro del espejo primario).

En España tenemos un magnífico ejemplo con el Gran Telescopio Canarias (GTC), en el Observatorio

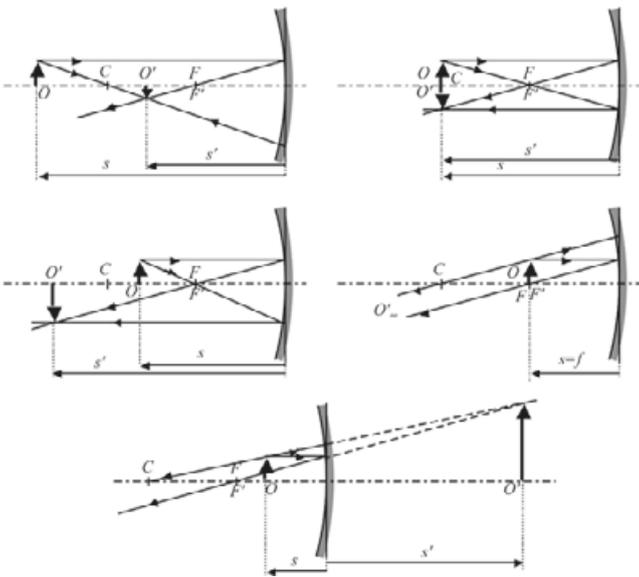


Figura 16

Formación de la imagen a través de un espejo cóncavo para distintas posiciones de un objeto real.

Fuente: Millán, M. S.; Escofet, J., y Pérez, E. (2004): *Óptica geométrica*. Ariel Ciencia (Barcelona).



Figura 17

Gran telescopio de las Islas Canarias (telescopio de espejo primario segmentado).

Fuente: *Observatory La Palma*, Niels, CC BY-NC-SA 2.0 (<https://goo.gl/lrxVf4>).

de Roque de los Muchachos, La Palma, Islas Canarias (Figura 17). Se trata de un telescopio de espejo primario segmentado, cuyos segmentos o facetas se controlan por la parte trasera mediante actuadores mecánicos independientes, lo que evita o reduce las complicaciones mecánicas que podría tener su fabricación, posicionamiento y orientación.

¿Sabías que...? Encendido de la llama olímpica

En la antigua Grecia, una llama eterna era colocada frente a los principales templos. Así sucedía en Olimpia, sede de las competiciones, en el santuario dedicado a la diosa Hestia o en los templos de Zeus y Hera. Sin embargo, dado que el fuego era parte de la adoración de los dioses, existía la necesidad de que fuera puro.

Por esta razón, los antiguos griegos empleaban un *skaphia*, es decir, un ‘ancestro del espejo parabólico’. Este dispositivo concentraba los rayos



Figura 18

Encendido de la llama olímpica.

Fuente: OG Calgary 1988, *Lighting of the Olympic flame in Olympia*, © IOC / Jean-François Pahud (Teaching resources: The Olympic flame and the torch relay). © 2015 International Olympic Committee – All rights reserved.

solares en su foco, provocando un intenso calor, de forma que al colocarse una antorcha en el foco del *skaphia*, esta ardía y se encendía así el fuego sagrado.

Un espejo parabólico forma una imagen estigmática del Sol en su foco. Su diseño, similar a un espejo esférico cóncavo, está especialmente indicado para concentrar la energía de una fuente de luz puntual situada a una distancia lejana. Un ejemplo de aplicación podría ser el de los hornos solares.

¿Sabías que...? Espejos de feria

Los espejos de feria presentan superficies de geometría irregular, lo que proporciona imágenes deformadas en las que la relación de proporcionalidad se altera de unos puntos a otros. Este efecto produce sorpresa y diversión en los visitantes, que observan reflejadas sus propias imágenes, pero deformadas.



Figura 19
Imagen distorsionada en un espejo de feria.

Fuente: *Image of a boy in a distorting mirror*, Gaius Cornelius, Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0 (<http://goo.gl/a5XXp>) y GFDL (<http://goo.gl/WnaU>).

Dioptrio esférico

Un dioptrio esférico es una superficie en la que se produce refracción de la luz y tiene simetría esférica. El eje óptico une el centro de curvatura con un punto de la superficie (vértice). En aproximación paraxial, la posición de la imagen a través de un dioptrio esférico s' puede calcularse mediante la expresión:

$$n\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{s}\right) = n'\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{s'}\right)$$

donde s y s' son las distancias medidas desde el vértice del dioptrio al objeto y a la imagen, respectivamente; n es el índice de refracción del medio por el que incide la luz; n' es el índice de

refracción del medio por el que emerge la luz refractada, y R es el radio (Figura 20).

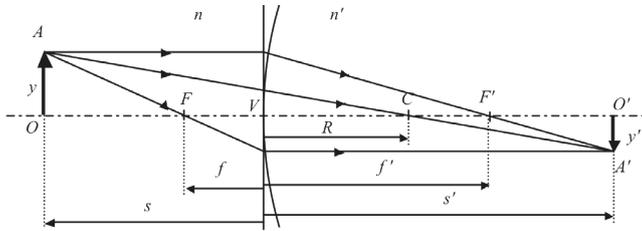


Figura 20

Formación de la imagen a través de un dioptrio esférico para un objeto real.

Fuente: Millán, M. S.; Escofet, J., y Pérez, E. (2004): *Óptica geométrica*. Ariel Ciencia (Barcelona).

En un dioptrio esférico, el aumento lateral o transversal m se define como:

$$m = \frac{y'}{y} = \frac{ns'}{n's}$$

La imagen se forma por refracción de la luz a través del dioptrio. Si la luz es blanca, se produce también descomposición cromática, lo cual se manifiesta en los contornos coloreados de la imagen (Figura 21).

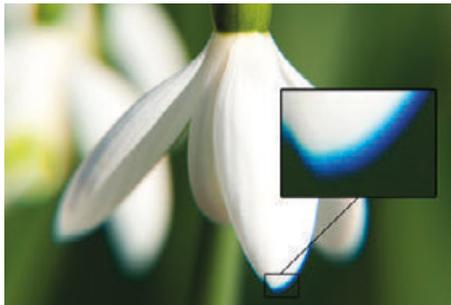


Figura 21

Imagen afectada de aberración cromática (contornos irisados).
Fuente: *Chromatic aberration with detail*, Jkk, Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0 (<http://goo.gl/a5XXp>).

La imagen de un punto objeto lejano ($s = -\infty$) en la dirección del eje se forma sobre el foco imagen del dioptrio (F'), en un punto cuya posición viene dada por la distancia focal imagen del dioptrio medida desde el vértice: $f' = \frac{n'R}{n'-n}$. Es decir, si un rayo incide sobre el dioptrio paralelo al eje, al refractarse, pasa –real o virtualmente– por el foco imagen F' del dioptrio. Existe una posición sobre el eje llamada foco objeto del dioptrio (F), que, cuando es ocupada por un punto objeto, se

obtiene una imagen lejana de él (se dice que «en el infinito»).

La distancia desde el vértice al foco objeto del dioptrio se llama «distancia focal objeto del dioptrio» y se define como $f' = -\frac{n'R}{n'-n}$. Si un rayo incide sobre el dioptrio pasando –real o virtualmente– por el foco objeto F , tras la refracción emerge paralelo al eje.

Las características de una imagen pueden ser muy variadas y dependen de todas las variables que intervienen: los índices de refracción de los materiales anterior y posterior, el radio de curvatura, la orientación cóncava o convexa de la curvatura, y la posición del objeto respecto al vértice del dioptrio. Por ejemplo, en la Figura 22, la imagen del objeto que hay en el interior de la pecera es directa y mayor (la imagen del pez). Sin embargo, en la Figura 23, las gotas de lluvia sobre el cristal de la ventana proporcionan una imagen invertida y menor del objeto lejano (el edificio).

Figura 22

Imagen aumentada y directa a través de un dioptrio esférico (pecera).
Fuente: *The oldest one, This Year's Love*, Flickr, CC BY-NC-ND 2.0 (<https://goo.gl/cefU8>).



Figura 23

Imagen invertida y menor de un edificio a través de un dioptrio esférico (gota de lluvia sobre la ventana). Se aprecian múltiples imágenes en las diferentes gotas.
Fuente: Rosalba García Millán y M.ª Sagrario Millán.

La observación de nuestro entorno nos ofrece múltiples ejemplos; simplemente, tenemos que observarlos con nuestros propios ojos (Figura 24).



Figura 24

Imágenes por reflexión y refracción parcial en un dioptrio esférico (córnea del ojo).
Fuente: *My eye*, Dan Foy, Flickr, CC BY 2.0 (<https://goo.gl/sZ7V7x>).

BIBLIOGRAFÍA

- Millán, M. S.; Escofet, J., y Pérez, E. (2004): *Óptica geométrica*. Ariel Ciencia (Barcelona).
- Tarásov, L. y Tarásova, A. (1982): *Charlas sobre la refracción de la luz*. MIR (Moscú).



Capítulo 4

Lentes e instrumentos ópticos

*Enrique Hita Villaverde
M.^a Josefa Yzuel Giménez*

Introducción

Se tienen referencias de la utilización de vidrios para la observación visual desde el siglo XIII, aunque fue posteriormente, en el siglo XVI, cuando se generalizó su uso con este fin, adquiriendo su fabricación un gran desarrollo (Figura 1). Las lentes se pueden considerar los elementos fundamentales constitutivos de los instrumentos ópticos, siendo la lente, en sí, el instrumento óptico más simple que existe con múltiples aplicaciones. Los microscopios, telescopios, lupas, cámaras fotográficas, proyectores, espectroscopios, gafas, prismáticos... están formados fundamentalmente por

lentes. Todos estos instrumentos resultan de gran utilidad y ponen de manifiesto la importancia de este sistema óptico, lo que justifica dedicar una especial atención a su conocimiento. En el presente capítulo se darán las bases para su estudio.



Figura 1

Piezas de museo de distintos tipos de lentes correctoras.
Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.

Lentes

Un sistema óptico de gran importancia es el formado por la asociación de dos dioptrios, generalmente

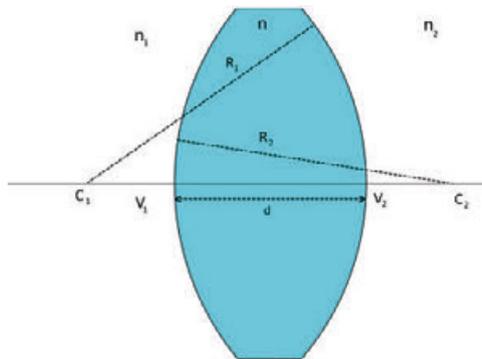


Figura 2

Esquema de una lente y de los parámetros que la caracterizan.
Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.

esféricos. Se trata de un **sistema de revolución centrado** que separa medios cuyos índices de refracción suelen ser distintos (Figura 2). Este sistema se denomina «lente» y se caracteriza por sus radios de curvatura, por su índice de refracción y por los índices de refracción de los medios extremos que separa, que suelen ser iguales. La línea que une los centros de curvatura se denomina «eje óptico de la lente».

Como se ha indicado anteriormente, las lentes se fabrican desde hace siglos y su uso está muy generalizado actualmente. Se utilizan con diferentes fines, aunque tal vez el más frecuente sea su utilización para la corrección de problemas visuales, como elementos compensadores de los mismos.

La lente como sistema óptico centrado

Si un objeto luminoso de tamaño o se sitúa delante de una lente de índice de refracción n , trataremos de determinar dónde estará la imagen que de este objeto produce la lente, así como el tamaño que presentará la misma. En primer lugar, consideraremos la lente como un sistema compuesto por dos dioptrios y aceptaremos, de acuerdo con

lo estudiado en el capítulo anterior sobre representación óptica, que la imagen y' que del objeto y produce el primer dioptrio constituye el objeto para el segundo dioptrio. Bajo estas premisas, considerando que los medios extremos son iguales (ambos con índice de refracción n_0) y que trabajamos en el **dominio paraxial**, serán de aplicación

a cada dioptrio las ecuaciones vistas en el capítulo anterior:

$$\begin{aligned} -n/s+n'/s' &= (n'-n)/R & 1 \\ ny/s &= n'y'/s' & 2 \end{aligned}$$

Por lo general, el espesor e de las lentes suele ser muy pequeño en comparación con sus radios de curvatura y las distancias objeto e imagen, por lo que se puede considerar despreciable frente a aquellas, denominándose, por ello, «lentes delgadas».

En estas circunstancias, la distancia objeto al segundo dioptrio será igual a la distancia imagen del primero (es decir: $s_2 = s'_1 - e \approx s'_1$), debiendo tenerse en cuenta el criterio de signos establecido en el capítulo anterior, así como el origen de distancias en cada caso. Con estas aproximaciones, los vértices de las dos superficies (V_1 y V_2) pueden considerarse coincidentes en un punto denominado «centro óptico de la lente». Si en estas condiciones mencionadas aplicamos las ecuaciones 1 y 2 a cada superficie de la lente, haciendo $s_1 = s$, $s'_1 = s_2$, $s'_2 = s'$, $y_1 = y$, $y'_1 = y_2$ e $y'_2 = y'$, obtendremos:

$$\begin{aligned} -1/s+1/s' &= (n-n_0)/n_0 \cdot (1/R_1-1/R_2) & 3 \\ \beta' &= \beta'_1 \cdot \beta'_2 = y'/y = s'/s & 4 \end{aligned}$$

siendo s y s' las distancias del centro de la lente al objeto y a la imagen, respectivamente, y correspondiendo y e y' a los tamaños de cada uno de ellos. También será interesante encontrar, para una lente supuestamente delgada, dónde está la imagen de un punto en el eje en el infinito ($s = \infty$), pues este punto, llamado «foco imagen» de la lente (F'), representa por dónde pasarán real o virtualmente, después de atravesarla, los rayos que inciden sobre ella paralelos entre sí y al eje de la misma (Figuras 3A y 3B). La distancia del centro de la lente a este punto se denomina «distancia focal imagen», o simplemente «focal imagen» de la misma f' , y vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$1/s' = 1/f' = (n-n_0)/n_0 \cdot (1/R_1-1/R_2) \quad 5$$

Análogamente, resultará de interés calcular la posición de un punto F en el eje del sistema cuya

imagen se forme en el infinito ($s' = \infty$). Todos los rayos que provengan de ese punto, o apunten a él, y entren en la lente emergerán de la misma paralelos entre sí y al eje (Figuras 3C y 3D). La distancia entre el centro de la lente y este punto se denomina «distancia focal objeto», o simplemente «focal objeto» de la misma, y vendrá dada por la ecuación:

$$-1/s = -1/f = (n-n_0)/n_0 \cdot (1/R_1-1/R_2) \quad 6$$

Como se deduce de las ecuaciones 5 y 6, para medios extremos iguales será: $f' = -f$.

A las respectivas inversas de las distancias focales se las denomina «potencia objeto» (ϕ) y «potencia imagen» (ϕ') de la lente, y, si las focales se miden en metros, la unidad de medida de la potencia es la **dioptría**. Como se puede concluir a partir de las ecuaciones 5 y 6, tanto las focales como las potencias de una lente dependen de su forma, de su índice de refracción y del medio en el que esté inmersa la lente.

Los planos perpendiculares al eje del sistema que pasan por F y F' se denominan «planos focales». Según lo anteriormente comentado, se puede concluir que la imagen del plano del infinito será el «plano focal imagen» y un plano cuya imagen se encuentre en el plano del infinito, el «plano focal objeto».

Por tanto, un haz de rayos paralelos entre sí pero no al eje, es decir, que incidan inclinados sobre la lente, saldrá (real o virtualmente) por un punto fuera del eje del plano focal imagen. De igual forma, un haz de rayos cuyo origen sea un punto fuera del eje del plano focal objeto e incida sobre la lente, o apunte a él, emergerá de la misma como un haz de rayos paralelos entre sí pero no paralelos al eje; es decir, inclinados.

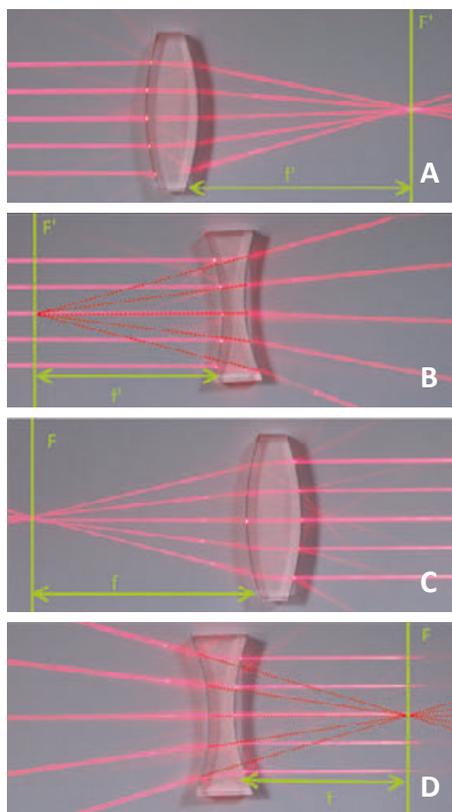
Por otra parte, si la luz incidiera sobre la lente entrando por el lado derecho, el principio de reversibilidad de las trayectorias luminosas conduciría a que un haz de rayos paralelos entre sí y al eje convergería (real o virtualmente) en F y, a su vez, partiendo de F' emergería paralelo.

1 ¿Qué sucede con la potencia de una lente cuando se le da la vuelta?

Lentes convergentes y divergentes

Si la focal imagen de una lente es positiva, un haz de rayos que provenga de un punto en el eje en el infinito pasará realmente por F' , es decir, convergerá hacia este punto. En este caso, a la lente se la denomina «convergente» (Figura 3A).

Por el contrario, si f' es negativa, esos rayos emergerán de la lente divergentes, siendo sus prolongaciones las que apunten hacia F' , que ahora será virtual. En esta situación, a la lente se la denomina «divergente» (Figura 3B).



Figuras 3A, 3B, 3C Y 3D
Focos objeto e imagen de lentes convergentes y divergentes.

Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.

Generalmente, las lentes suelen trabajar inmersas en aire, por lo que será $n_0=1$, en cuyo caso la ecuación 3, teniendo también en cuenta las ecuaciones 5 y 6, quedará como sigue:

$$-1/s+1/s'=(n-1)(1/R_1-1/R_2)=\phi'=1/f' \quad 7$$

De la ecuación 7 se deduce que, para una lente inmersa en aire, su carácter convergente o divergente solo dependerá del signo de sus radios y de su índice de refracción. Así, se puede comprobar que las lentes representadas en la parte superior de la Figura 4 son convergentes, con valores positivos de ϕ' y f' , mientras que las lentes representadas en la parte inferior son divergentes.

Por otra parte, como hemos comentado anteriormente, cuando una lente es muy delgada, su espesor tiende a cero. Por esta razón, la lente se suele representar simplemente con un fino segmento vertical: si la lente es convergente, sus extremos terminarán en dos puntas de flecha hacia fuera; por el contrario, si la lente es divergente, sus extremos terminarán en dos puntas de flecha hacia dentro de la misma (Figura 4).

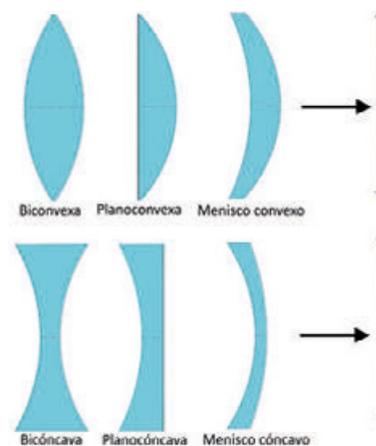


Figura 4
Lentes convergentes, divergentes y su representación en forma de lente delgada.
Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.

No obstante, es importante tener en cuenta que todo lo comentado hasta ahora es válido solo cuando la lente está inmersa en aire. En caso de no ser así, las focales y las potencias de las lentes dependerán de la diferencia $n-n_0$ (Figura 5). Por esta razón, las lentes intraoculares se prescriben con una potencia en aire muy superior a la que realmente van a desarrollar cuando actúen en el interior del ojo. Incluso, una lente convergente en aire puede llegar a ser divergente inmersa en un medio de mayor índice de refracción que el suyo.



Figura 5
Variación del comportamiento de una lente convergente al cambiar el medio que la rodea.
Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.^a Josefa Yzuel Giménez.

Finalmente, en el caso más general de que una lente actúe entre medios de distinto índice de refracción, las ecuaciones 3 y 4 ya no serían de aplicación. Para encontrar la imagen de un objeto determinado dada por la lente, deberían aplicarse las ecuaciones 1 y 2.

Además de las lentes formadas a partir de dioptros esféricos, también son de gran utilidad las denominadas «lentes cilíndricas» (Figura 6), ya que se utilizan mucho como lentes compensadoras de la visión. Como se puede observar, una de sus caras es una superficie cilíndrica, aunque también es usual la combinación en una misma cara de ambas geometrías.

2 Una persona que utiliza gafas, ¿verá bien bajo el agua con ellas puestas?

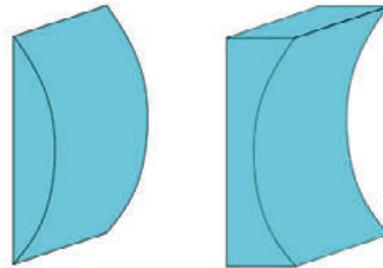


Figura 6
Lente planoconvexa cilíndrica y lente planocóncava cilíndrica.
Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.^a Josefa Yzuel Giménez.

Trazado de rayos

Teniendo en cuenta todo lo visto, vamos ahora a encontrar gráficamente la imagen que producirá de un objeto dado una lente delgada (de la que se conoce la situación de sus focos).

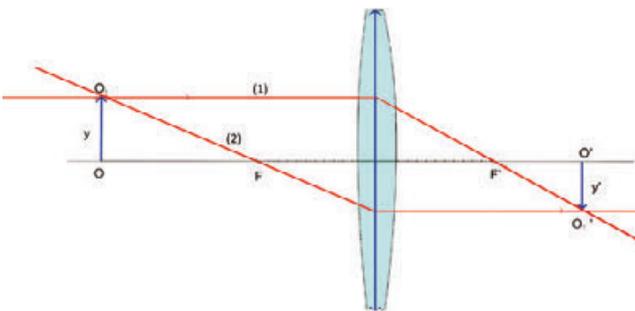


Figura 7
Marcha de rayos para una lente delgada convergente.
Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.^a Josefa Yzuel Giménez.

Para ello, utilizaremos rayos cuyas trayectorias sean conocidas, partiremos de la base de que en óptica paraxial las lentes se comportan como sistemas perfectos (es decir, que todos los rayos que

parten de un punto objeto pasan a la salida de la lente, real o virtualmente, por un punto imagen) y, además, consideraremos que a todo plano objeto perpendicular al eje de la lente le corresponde un plano imagen también perpendicular a dicho eje.

Así, en el caso de una lente convergente (Figura 7) y dado el objeto y , utilizaremos solo dos rayos que incidan sobre la lente, partiendo del vértice superior del objeto O_1 . El rayo (1) será un rayo paralelo al eje, que a la salida de la lente pasará por F' . El rayo (2) saldrá también de O_1 , incidirá sobre la lente pasando por F y emergerá de la lente paralelo al eje óptico.

El punto O'_1 , donde se cortan los rayos, será la imagen de O_1 . Según lo indicado anteriormente, cualquier otro rayo que parta de O_1 , como, por ejemplo, el rayo (3), deberá pasar por O'_1 . El punto O' sobre el eje en la perpendicular al mismo trazada desde O'_1 será la imagen de O , siendo y' la imagen completa del objeto y . En la Figura 8 se presenta esta construcción para el caso de lentes divergentes.

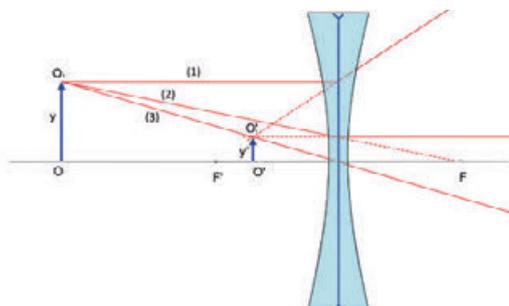


Figura 8

Marcha de rayos para una lente delgada divergente.

Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.

También suele utilizarse, en el caso de lentes delgadas entre medios extremos iguales, un tercer

rayo que incida sobre ellas apuntando hacia su centro óptico y que atraviese la lente sin desviarse. En este caso, coincidirá con V_2 , con V_1 y, por tanto, con el punto de intersección de la lente con el eje.

Estos métodos gráficos son muy útiles, sobre todo si estamos trabajando con sistemas compuestos por varias lentes, ya que nos pueden servir como comprobación cualitativa de los cálculos numéricos realizados al aplicar las ecuaciones anteriores.

3 Obtén gráficamente la marcha de rayos que incidan paralelos entre sí y que no sean paralelos al eje óptico.

Asociaciones de lentes

Las lentes suelen asociarse para formar sistemas compuestos que se caracterizan por sus focales y por sus potencias. La combinación de las lentes integrantes se puede considerar un sistema único. La focal y la potencia imagen para un sistema de dos lentes delgadas, trabajando en aire y separadas a una distancia d entre sus centros ópticos, o t entre el foco imagen de la primera y el foco objeto de la segunda, vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

$$f = (f_1 f_2) / (f_1 + f_2 - d) = -(f_1 f_2) / t \quad 8$$

$$\phi' = \phi_1 + \phi_2 - d \phi_1 \phi_2 \quad 9$$

Si en la asociación existieran más lentes, en pasos sucesivos se irían reduciendo. De la ecuación 9 se deduce que, si las dos lentes están unidas, la potencia del conjunto vendrá dada por la suma de las potencias de las dos lentes. Por tanto, en general, para varias lentes unidas, consideraremos la siguiente ecuación:

$$\phi' = \sum \phi_i \quad 10$$

Posteriormente utilizaremos estas ecuaciones que acabamos de indicar.

Aberraciones en las lentes

Todo lo comentado hasta ahora tiene validez dentro del ámbito paraxial, donde los sistemas se comportan como perfectos; pero, cuando nos apartamos de este dominio y los ángulos toman valores superiores, las lentes dejan de comportarse como sistemas perfectos. Si esto sucede, la imagen que producen de un punto deja de ser un punto para ser una mancha de luz, la imagen de un plano será una superficie curva y la imagen de una figura será otra figura distorsionada. Estas son las denominadas «aberraciones geométricas».

Pero, es más, aun suponiendo que trabajamos en óptica paraxial, la focal y la potencia de las lentes

dependerán de su índice de refracción (ecuación 5). A su vez, este índice dependerá de la longitud de onda de la luz con la que se trabaje (como veíamos en el capítulo anterior), que, generalmente, no es monocromática, sino blanca, es decir, compuesta por la asociación de luces monocromáticas para cada una de las cuales la lente presentará un índice de refracción distinto y, por ello, distinta potencia. Por esta razón, se formarán imágenes de distinto color, posición y tamaño, y, por consiguiente, en las imágenes aparecerán contornos coloreados. Este fenómeno se denomina «aberración cromática».

Con el objetivo de eliminar, o al menos minimizar, tanto las aberraciones geométricas como las aberraciones cromáticas, en la práctica se llevan

a cabo asociaciones de lentes que consiguen este propósito en mayor o menor grado, según las exigencias de cada caso.

Instrumentos ópticos

En general, se entiende por «instrumento» todo dispositivo que permite realizar una tarea en condiciones más ventajosas que cuando no se dispone del mismo, posibilitándonos ampliar el límite de nuestras capacidades naturales de actuación o de observación, con el objetivo de mejorar los resultados que se obtienen. Cuando la luz participa y juega un papel preponderante en las tareas que debemos realizar, se denomina «instrumento óptico» al dispositivo utilizado.

Por tanto, los instrumentos ópticos se diseñan y utilizan para tratar de conseguir las aspiraciones del ser humano a la hora de registrar con carácter permanente la información visual que recibe del exterior (con instrumentos fotográficos), ver lo que no le permite su sentido de la vista con un registro transitorio (con microscopios, prismáticos, telescopios...), reproducir información de la que se disponga (con instrumentos de proyección), tratar de analizar y registrar la composición espectral de la luz que recibe (con espectrógrafos), etcétera.

En lo que a observación directa se refiere, el ser humano siempre ha tenido la aspiración de tratar de «ver lo que no se puede ver», «ver cuando no se puede ver» y «ver donde no se puede ver» en condiciones normales.

En este sentido, se considera que no se pueden ver con detalle los objetos muy pequeños, aunque estén cercanos al ojo, ni los objetos muy lejanos, aunque sean grandes. Para conseguir verlos a pesar de la imposibilidad establecida por la naturaleza del ojo humano, se diseñaron los microscopios y los telescopios, respectivamente.

Asimismo, se considera que el ojo humano no puede ver aquellos objetos que no emiten radiación suficiente como para estimular el mecanismo visual ni aquellos en que la radiación que emiten no sea visible, por lo que, para conseguirlo, se

diseñaron los intensificadores y convertidores de imagen.

Finalmente, se considera que no se pueden ver los objetos «ocultos», es decir, aquellos que aunque emitan, reflejen o transmitan luz, esta no llega directamente a nuestro ojo e, incluso, puede ser que ni siquiera la emitan o no estén iluminados. Para conseguir ver estos objetos, se diseñaron los endoscopios (con o sin sistema de iluminación).

En todos estos instrumentos ópticos, las lentes forman parte esencial de los mismos, de ahí el interés de su estudio y de la aplicabilidad de las mismas.

En general, los instrumentos ópticos suelen clasificarse en dos grandes grupos: los instrumentos denominados «objetivos» y los «subjettivos». Los primeros forman imágenes reales de lo que se pretende registrar o reproducir para, posteriormente, ser analizadas por el ojo humano u otros receptores. En cambio, en los instrumentos «subjettivos», el ojo humano recoge directamente la imagen que producen, por lo que se considera parte integrante de los mismos; entre ellos están los microscopios, los telescopios, etcétera.

Cabe destacar que últimamente se están desarrollando enormemente, con logros espectaculares, instrumentos en los cuales se combinan técnicas ópticas y electrónicas: son los denominados «instrumentos optoelectrónicos», entre los que se encuentran los intensificadores.

En cualquier caso, la mayor parte de los instrumentos ópticos tienen como finalidad ayudar al ojo humano en el desarrollo de sus funciones visuales. Por ello, para entender su diseño y funcionamiento en toda su extensión, es necesario estudiar también las características del ojo humano (que puede considerarse un instrumento formador de imágenes constituido por la asociación de lentes que separan medios de distinto índice de refracción).

Por esta razón, aunque posteriormente dedicaremos un capítulo específico al estudio del ojo, daremos aquí unas nociones básicas que nos

permitirán entender el diseño de los instrumentos ópticos fundamentales y la utilización de lentes para la compensación de problemas visuales.

El ojo como sistema óptico

El ojo humano tiene una forma aproximadamente esférica de 2,5 cm de diámetro, aunque en su parte anterior posee una prominencia de mayor curvatura que está recubierta por una membrana transparente con forma de lente convexo-cóncava denominada «córnea» (Figura 9). Detrás de la córnea se encuentra el cristalino, una masa transparente con forma de lente biconvexa. El cristalino está sujeto por unos ligamentos a los denominados «músculos ciliares», los cuales pueden hacer variar la curvatura de las caras del cristalino.

En la parte posterior del ojo se encuentra la retina, una película de fibras nerviosas terminadas en unas estructuras sensibles a la luz llamadas «fotorreceptores». La retina recibirá los rayos de luz de las imágenes exteriores que le envía el conjunto córnea-cristalino como sistema convergente. Y, posteriormente, también será la encargada de transformar la información luminosa

en impulsos eléctricos y de transmitirla, por medio del nervio óptico, al cerebro.

Las imágenes recibidas pueden corresponder a objetos que estén a distintas distancias del ojo, lo que se consigue gracias a la variación de la potencia del cristalino por la acción del músculo ciliar, proceso que se denomina «acomodación». Por la contracción de dicho músculo, el cristalino cambia su forma, varían sus radios, aumentando su capacidad de refracción (ecuación 7), y se hace más esférico, aumentando su capacidad de refracción para enfocar objetos más cercanos.

Las distancias más lejana y más próxima a las que el ojo es capaz de formar imágenes de forma nítida sobre la retina se denominan «punto remoto»

(P_r) y «punto próximo» (P_p), respectivamente. Para un ojo normal, el punto remoto se encuentra en el infinito y el punto próximo, en promedio, a unos 25 cm del ojo, aunque este último varía mucho con la edad.

Un ojo con potencia normal se denomina «emélope» y formará, sin esfuerzo de acomodación, la imagen del plano del infinito sobre su retina y, con proceso de acomodación, la de su punto próximo. Pero existen también ojos «amétropes», cuya potencia o tamaño pueden diferir de los valores normales. Este es el caso de los ojos «miopes», que presentan exceso de potencia o de tamaño, y el de los ojos «hipermétropes», que presentan defecto de potencia. En ambos casos se presentan dificultades para observar los objetos a determinadas distancias. Por último, existe además otro **defecto de refracción o ametropía**, el «astigmatismo», derivado de la falta de simetría de revolución en el ojo de algunas personas, lo que provoca que su potencia varíe en función del plano meridiano en el que le incida la luz.

Compensación de ametropías

Una de las aplicaciones más comunes de las lentes es su utilización como elementos compensadores de ametropías, lo que se consigue anteponiendo estas al ojo mediante gafas, lentes de contacto o lentes intraoculares, para conseguir, así, que la potencia del conjunto sea la adecuada (lo que se verá con detalle en el capítulo 9).

4 Las lentes de contacto, ¿deben tener más potencia o menos que la potencia prescrita para gafas? (Recuerda lo visto anteriormente para asociación de lentes y la ecuación 9).

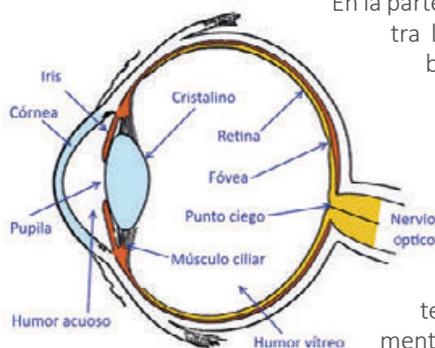


Figura 9

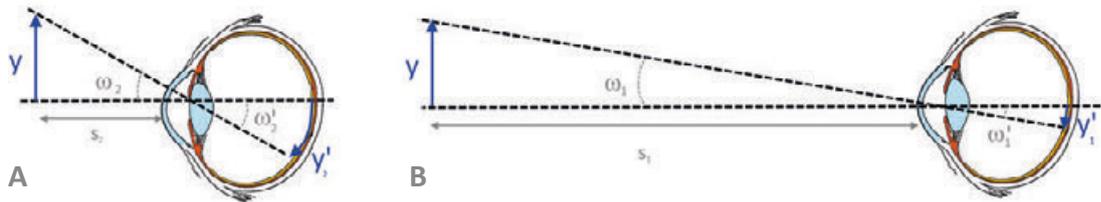
Esquema de las principales partes del ojo humano.

Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.

Tamaño de las imágenes retinianas

El tamaño subjetivo de los objetos que observamos depende del tamaño de las imágenes que de los mismos se forman en la retina, es decir, del ángulo bajo el cual son observados por el ojo. Cuanto mayor sea la imagen retiniana, mayor será la posibilidad de observar detalles del objeto, ya que el número de fotorreceptores estimulados será también mayor. Asimismo, para un objeto dado,

cuanto mayor sea la imagen retiniana del mismo, mayor sensación de proximidad a él tendremos. En las Figuras 10A y 10B puede observarse que el tamaño de la imagen retiniana de un objeto dado depende de la distancia del objeto al ojo. Por esta razón, cuando deseamos observar detalles en un objeto, nos acercamos todo lo posible al mismo, aunque tendríamos como límite el punto próximo (P_p).



Figuras 10A y 10B

Variación del tamaño de la imagen retiniana de un mismo objeto al cambiar la distancia a la que se observa. Figura 10A. Menor distancia. Figura 10B. Mayor distancia.

Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.

Microscopios

A continuación, se muestran las características de un microscopio simple y de un microscopio compuesto.

Microscopio simple o lupa

Si deseamos observar detalles de un objeto pequeño, pero, tras acercarnos lo máximo posible, habiendo alcanzado el punto próximo del observador, no conseguimos ver en él los detalles deseados, podemos ayudarnos de un microscopio simple, una lupa o una lente de aumento.

Para ello, colocaremos el objeto que queremos observar con mayor detalle dentro de la distancia focal objeto de una lente convergente, que, en estas circunstancias, dará de él una imagen virtual, derecha y mayor que el objeto real (Figura 11B), con lo cual se conseguirá observarlo bajo mayor ángulo que a ojo desnudo (Figura 11A). Como es lógico, para poder observar esta imagen es necesario que la misma se forme más allá del P_p del ojo del observador, es decir, a $-0,25$ m o más de este supuesto normal.

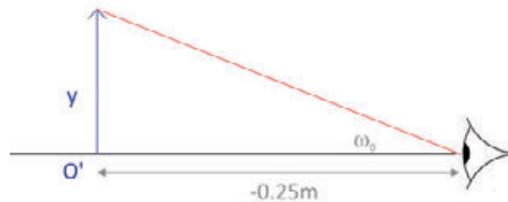


Figura 11A

Observación de un objeto a ojo desnudo.

Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.

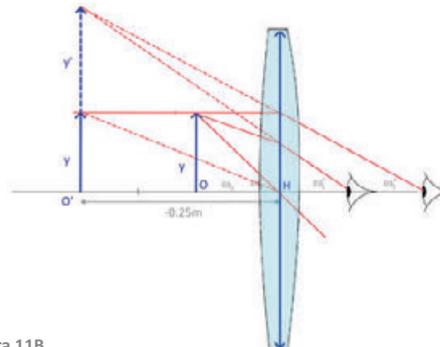


Figura 11B

Esquema de funcionamiento de un microscopio simple o lupa.

Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.

Para cuantificar este aumento de tamaño aparente, se define lo que se conoce como «aumento visual del instrumento» (lupa, en este caso) en la forma:

$$\Gamma' = \text{tg } \omega' / \text{tg } \omega \quad 11$$

Siendo ω' el ángulo bajo el cual se observa el objeto con instrumento, es decir, a su imagen, y ω aquel ángulo bajo el cual se observa a ojo desnudo en las condiciones más favorables, es decir a una distancia de $-0,25$ m.

Como se puede observar en la Figura 11B, el ángulo ω' , y, por tanto, el aumento de la lupa, depende de las posiciones del ojo y del objeto respecto de la lupa, y, además, siempre hemos de asegurar que la imagen se forma a una distancia mínima de $-0,25$ m del ojo. Para evitar esta ambigüedad, se sitúa el objeto a observar en el plano focal objeto de la lupa, con lo cual la imagen que la misma dará de él se encontrará en el infinito (Figura 12).

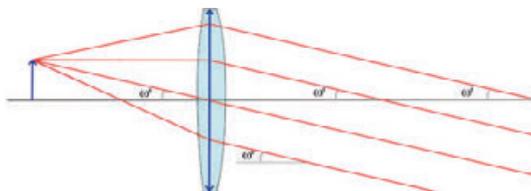


Figura 12
Marcha de rayos de una lupa cuando el objeto se sitúa en el plano focal (todos los rayos emergen paralelos).
Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.

Operando en estas condiciones, se consiguen tres cuestiones muy importantes:

- 1 Que el ángulo ω' sea siempre el mismo, independientemente de la situación del ojo del observador.
- 2 Que la imagen, al estar en el infinito sobre el punto remoto, pueda ser observada sin necesidad de acomodación por parte del ojo y, por ello, de forma relajada.

- 3 Que el aumento visual de la lupa quede especificado, al ser $f' = f$, sin ambigüedad:

$$\Gamma' = (-y/f') / (y/-0,25) = 0,25/f' = 0,25 \phi' = \phi'/4 \quad 12A$$

En estas ecuaciones, la focal debe expresarse en metros y la potencia, en dioptrías.

Del análisis de la ecuación 12 se puede concluir que la potencia mínima que ha de tener una lente convergente para que pueda ser utilizada eficazmente como lupa ha de ser de $+4$ dioptrías o más, ya que, si fuese inferior, el aumento sería menor que la unidad, lo que «parece» no tener sentido. Por otro lado, también se deduce que el aumento de una lupa depende no solo de su potencia, sino también de quién la utilice, es decir, de dónde esté el punto próximo del usuario. De hecho, la ecuación 12A vista anteriormente, debería expresarse de la siguiente forma:

$$\Gamma' = P_p / f' \quad 12B$$

Para establecer el aumento comercial normalizado de las lentes empleadas como lupas, se utilizan estas fórmulas.

En cualquier caso, si un observador emétrope utiliza una lente de $+4$ dioptrías como lupa, aunque esta no presente ventaja en lo que al aumento se refiere, sí que por lo menos implica una observación relajada, sin acomodación, en comparación con la observación a ojo desnudo del objeto situado en el P_p del observador.

En la práctica, las lupas se construyen con aumentos comerciales que oscilan entre $2,5x$ y $25x$. En el caso de valores altos de aumento, las lupas se construyen asociando lentes para corregir aberraciones.



Figura 13
Ejemplos de lupas comerciales.

Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.

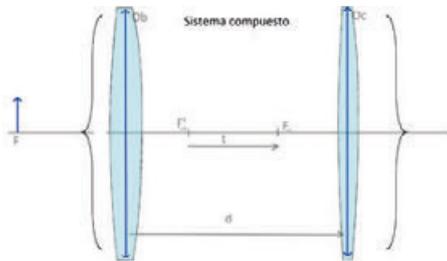
5 Comprueba que el aumento de la lupa es independiente de dónde se sitúe el objeto, siempre y cuando esté dentro de su distancia focal objeto, si el ojo del observador se sitúa en su plano focal imagen.

Microscopio compuesto

Al analizar la ecuación 12, vemos que para conseguir grandes aumentos es necesario que la focal de la lente que se utilice como lupa sea muy pequeña o, lo que es lo mismo, que su potencia sea muy grande. No obstante, esto tiene sus limitaciones, ya que potencias muy altas de las lentes implican, según se desprende de la ecuación 3, tamaños de lentes muy pequeños y aberraciones muy grandes, lo que las haría inútiles.

Una forma de conseguir grandes aumentos evitando estos problemas consiste en utilizar un sistema compuesto por dos lentes convergentes separadas por una cierta distancia, considerando al sistema compuesto por ambas como una lupa que operará con el objeto a observar colocado en el plano focal del sistema (Figura 14). Este conjunto se conoce como «microscopio compuesto» y, en él, se denomina «objetivo» (*Ob*) a la lente más próxima al objeto y «ocular» (*Oc*) a la lente más cercana al ojo.

Figura 14
Esquema de un microscopio compuesto.
Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.



El aumento de este microscopio vendrá dado por la ecuación 12, donde f' será ahora la focal del sistema compuesto expresada en metros y ϕ' será su potencia expresada en dioptrías. La focal imagen de este microscopio compuesto se calculará a partir de la ecuación 8 y se expresará de la forma siguiente:

$$f' = -f'_1 \cdot f'_2 / t = -f'_{ob} \cdot f'_{oc} / t \quad 13$$

En la ecuación 13, t es la distancia desde el foco imagen del objetivo al foco objeto del ocular, por lo que el aumento del microscopio compuesto vendrá dado por la siguiente expresión:

$$\Gamma' = 0,25 / f' = -(t / f'_{ob}) \cdot (0,25 / f'_{oc}) \quad 14$$

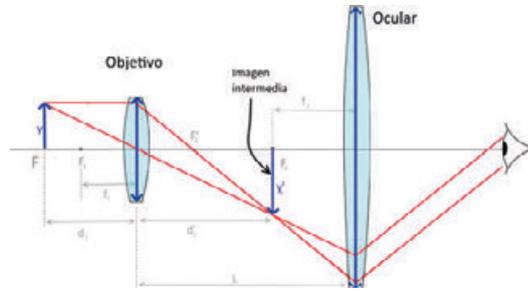


Figura 15
Formación de imágenes en un microscopio compuesto.

Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.

La ecuación 14 nos dice que el aumento del microscopio depende de dos factores. Uno es el aumento del ocular (*Oc*) actuando como lupa, lo que indica que el objeto y' para esta lente debe estar situado en su plano focal objeto y será la imagen que del objeto inicial y haya dado el objetivo (*Ob*); con lo cual, la imagen final producida por el sistema compuesto se formará en el infinito y podrá ser observada sin esfuerzo de acomodación, aunque, según nos indica el signo negativo de la ecuación 14, será invertida, ya que en ella todas las distancias son positivas (Figura 15). La imagen real que el *Ob* produce del objeto que se analiza es invertida y, de hecho, la relación $-t/f'_{ob}$ nos dará el aumento lateral del objetivo, es decir:

$$\beta'_{ob} = y' / y = -t / f'_{ob} \quad 15$$

Con todo lo visto anteriormente, concluimos que el aumento del microscopio compuesto se puede expresar como:

$$\Gamma' = \beta'_{ob} \cdot \Gamma'_{oc} \quad 16$$

Los objetivos y los oculares de los microscopios se fabrican de forma que sean intercambiables, por lo que su aumento se especifica por medio de un asa seguida o precedida de un número (que cuantifica su aumento). Así, por ejemplo, un objetivo de 40 aumentos se simboliza como x40 o 40x, y un ocular de 10 aumentos como x10 o 10x.

El hecho de que la imagen final esté aquí invertida no presenta gran importancia, ya que, al tratarse de objetos accesibles, siempre será posible adaptarlos o cambiarlos hasta que se encuentre la opción más adecuada.

En la práctica, el microscopio compuesto se construye montando sobre un tubo rígido tanto el objetivo como el ocular, separados ambos por una distancia d . Para utilizarlo, se desplaza el conjunto, mediante un mecanismo denominado «dispositivo de enfoque», hasta que el objeto a observar quede situado sobre el plano focal objeto del sistema compuesto (Figura 16). En realidad, ni los objetivos ni los oculares son lentes simples, sino que están formados por asociaciones de lentes con el fin de minimizar las aberraciones. Los objetivos para microscopios ópticos suelen tener entre 4 y 100 aumentos, mientras que en los oculares su aumento no suele ser superior a 20. Al utilizar un microscopio, se trabaja con objetos muy pequeños, por lo que emitirán, transmitirán o reflejarán poca luz, y, de esta, la que capta el microscopio, ha de repartirse en una imagen mucho más



Figura 16

Fotografía de un microscopio con indicación de cada una de sus partes.

Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.

Telescopios

A continuación se muestran las características de un telescopio astronómico y de un anteojito terrestre.

Telescopio astronómico

Cuando se trata de observar objetos muy lejanos y, por ello, inaccesibles, el planteamiento es diferente a lo visto hasta ahora, ya que, entre otras cuestiones, los objetos ahora se observan a ojo desnudo sin necesidad de acomodación. Por ello, será necesario un dispositivo que nos permita

observarlos en esas condiciones pero bajo un mayor ángulo aparente, a fin de conseguir que su imagen en nuestra retina sea mayor y poder distinguir en ella más detalles que directamente sobre el objeto a ojo desnudo.

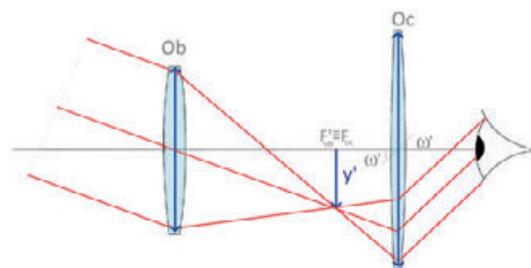


Figura 17

Esquema de funcionamiento de un telescopio o anteojito astronómico.

Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.

Para lograr este objetivo se utiliza el llamado «telescopio» o «anteojito astronómico» (Figura 17), que está formado por dos sistemas convergentes denominados «objetivo» (Ob) y «ocular» (Oc), de igual forma que en el microscopio, pero que en este caso están dispuestos de diferente forma. En un telescopio, la imagen real dada por el objetivo $Ob \cdot y'$ de los objetos muy lejanos se formará en su plano focal imagen, por lo que, a su vez, se hace coincidir este con el plano focal objeto del ocular, constituyendo y' el objeto para el mismo. En estas condiciones, el ocular actúa también como una lupa enviando la imagen final al infinito, por lo que podrá ser analizada por el ojo sin necesidad de esfuerzo de acomodación. El ángulo bajo el cual un observador puede ver los objetos sin instrumento será el ω de la Figura 17, mientras que con él será un ángulo ω' , mayor que el ω (aunque la imagen aparecerá invertida, como se observa en la Figura 17, al ser ω y ω' de distinto signo).

El aumento visual de este telescopio vendrá dado por la ecuación:

$$\Gamma = \frac{\omega'}{\omega} = \frac{y'/f_{oc}}{(y'/f'_{ob})} = -\frac{f'_{oc}}{f'_{ob}} \quad 17$$

donde el signo negativo nos indica, de nuevo, que la imagen final está invertida, ya que las distancias focales imagen son positivas al tratarse de lentes convergentes.

Anteojo terrestre

En el caso de los telescopios, la imagen final invertida sí que es un problema para la observación, ya que al tratarse de objetos no accesibles, es imposible adaptarlos adecuadamente, siendo necesario utilizar procedimientos que muestren la imagen derecha. Se trata de los denominados «sistemas enredzadores de imagen». Este propósito se puede conseguir introduciendo entre el objetivo y el ocular una o –como es usual para evitar aberraciones– dos lentes convergentes, lo que se llama «sistema o par inversor», que será el encargado de invertir la imagen intermedia (Figura 18). A este dispositivo se lo denomina «anteojo terrestre».

Al observar la Figura 18, se puede apreciar que un anteojo terrestre es, en realidad, un acoplamiento de dos sistemas telescópicos. El aumento del mismo vendrá dado por la ecuación:

$$\Gamma' = \Gamma'_1 \cdot \Gamma'_2 = (f'_{ob}/f'_{oc}) \cdot (f'_b/f'_a) \quad 18$$

El propósito de invertir la imagen se puede conseguir también utilizando como ocular una lente

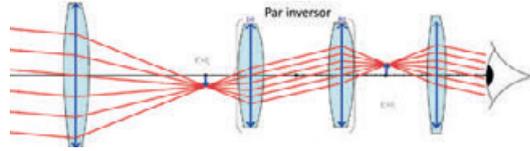


Figura 18
Marcha de rayos en un anteojo terrestre y detalle del sistema inversor.

Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.

divergente, obteniéndose entonces el denominado «anteojo de Galileo», o bien introduciendo entre objetivo y ocular prismas apropiados, lo que conduciría a los denominados «prismáticos».

Por otra parte, es muy frecuente dotar a los sistemas telescópicos con objetivos de espejo (objetivos catadióptricos). El telescopio completo formado en este caso sería un **sistema catadióptrico**.

Con frecuencia, los anteojos se utilizan también para la observación de objetos relativamente cercanos, por lo que la imagen que el objetivo dará de ellos ya no se formará en su plano focal objeto y será necesario desplazar el ocular para que esta imagen se sitúe sobre su plano focal objeto y actúe, así, como una lupa. Este procedimiento se conoce como «mecanismo de enfoque», aunque solo requiere el desplazamiento del ocular.

Instrumentos ópticos de registro: la cámara fotográfica

La cámara fotográfica es un instrumento destinado a formar una imagen real de un objeto (que generalmente está alejado de la persona) sobre un dispositivo sensible a la luz que puede ser una placa fotográfica o un dispositivo optoelectrónico CCD, con el fin de que la misma quede registrada en este. De forma más sencilla, podemos decir que se trata de un instrumento destinado al registro de información visual. La componente óptica

de este instrumento la constituye un sistema convergente, al que se denomina «objetivo», que está formado por una lente simple o varias lentes acopladas para corregir aberraciones (Figuras 19A y 19 B).

En estos sistemas, la porción de objeto que se puede registrar viene determinada por el tamaño del dispositivo sensible a la luz, D , así como por la focal imagen del objetivo, f , y se expresa, para objetos lejanos, en función del ángulo ω , según la ecuación:

$$\operatorname{tg} \omega = D/f' \quad 19$$

Por tanto, si la focal del objetivo es muy larga, en el dispositivo sensible se registrará la imagen de una pequeña parte del plano objeto que queremos registrar, lo que nos permitirá reproducirla

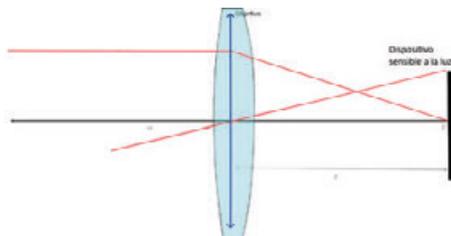


Figura 19A
Esquema de los componentes ópticos de una cámara fotográfica.
Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.



Figura 19B
Cámaras fotográficas: pieza de museo junto a una cámara fotográfica actual.
Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.

con detalle; a estos objetivos de focal larga se los denomina «teleobjetivos». Por el contrario, si la focal del objetivo es corta, sobre la placa se registrará una gran parte del plano objeto, aunque no se podrán observar detalles. A estos objetivos se los denomina «grandes angulares». Entre otros usos, los teleobjetivos se utilizan mucho para

realizar fotografía de retrato y los grandes angulares, para fotografías de paisajes.

Por otra parte, al acercar la cámara fotográfica y el objeto a registrar, será necesario desplazar el objetivo, o el mecanismo de enfoque, hasta conseguir que la imagen del objeto se forme correctamente con la nueva distancia.

Instrumentos ópticos de reproducción: proyectores

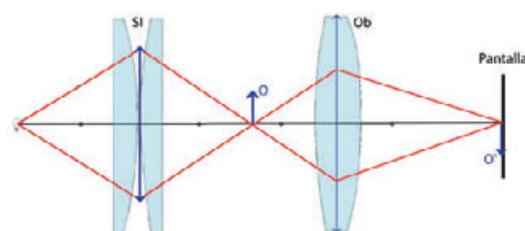


Figura 20
Esquema de un proyector de vistas fijas.
Fuente: Luis Gómez Robledo, Enrique Hita Villaverde, Miguel Ángel Martínez Domingo y M.ª Josefa Yzuel Giménez.

Un proyector es un instrumento destinado a reproducir sobre una pantalla una imagen muy grande de un objeto pequeño, generalmente con el fin de que pueda ser vista por muchos observadores simultáneamente. La parte óptica de estos proyectores la constituye, de nuevo, un sistema convergente llamado también «objetivo». Entre los proyectores más usuales están los de vistas fijas (Figura 20), también denominados «proyectores de diapositivas o de transparencias», y los de cinematografía,

que, en esencia, son los mismos, pero que proyectan una secuencia temporal de imágenes con el fin de obtener sensación de movimiento.

Para esta proyección, se parte de un objeto pequeño, pero, en cambio, la luz que se emite, transmite o refleja ha de repartirse en una imagen muy grande, por lo que se hace necesario emplear sistemas apropiados de iluminación del objeto (SI), los cuales suelen formar parte integrante del propio dispositivo. El procedimiento de iluminación que puede observarse en la Figura 20 se conoce como «**iluminación crítica**» y se utiliza en cinematografía, pero presenta algunos inconvenientes que no lo hacen eficaz para otros tipos de proyección. Por ello, se utilizan otros tipos de iluminación alternativos para la proyección de vistas fijas, como es el **sistema de iluminación Köhler**.

BIBLIOGRAFÍA

- Begunov, B. N.; Zakaznov, N. P.; Kiryushin, S. I., y Kuzichev, V. I. (1988): *Optical Instrumentation*. MIR (Moscú).
- Burcher, J. (1967): *Les combinaisons optiques*. Masson & Cie-Editions de la revue d'optique théorique et instrumentale.
- Casas, J. (1994): *Óptica*. Universidad de Zaragoza.
- Catalá, J. (1979): *Física*. Cometa.
- Ditchburn, R. W. (1982): *Óptica*. Reverté.
- Jiménez-Landi, P. (1985): *Introducción al estudio de los instrumentos ópticos*. Universidad Complutense de Madrid.
- Millán, M. S.; Escofet, J., y Pérez, E. (2004): *Óptica geométrica*. Ariel Ciencia.
- Mouroulis, P. y Macdonald, J. (1997): *Geometrical Optics and Optical Design*. Oxford University Press.
- Romero, J.; García, J. A., y García, A. (1996): *Curso introductorio a la óptica fisiológica*. Comares.
- Sears, F.; Zemansky, M.; Young, H., y Freedman, R. (2009): *Física universitaria* (volumen 2). Addison-Wesley.



Capítulo 5

Polarización de la luz

Ignacio Moreno Soriano

Introducción

Las ondas transversales, como es el caso de las ondas electromagnéticas, presentan propiedades de polarización. Este tipo de fenómenos no existe en las ondas longitudinales, al igual que en las ondas sonoras. En las ondas transversales, dado que la oscilación se produce en dirección perpendicular a la de propagación de la onda, está contenida en un plano transversal y puede tener cualquier orientación dentro de dicho plano.

En el caso de la luz visible, las propiedades de polarización se pueden observar mediante elementos como las láminas polarizadoras que se usan, por ejemplo, en la fabricación de gafas polarizadas

o para producir los conocidos dispositivos de visualización de imágenes de cristal líquido (pantallas LCD, *liquid crystal displays*) que encontramos en monitores de televisión, de ordenador o en pantallas de tabletas y teléfonos. También se emplean en algunos de los modernos sistemas de imagen 3D.

En este capítulo se introducen algunos de estos fenómenos, relacionados con la polarización de la luz, que podemos encontrar en diversos fenómenos naturales y en gran cantidad de dispositivos electrónicos.

Luz natural y luz polarizada

Para iniciar este capítulo, será importante comprender la diferencia entre la luz no polarizada, o luz natural, y la luz polarizada. Para, posteriormente, poder apreciar esta diferencia, en primer lugar vamos a ver algunos ejemplos de diferentes ondas electromagnéticas con diversos estados de polarización.

Las ondas transversales tienen la característica de que la dirección de propagación es perpendicular a la dirección en que se produce la oscilación. Por tanto, esta oscilación puede producirse en cualquier dirección dentro del plano perpendicular al

vector de onda k , que indica la dirección de propagación de la onda.

La Figura 1 representa tres ejemplos de ondas con diferentes estados de polarización. Dado que el campo magnético H es siempre perpendicular al campo eléctrico E , se suele representar únicamente este último. Los tres casos que se muestran corresponden a ondas que viajan en dirección z , por tanto, el vector campo eléctrico está contenido en el plano x - y , perpendicular a esta dirección. Las líneas de color azul corresponden a las trayectorias reales que sigue el vector campo eléctrico, a medida que se propaga, para cada uno de los casos. Su proyección sobre el plano x - y aparece dibujada en color morado y representa una figura geométrica en dicho plano que adopta, de manera general, la forma de una elipse, aunque en situaciones particulares puede colapsar a una línea o a un círculo. La Figura 1 muestra también las componentes x e y del campo eléctrico –en verde y en rojo, respectivamente–, ambas con la forma de una onda armónica de igual frecuencia y longitud. Dependiendo de la relación de fase y de amplitudes de estas componentes, se obtendrán los distintos estados de polarización.

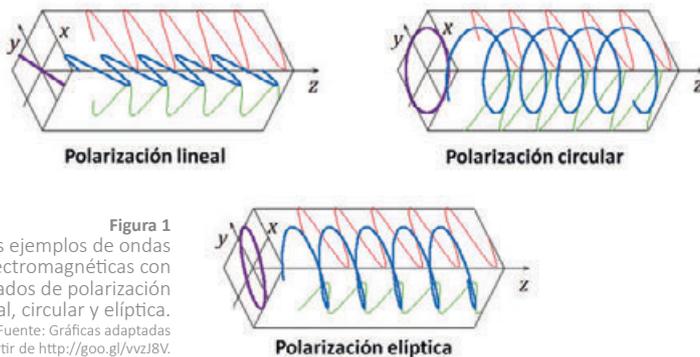


Figura 1
Tres ejemplos de ondas electromagnéticas con estados de polarización lineal, circular y elíptica.
Fuente: Gráficas adaptadas a partir de <http://goo.gl/vvzj8V>.

En el primer caso, en la figura superior izquierda, podemos ver la representación de una onda linealmente polarizada. Esta situación se produce cuando las dos componentes x - y del campo eléctrico están en fase, es decir, que los máximos y mínimos de las dos componentes coinciden en el tiempo y en el espacio. En este caso, la proyección sobre el plano x - y de la trayectoria del campo eléctrico define una línea.

En el segundo caso, en la figura superior derecha, se representa una onda circularmente polarizada. Esta situación ocurre cuando las dos componentes del campo eléctrico tienen igual amplitud y viajan en cuadratura, es decir, que hay una diferencia de fase de $\pm 90^\circ$ entre ellas. En este caso, la proyección sobre el plano x - y de la trayectoria del campo eléctrico define un círculo.

Finalmente, en el tercer caso, la figura de la parte inferior muestra la situación general que se produce para valores arbitrarios de las fases y amplitudes de las dos componentes del campo eléctrico, que corresponde a una onda elípticamente polarizada, ya que la proyección sobre el plano x - y de la trayectoria del campo eléctrico proporciona en este caso la figura de una elipse.

Por otra parte, si observamos una fuente de luz ordinaria, veremos que tiene un gran número de emisores atómicos orientados al azar. Cada átomo excitado emite un tren de ondas linealmente polarizado durante un tiempo de aproximadamente 10^{-8} segundos. Sin embargo, se están emitiendo constantemente nuevos trenes de onda, y el estado de polarización cambia continuamente de forma impredecible. Si estos cambios tienen lugar tan rápidamente que es imposible distinguir cualquier estado de polarización, esta luz se conoce como luz no polarizada o luz natural. Por el contrario, la luz polarizada mantiene una relación

constante de la orientación del campo eléctrico entre los distintos trenes de onda que constituyen el haz de luz. Puede verse esquematizada esta diferencia en la Figura 2, donde se representan la orientación del vector de onda k , el campo eléctrico E y el campo magnético H en un instante dado.

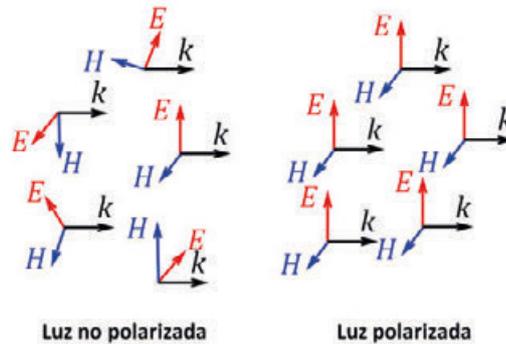


Figura 2
Haz de luz representado esquemáticamente para luz no polarizada (luz natural) y luz polarizada.
Fuente: Ignacio Moreno Soriano.

Las fuentes de luz habituales emiten luz no polarizada. Por el contrario, los láseres suelen emitir luz polarizada (aunque también existen algunos láseres con luz no polarizada). Sin embargo, como resultado de la propagación a través de diversos medios y de los fenómenos de refracción y reflexión en superficies, la luz no polarizada puede perder aleatoriedad y, de forma análoga, también la luz polarizada puede despolarizarse. Atendiendo a estos posibles cambios, se establece un grado de polarización que indica cuán polarizada es la luz: es el cociente entre la intensidad de luz polarizada y la intensidad total del haz de luz. Así, un grado de polarización=0 indica una luz completamente despolarizada, mientras que un grado de polarización=1 indica un haz de luz totalmente polarizado.

Polarización de la luz por dicroísmo

La forma habitual de polarizar la luz es mediante un filtro polarizador lineal. Sencillamente, se trata de un filtro óptico que convierte la luz no

polarizada que entra en luz linealmente polarizada a la salida. La forma más habitual de producir este efecto es mediante el fenómeno conocido

como «dicroísmo», esto es, la absorción selectiva preferente de una componente del campo eléctrico paralela al eje del material y que transmite la componente perpendicular.

El fenómeno del dicroísmo se da de forma natural en algunos cristales, como la **turmalina** o la **herapatita**. No obstante, el dicroísmo de la turmalina es muy dependiente de la longitud de onda, lo que hace que aparezcan colores, y en la herapatita es muy difícil obtener cristales de tamaños apreciables. Todo esto hace que, en la práctica, no se empleen como polarizadores, sobre todo desde la invención de las láminas de polaroide, patentadas inicialmente por Edwin Herbert Land en 1929.

Algo de historia

Edwin Herbert Land (1909-1991) fue un científico e inventor estadounidense, cofundador de la empresa Polaroid Corporation.

Entre otros desarrollos, inventó métodos para fabricar láminas de filtros polarizadores de bajo coste: los denominados «polaroides» o «láminas de polaroide».

También es conocido por desarrollar un sistema de cámara fotográfica instantánea, la cámara Polaroid. Esta cámara, que salió al mercado en 1948, permitía revelar una fotografía en menos de 60 segundos.



Figura 3
Cámara Polaroid con foto de Edwin Herbert Land.
Fuente: Álbum, akg-images.

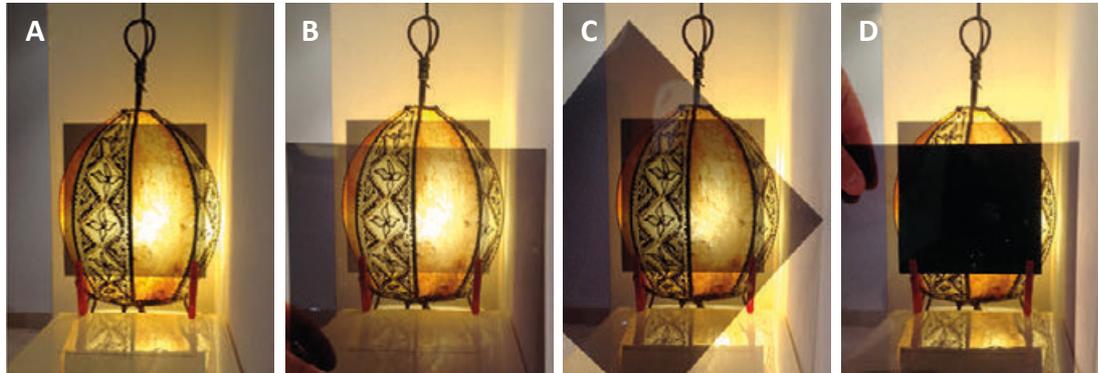
Las denominadas «láminas H», desarrolladas por Land, son láminas de **polímero alcohol polivinilo (PVA)** impregnado de yodo. Durante su fabricación, el polímero se alinea formando largas cadenas moleculares paralelas entre sí que, gracias al dopante de yodo, actúan como **rejillas conductoras**. El resultado es un dicroísmo artificial que produce que la lámina actúe como un polarizador lineal.

Este fenómeno es equivalente a la escala de las longitudes de onda visibles, como la polarización de las ondas electromagnéticas en el rango de

microondas mediante una rejilla de alambres metálicos. La luz no polarizada incidente en la rejilla está compuesta por trenes de ondas electromagnéticas cuyo campo eléctrico está igualmente repartido en todas las orientaciones en el plano perpendicular a la propagación. La componente paralela a los alambres induce oscilaciones de los electrones libres en el metal y es fuertemente absorbida. Por el contrario, la componente del campo eléctrico en dirección perpendicular a los alambres metálicos no sufre esta absorción y es, en gran medida, transmitida. El resultado es una lámina polarizadora, la lámina de polaroide, con su eje de absorción en la dirección de los alambres metálicos y su eje de transmisión en la dirección perpendicular.

Las Figuras 4A, 4B, 4C y 4D muestran dos láminas de polaroide y algunos de los efectos que pueden producirse con ellas. En el experimento se emplea una lámpara con una bombilla clásica de incandescencia, que emite luz no polarizada. Si observamos la primera situación, cuando colocamos un polaroide, la luz que lo atraviesa queda linealmente polarizada en la dirección del eje de transmisión (Figura 4A). Aparentemente no se produce otro efecto que la reducción de intensidad de la luz, dado que algo más de la mitad de la intensidad queda absorbida por la lámina. Sin embargo, la polarización lineal de la luz que atraviesa la lámina de polaroide queda patente al colocar una segunda lámina tras ella (Figuras 4B, 4C y 4D). Cuando el eje de transmisión de este segundo polarizador está orientado en paralelo al eje del primer polarizador (Figura 4B), seguimos observando claramente lo que hay detrás: la lámpara. Sin embargo, cuando se gira alguno de los dos polarizadores, de modo que la orientación relativa de sus ejes de transmisión forme 90° , se produce una anulación de la intensidad de luz transmitida (Figura 4D). Ello se debe a que la orientación del campo eléctrico que se transmite en el primer polarizador es justamente la que se absorbe en el segundo.

Finalmente, cuando la orientación relativa entre los dos polarizadores es de un ángulo intermedio, se produce una transmisión relativa proporcional al cuadrado del coseno de dicho ángulo relativo



Figuras 4A, 4B, 4C y 4D

Transmisión a través de láminas polarizadoras. Figura 4A. El primer polarizador polariza la luz proveniente de la lámpara. Figura 4B. Si el segundo polarizador se coloca paralelo al primero, se sigue observando la lámpara. Figura 4C. Si el segundo polarizador se rota 45° , se produce una reducción de la intensidad a la mitad. Figura 4D. Si se colocan los polarizadores perpendiculares entre sí, se produce la extinción completa de la luz. Fuente: Ignacio Moreno Soriano.

(Figura 4C). Esta ley se conoce como ley de Malus, en honor al francés Étienne-Louis Malus, quien la enunció en 1809.

Si se quieren conseguir láminas de polaroide como las empleadas en estas demostraciones, se pueden encontrar, por ejemplo, en los monitores de cristal líquido o en las gafas de sol polarizadas. De hecho, un monitor LCD representa una excelente fuente de luz polarizada y permite realizar fácilmente un buen número de experiencias con este tipo de luz.

Algo de historia

Étienne-Louis Malus (1775-1812) fue un físico, matemático e ingeniero militar francés. Capitán en el

ejército de Napoleón, participó en la expedición a Egipto.

En 1809 publicó sus descubrimientos sobre la polarización de la luz por reflexión y en 1810, sus descubrimientos sobre doble refracción. Desarrolló la teoría de la polarización de la luz y de la birrefringencia.

En 1810 ingresó en la Academia de Ciencias de Francia y fue galardonado con la Medalla Rumford por la Royal Society of London. Su nombre aparece inscrito en la lista de los 72 científicos franceses de la Torre Eiffel.



Figura 5
Étienne-Louis Malus.
Fuente: Étienne-Louis Malus,
Wikimedia Commons.

1 Comprueba la ley de Malus haciendo girar un polarizador respecto de otro. Reproduce las situaciones mostradas en las Figuras 4B, 4C y 4D.

Polarización de la luz por reflexión

Otro fenómeno que puede polarizar la luz no polarizada es la reflexión en una **superficie dieléctrica**. La intensidad reflejada será diferente para la componente de la luz incidente cuyo campo eléctrico oscila en el plano de incidencia (conocida como «modo transversal magnético», TM, o polarización p)

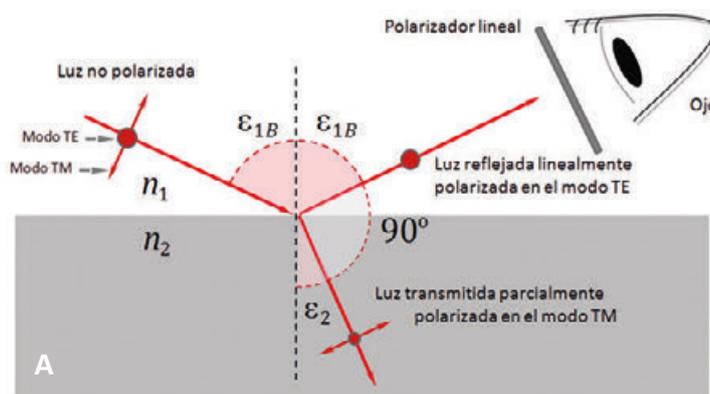
y para la componente cuyo campo eléctrico oscila en el plano perpendicular (conocida como «modo transversal eléctrico», TE, o polarización s). La distribución de la energía entre estas dos componentes viene determinada por los denominados **coeficientes de reflexión y transmisión de**

Fresnel. La componente TE siempre se refleja con mayor intensidad que la componente TM.

Esta diferencia en la intensidad reflejada para las dos componentes hace que, en general, cuando la luz no polarizada se refleja en superficies dieléctricas, se produzca una polarización parcial en la componente TE. Por otra parte, es importante tener en cuenta que existe una situación particular para la cual la componente TM reflejada se extingue completamente: cuando el rayo reflejado y el refractado forman un ángulo de 90° entre sí. El ángulo de incidencia correspondiente (ϵ_{1B}) se conoce como «ángulo de Brewster», en honor al científico escocés David Brewster. El ángulo de Brewster cumple que su tangente es igual al cociente entre índices de refracción n_1/n_2 de los dos medios que separan la superficie. En este caso particular mencionado, cuando el rayo reflejado y el refractado forman un ángulo de 90° entre sí, la luz reflejada en el modo TM se cancela totalmente, de modo que la reflexión solamente contiene componente TE. Por lo tanto, si luz no polarizada se refleja en una superficie dieléctrica con una incidencia en ángulo de Brewster, la luz

reflejada queda totalmente polarizada linealmente en la dirección del modo TE. La Figura 6A esquematiza esta situación.

La polarización de la luz puede detectarse fácilmente observando su reflexión a través de un polarizador lineal que situemos ante nuestro ojo. En las Figuras 6B, 6C y 6D se muestra este fenómeno mediante la observación del reflejo, en un suelo pulido, de la luz emitida por un fluorescente situado en el techo de un pasillo. La Figura 6B muestra la imagen reflejada del tubo fluorescente y su forma alargada permite recoger luz reflejada con un rango amplio de ángulos de incidencia. En las Figuras 6C y 6D se ha colocado un polarizador delante del objetivo de la cámara. En el primer caso, en la Figura 6C, el polarizador está situado con su eje de transmisión paralelo al modo transversal eléctrico (TE). Como en todos los ángulos de incidencia hay una fracción importante de luz reflejada, no se observa ningún efecto apreciable. Sin embargo, al girar la lámina polarizadora 90° , puede apreciarse claramente la anulación de la reflexión del modo transversal magnético (TM) cuando el ángulo de incidencia coincide con el ángulo



Figuras 6A, 6B, 6C y 6D

Figura 6A. Esquema de la reflexión y refracción de la luz en incidencia en el ángulo de Brewster: el modo TM no se refleja y la luz reflejada se polariza linealmente en el modo TE.

Ejemplos de fotografías de la reflexión en una superficie pulida observada: Figura 6B.

Sin polarizador. Figura 6C. A través de un polarizador orientado horizontal.

Figura 6D. A través de un polarizador orientado vertical.

Fuente: Ignacio Moreno Soriano.



de Brewster. Esta simple demostración permite, por tanto, ilustrar la dependencia de los coeficientes de reflexión de Fresnel con la componente de polarización y con el ángulo de incidencia. Por otra parte, también nos permite realizar una determinación absoluta de la dirección del eje de transmisión del polarizador lineal que se emplea en la observación.



por sus contribuciones en el estudio de la doble refracción mediante compresión, el descubrimiento del efecto fotoelástico y el desarrollo de **polarímetros**. En 1815 se le concedió la Medalla Copley por sus investigaciones sobre la polarización de la luz.

También fue el inventor del caleidoscopio, así como del **estereoscopio lenticular**, una primera versión de un dispositivo portátil de visión 3D.

Fue un importante divulgador de la ciencia y se le considera uno de los fundadores de la British Science Association, de la cual fue elegido presidente en 1849.

Figura 7
David Brewster.
Fuente: David Brewster,
Wikimedia Commons.

Algo de historia

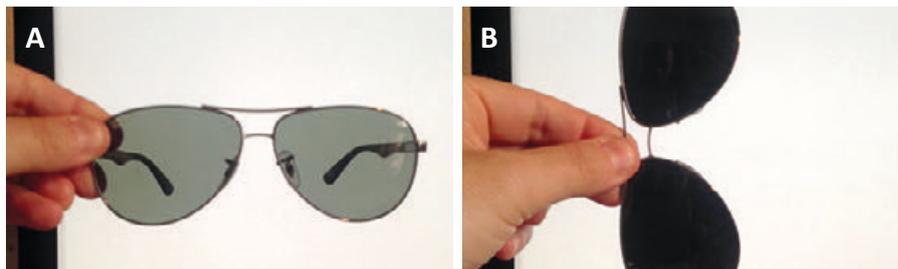
Sir David Brewster (1781-1868) fue un físico, matemático, astrónomo y escritor escocés, conocido

Gafas polarizadas

Las gafas de sol polarizadas incorporan filtros polarizadores lineales y, precisamente, se basan en este efecto de la polarización de la luz en el ángulo de Brewster. Es fácil comprobar que contienen polarizadores lineales situándolas delante de un monitor LCD. Como se explicará más adelante, estos monitores tienen a la salida una lámina de polaroide que cubre completamente la superficie del monitor, por lo que la luz que emiten es linealmente polarizada. Al situar las gafas de sol polarizadas delante del monitor LCD, podemos comprobar de nuevo la ley de Malus. Como puede observarse en las Figuras 8A y 8B, hay una orientación de las gafas que deja pasar la luz, mientras que la perpendicular extingue completamente la transmisión.

Esto confirma que las gafas contienen filtros polarizadores y que en ambos, en el monitor y en las gafas, están orientados de igual manera.

Las Figuras 8A y 8B muestran un ejemplo de experiencia que puede realizarse de manera muy sencilla utilizando unas gafas de sol polarizadas como las que ilustran este fenómeno. Como hemos comprobado, el eje de transmisión de las gafas polarizadas se sitúa orientado de forma vertical: en la Figura 8B, se colocan las gafas polarizadas con orientación horizontal y se observan oscuras, confirmándose así que, en este caso, forman un ángulo de 90° con el eje de transmisión del polarizador en el monitor LCD, por lo que podemos concluir que este también está orientado de forma vertical.



Figuras 8A y 8B
Gafas de sol polarizadas colocadas frente a un monitor LCD. Figura 8A. Orientación de máxima transmisión (polarizadores paralelos). Figura 8B. Orientación de máxima extinción de la transmisión (polarizadores cruzados).
Fuente: Ignacio Moreno Soriano.

2 De nuevo, puedes volver a comprobar la ley de Malus girando las gafas desde la primera posición hasta la segunda.

A continuación, vamos a observar la luz proveniente de una ventana reflejada en una mesa de vidrio (Figura 9A). Si situamos delante unas gafas de sol polarizadas, apreciaremos que están oscuras (Figura 9B). Si esto es así, podremos concluir, con razonamiento inverso al ejemplo anterior del monitor LCD y las gafas polarizadas, que si el eje de transmisión del polarizador de las gafas está orientado vertical, entonces el eje de transmisión del polarizador de la mesa estará orientado de forma horizontal. Por ello, en la Figura 9C (que muestra la imagen que se captura con una cámara fotográfica cuando situamos las gafas justo delante del objetivo) se puede apreciar fácilmente que la luz polarizada reflejada en la superficie de la mesa queda completamente absorbida por el polarizador y pueden observarse claramente las patas de la mesa y la parte inferior de las sillas.

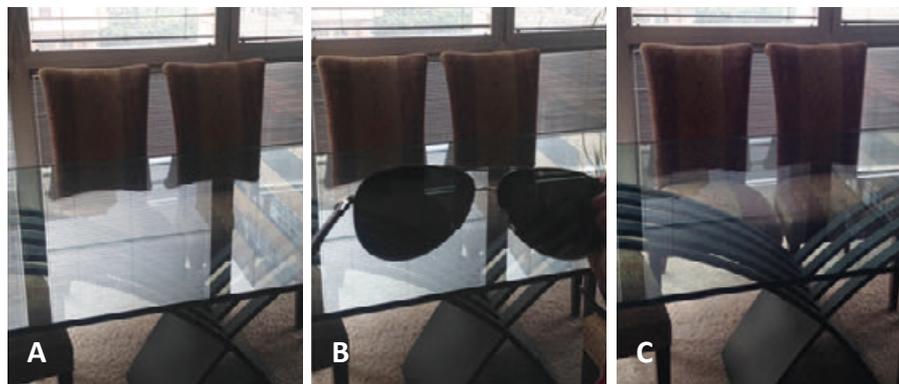
De igual forma, con la utilización de gafas polarizadas se consigue reducir en gran medida la luz reflejada en el suelo o en la superficie sobre la que nos situemos. Así, por ejemplo, este tipo de gafas son de gran utilidad para esquiadores, ya que reducen la luz reflejada en la nieve que llega al ojo, o para pescadores, ya que reducen la luz reflejada en el agua y les permite observar mejor el fondo marino.

Resulta también muy interesante saber que la luz que forma el arcoíris tiene un alto grado de polarización. El motivo es que la reflexión que se produce en el interior de las gotas de agua que quedan tras la lluvia, y que producen el efecto dispersor que se ha descrito en el capítulo 3, lo hace con un ángulo muy próximo al ángulo de Brewster. De este modo, además de la separación cromática, se produce también polarización de la luz. La próxima vez que se forme el arcoíris, será interesante observarlo con gafas de sol polarizadas. También se puede observar el efecto en el siguiente enlace: <https://goo.gl/7yyGXD>.

Figuras 9A, 9B y 9C

Visión de la luz reflejada en un medio dieléctrico. Figura 9A. Visión directa, sin utilización de gafas. Figura 9B. Visión situando unas gafas polarizadas. Figura 9C. Visión situando las gafas polarizadas justo delante del objetivo de una cámara fotográfica (equivale, por tanto, a lo que observamos si nos ponemos las gafas polarizadas).

Fuente: Ignacio Moreno Soriano.



Materiales birrefringentes. El fenómeno de la doble refracción

Los cristales transparentes de estructura natural distinta de la cúbica tienen la propiedad de transmitir la luz polarizada lineal de forma distinta a la

luz polarizada lineal perpendicular. Algunos materiales tienen la propiedad denominada «birrefringencia», es decir, presentan dos índices de

refracción diferentes a la propagación de dos polarizaciones lineales ortogonales. Uno de estos dos índices presenta adicionalmente el fenómeno de que depende de la dirección de propagación de la luz dentro del cristal, por lo que recibe el nombre de «índice de refracción extraordinario», para diferenciarlo del otro índice, que no tiene esa dependencia de la dirección de propagación y que recibe el nombre de «índice de refracción ordinario».

La birrefringencia es responsable del fenómeno de la doble refracción, mediante el cual un rayo de luz, cuando incide sobre un material birrefringente, se divide por la refracción-polarización en dos rayos que toman caminos ligeramente diferentes. Este efecto fue descrito por primera vez, en 1669, por el científico danés Rasmus Bartholin, quien lo observó en la **calcita**, un cristal que tiene una fuerte birrefringencia. Sin embargo, no fue hasta el siglo XIX cuando Fresnel describió el fenómeno en términos de polarización, considerando la luz como una onda con componentes de campo transversales.

La Figura 10 muestra el fenómeno de la doble refracción en un cristal de calcita. En el papel hay dibujada una sola línea y, en cambio, bajo el cristal se observan claramente dos imágenes de esa línea. Cada una de estas dos imágenes tiene una polarización lineal, que es diferente y perpendicular a la otra.

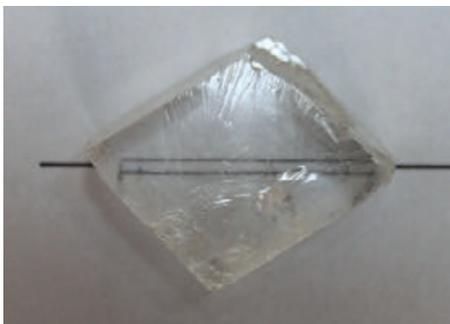


Figura 10
Doble refracción en
un cristal de calcita.

Fuente: Ignacio Moreno Soriano.

Algunos cristales birrefringentes, denominados «uniáxicos», porque solamente tienen un eje óptico, pueden tallarse de manera adecuada para que tengan una actuación como desfasadores

ópticos. De esta forma, producen una **propagación colineal** de los dos haces de luz, ordinario y extraordinario, sin separación espacial entre ellos; sin embargo, debe tenerse en cuenta que se habrá modificado su estado de polarización al haberse introducido una diferencia de fase entre las dos componentes lineales constituyentes de los haces de luz. De esta forma, es posible generar estados de polarización circular o de polarización elíptica, como los indicados en la Figura 1, a partir de luz linealmente polarizada obtenida con un polarizador lineal.

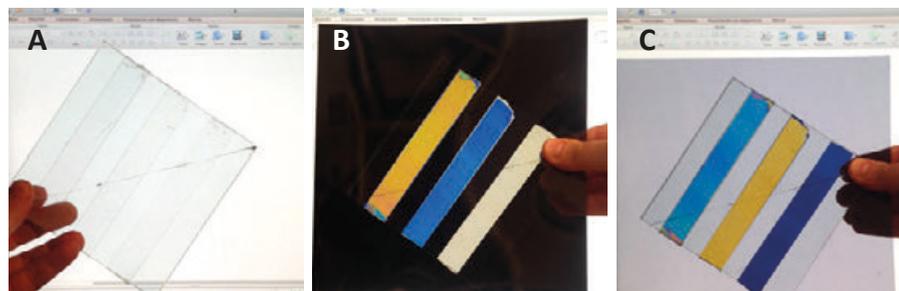
También algunos materiales polímeros presentan esta propiedad. Por ejemplo, el celofán que se usa en adhesivos actúa como desfasador óptico. Vamos a realizar un experimento, para el que tendremos en cuenta que la magnitud del desfase introducido por un desfasador depende tanto del espesor como de la longitud de onda de la luz.

La Figura 11 muestra fotografías de demostraciones que podemos realizar fácilmente para observar esta actuación. Se han situado tres tiras de celo sobre un vidrio. Para variar el desfase, las tiras de celo están formadas por tres, dos y una sola capa, de izquierda a derecha, y para mostrar claramente el efecto, se orientan a 45° relativos a la polarización de entrada, que viene determinada por el polarizador del monitor LCD, que se ha comprobado anteriormente que era vertical.

En la Figura 11A no se sitúa polarizador a la salida. Las tiras de papel celo modifican el estado de polarización y, además, lo hacen de manera distinta para distintas longitudes de onda y distintos espesores. Dado que los detectores de una cámara fotográfica (al igual que ocurre en el ojo humano) no son sensibles a cambios de polarización, sino solamente a cambios de la intensidad de la luz, aún no se observa ningún efecto apreciable.

Los cambios de polarización son apreciables cuando se sitúa un polarizador tras las tiras de celo. Por ejemplo, en la Figura 11B se ha situado un segundo polarizador cruzado respecto al polarizador inicial del monitor LCD, por lo que se observa un fondo oscuro. Aquí se observan claramente las tres tiras de celo sobre ese fondo oscuro, lo que es una clara indicación de que la polarización de la

Figuras 11A, 11B y 11C
 Demostración de desfasadores ópticos con celofán. Figura 11A. Observación sin polarizador. Figura 11B. Observación con polarizador cruzado a la polarización incidente. Figura 11C. Observación con polarizador paralelo a la polarización incidente.
 Fuente: Ignacio Moreno Soriano.



luz ha variado y ha dejado de ser lineal y perpendicular al eje de transmisión del polarizador final. En cuanto a los diferentes espesores, son apreciables por los diferentes colores que se observan. Por ejemplo, la tira situada más a la derecha, que es la de menor espesor, se observa blanca. Esto indica que todas las longitudes de onda, en mayor o menor medida, están siendo transmitidas. Por el contrario, la tira central, con el doble de espesor, está introduciendo un desfase doble, y provoca que las longitudes de onda en los rangos rojo y azul estén emergiendo del celo con estados de polarización fuertemente absorbidos por el polarizador final. Por ello, se observa de color azul. Por último, la tira situada más a la izquierda, con el triple de espesor y triple de desfase, aparece de color amarillo, pues ocurre la situación opuesta, es decir, la luz roja y verde es fuertemente

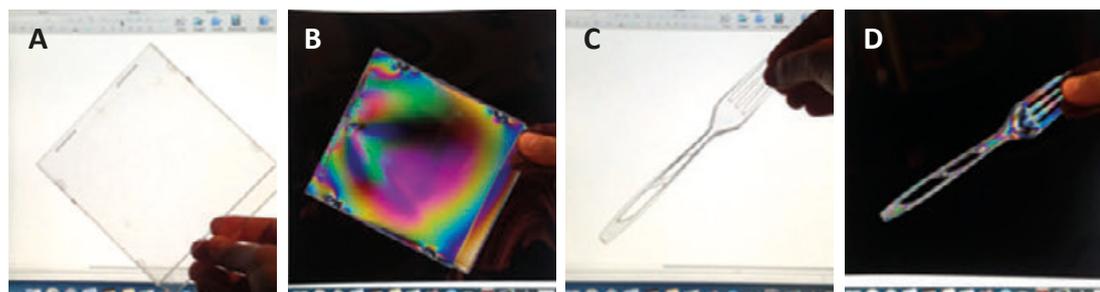
transmitida y es la zona azul del espectro la que se absorbe intensamente en el polarizador final. Esto queda de manifiesto en la Figura 11C, donde el segundo polarizador se ha girado 90° y se ha colocado con su eje de transmisión paralelo al del polarizador del monitor LCD. Ahora el fondo ya no es oscuro, pero es interesante observar que los colores que se obtienen en las tiras de celo son los complementarios a los de la Figura 11B. Esto se debe a que, al girar de nuevo el segundo polarizador 90° , estamos dejando pasar los estados de polarización que antes se eliminaban, y viceversa.

Estos efectos de color que se observan se conocen como colores de birrefringencia y tienen una gran importancia en mineralogía, en la que se observan cristales birrefringentes bajo microscopios de luz polarizada.

Fotoelasticidad

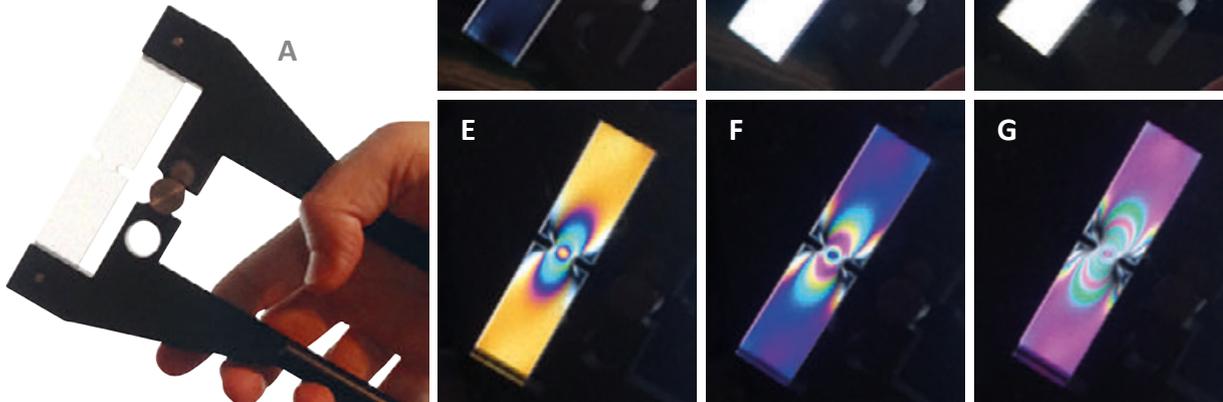
El fenómeno de la birrefringencia puede observarse también en una gran cantidad de objetos muy

comunes en nuestro día a día. Muchos productos fabricados con materiales plásticos transparentes



Figuras 12A, 12B, 12C y 12D
 Demostración de fotoelasticidad en plásticos transparentes.
 Fuente: Ignacio Moreno Soriano.

Figuras 13A, 13B, 13C, 13D, 13E, 13F y 13G
 Demostración de fotoelasticidad aplicando
 tensión a una pieza de plástico birrefringente.
 Fuente: Ignacio Moreno Soriano.



tienen esta propiedad. A modo de ejemplo, las Figuras 12A, 12B, 12C y 12D muestran fotografías de una caja de protección de un disco compacto y de un tenedor de plástico transparente. En ambos casos, se muestran los objetos iluminados con la luz que proviene del monitor LCD, es decir, luz polarizada. En las imágenes 12A y 12C, los objetos se observan de la manera habitual: transparentes. Sin embargo, al atravesar el plástico, la luz está sufriendo modificaciones del estado de polarización, que dependen del desfase que el plástico introduce. Estos cambios del estado de polarización se hacen evidentes al situar el segundo polarizador delante del objetivo de la cámara fotográfica. Para una mejor observación, este segundo polarizador se ha orientado perpendicular a la luz del monitor LCD, de modo que el fondo se observe oscuro. Vemos que ambos objetos se pueden observar entre los polarizadores cruzados y se aprecian claramente colores birrefringentes como los descritos anteriormente.

En este caso, la birrefringencia depende nuevamente del espesor, pero también de la tensión a la que se ve sometido el material en su proceso de fabricación. Allí donde el material ha quedado más

tensionado, el desfase se hace mayor y varía más rápidamente con la longitud de onda de la luz, lo que hace que se observe una mayor diversidad cromática. Este fenómeno se conoce como «fotoelasticidad».

El fenómeno de la fotoelasticidad se pone aún más de manifiesto en las imágenes de las Figuras 13A a 13G. En este caso, se utiliza de nuevo una pieza de material plástico transparente, que situamos sujeta en la tenaza que se muestra en la Figura 13A. Si se aprieta con la mano esta tenaza, es posible aplicar tensión mecánica al plástico. Las demás fotografías (Figuras 13B a 13G) son una secuencia de lo que se observa cuando la pieza se coloca entre polarizadores cruzados y se aprieta cada vez más. En la Figura 13B apenas se ha aplicado tensión y la pieza se observa bastante oscura. En la Figura 13C ya se ha aplicado una ligera tensión, que provoca un desfase por fotoelasticidad en la pieza. Pero este desfase varía poco con la longitud de onda y la pieza se observa blanca, pues todos los colores modifican de manera no muy diferenciada su estado de polarización. En la Figura 13D se aplica más fuerza a la tenaza y en la zona central de la pieza de plástico, donde

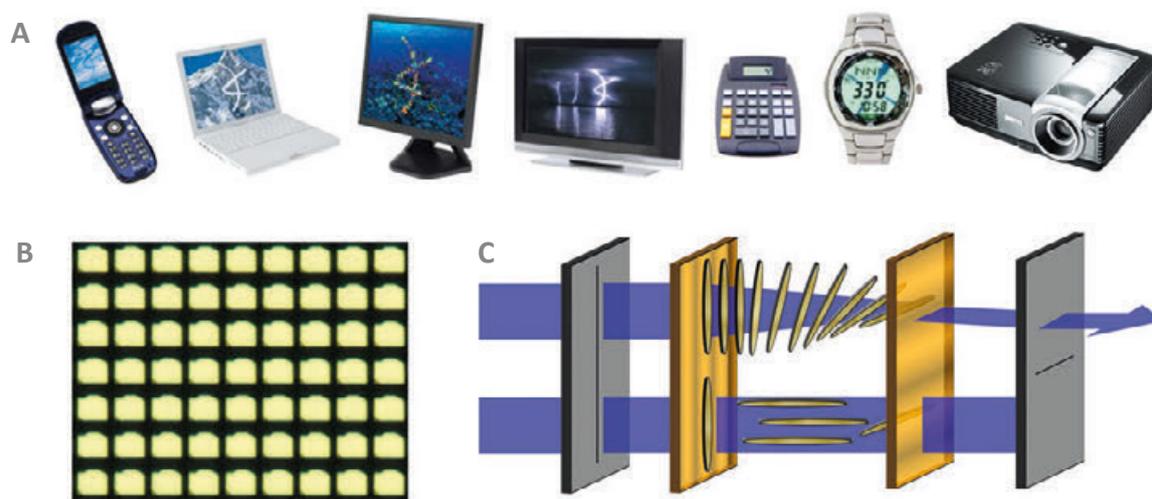
varía la forma, las tensiones mecánicas se hacen visibles en forma de los primeros colores birrefringentes. Al apretar cada vez con mayor fuerza

la tenaza, apreciamos que los colores birrefringentes se hacen cada vez más evidentes en las Figuras 13E, 13F y 13G.

Pantallas de visualización de cristal líquido

Como se ha mencionado anteriormente, los monitores de cristal líquido (LCD) emiten luz polarizada. La razón es que los cristales líquidos son materiales con propiedades birrefringentes. Pero, además, tienen una fluidez suficiente que hace que sus cadenas moleculares puedan reorientarse fácilmente mediante la aplicación de un pequeño voltaje.

relojes, donde inicialmente se emplearon, hasta los modernos monitores de ordenador y televisión, así como las diapositivas electrónicas (*microdisplays*) que se emplean en los modernos aparatos de proyección. Todas estas pantallas de visualización de información funcionan modificando el estado de la luz polarizada mediante un material cristal líquido.



Figuras 14A, 14B y 14C

Figura 14A. Dispositivos electrónicos que emplean pantallas LCD. Figura 14B. Imagen tomada mediante microscopio de una pantalla LCD, donde se observa la estructura TFT. Figura 14C. Principio de operación del modo TN-LCD.

Fuente: Ignacio Moreno Soriano.

Esto ha motivado que los cristales líquidos se hayan empleado habitualmente en una gran variedad de dispositivos electrónicos, siendo una tecnología ya muy madura de visualización de imágenes. La Figura 14A muestra algunos de estos aparatos, desde las pantallas numéricas de calculadoras y

Un avance muy relevante para poder conseguir disponer de pantallas de este tipo fue el control electrónico independiente de los diversos píxeles mediante la técnica de matriz activa. Esta técnica utiliza los denominados **transistores de capa delgada**, conocidos como TFT (de sus iniciales en

inglés, *thin film transistor*), que permiten la aplicación y el mantenimiento de un voltaje para cada electrodo correspondiente a cada píxel con objeto de crear los patrones que conforman la imagen visualizada. La Figura 14B muestra una imagen de una pantalla LCD capturada mediante un microscopio, donde puede observarse la estructura pixelada de la pantalla, con píxeles de forma rectangular, y los transistores TFT localizados en la esquina de cada píxel.

La estructura más habitual de los dispositivos LCD se muestra en la Figura 14C, conocida como estructura TN-LCD (del inglés *twisted nematic*-LCD). La capa de cristal líquido se sitúa entre dos polarizadores lineales, normalmente cruzados entre sí. La estructura TN consiste en un tratamiento de las capas internas de la celda de cristal líquido que provoca que las cadenas moleculares del material cristal líquido tengan un giro de aproximadamente 90° desde la cara delantera a la trasera. Esto provoca un giro equivalente en la dirección de polarización de la luz que atraviesa la capa de cristal líquido. Por tanto, la luz puede transmitirse por el polarizador de salida, de modo que la pantalla se observa brillante. Esta situación se indica en la parte superior de la Figura 14C. Al aplicar un voltaje a los electrodos de la celda, el campo eléctrico originado provoca que las moléculas del cristal líquido se inclinen sobre la dirección de propagación de la luz (tal y como muestra la parte inferior de la Figura 14C). En esta situación, desaparece el giro del estado de polarización y, por tanto, la luz queda absorbida por el polarizador de salida y la pantalla se observa oscura. De esta forma se obtienen dispositivos modulables cuya transmisión puede controlarse con un pequeño voltaje.

Saber más

La polarización de la luz es un fenómeno ocasionado por la naturaleza transversal de las ondas electromagnéticas. De forma habitual, la gran mayoría de fuentes de luz habituales emiten luz no polarizada, lo que hace que los fenómenos de luz polarizada no sean demasiado evidentes.

No obstante, tal y como se ha puesto de manifiesto en el capítulo, existen numerosas situaciones en las que la polarización de la luz se nos puede hacer evidente, sobre todo si disponemos de unas gafas de sol polarizadas. Y estos fenómenos no son solamente curiosidades científicas, sino que tienen también una utilización práctica muy importante, sobre todo en el ámbito de los dispositivos de visualización de imágenes mediante pantallas de cristal líquido.

A modo de profundización en el tema, se proponen dos ejemplos más:

- Polarización del cielo. Se puede observar que hay zonas del cielo azul que presentan un importante grado de polarización, ocasionado por la dispersión en la atmósfera. Los aficionados a la fotografía saben que pueden obtenerse imágenes contrastadas entre el cielo azul, las nubes y el paisaje mediante la colocación adecuada de un polarizador frente al objetivo de la cámara. También es interesante conocer que hay distintos insectos que aprovechan esa polarización para orientarse.

3 *Observa el azul del cielo a través de un polarizador mientras lo vas girando. Realiza esta operación observando distintas zonas del cielo. ¿Sucede lo mismo en todas las zonas? ¿En qué zona se oscurece más el polarizador? Investiga sobre la difusión del cielo y saca conclusiones (en distintos apartados de esta Unidad Didáctica podrás encontrar contenido que te ayudará).*

4 *Investiga sobre la utilización que ciertos insectos hacen de la polarización parcial del cielo.*

5 *Aparte de los insectos, ¿hay más animales que «vean» la luz polarizada? Investiga sobre este tema, te sorprenderás.*

- Gafas para ver las películas en 3D. Una de las técnicas 3D más importantes proyecta dos imágenes con puntos de vista ligeramente diferentes, cada una con una polarización diferente y ortogonales entre sí. En este caso, las gafas polarizadas tienen filtros polarizadores ortogonales en cada ojo, consiguiendo el efecto de que cada ojo vea una sola imagen diferente, para así crear la sensación tridimensional.

6 Actualmente, cuando vas al cine a ver una película en 3D, además de pagar la entrada tienes que pagar las gafas que usarás. Pues bien, esas gafas te ayudarán a realizar las actividades que te proponemos a continuación.

- a)** Mientras ves la película, quítate un momento las gafas, ¿cómo se ve la película? Lee la parte de esta Unidad Didáctica dedicada a la binocularidad (capítulo 7), te ayudará a entender el porqué.
- b)** Con las gafas que has comprado en el cine podrás hacer en casa la siguiente experiencia: enciende tu ordenador, coloca las gafas delante y, después, gíralas de igual forma que hiciste anteriormente, como se muestra en las Figuras 8A y 8B de este capítulo. ¿Qué conclusiones obtienes en este caso, en comparación con las que obtuviste al realizar esta misma experiencia con gafas de sol polarizadas?
- c)** ¿Podríamos ver una película en 3D con gafas de sol polarizadas?

BIBLIOGRAFÍA

- Carreño, F. *et al.* (2001): *Experiencias de óptica física*. Innovación educativa, Editorial Complutense.
- Collet, E. (2005): *Field Guide to Polarization*. SPIE Press.
- Hetch, E. (1999): *Óptica*. Pearson Educación.
- Velasquez, P.; Sánchez-Lopez, M.^a del M., *et al.* (2005): «Interference Birefringent Filters Fabricated with Low Cost Commercial Polymers». *American Journal of Physics*, volumen 73, número 4, marzo del 2005.



Capítulo 6

Interferencias y difracción

Eva M.^a Valero Benito

Miguel Ángel Martínez Domingo

Ángel Sánchez Caballero
(Foto participantes en FOTCIENCIA10)

Introducción

En este capítulo vamos a tratar dos importantes fenómenos, la interferencia y la difracción, que tienen un origen común: la superposición de ondas luminosas. En esencia, ambos fenómenos pueden explicarse sabiendo que, en determinadas condiciones, la suma de dos o más ondas luminosas puede dar lugar a una intensidad que no es la suma de las intensidades de las ondas que se superponen, y que depende de la localización espacial del punto de superposición. Estas distribuciones sorprendentes de intensidad variable se denominan «patrones». Hablaremos entonces de patrones de interferencia o de patrones de difracción, según la causa que produzca la distribución de intensidad. En realidad, el patrón es el resultado de una redistribución en el espacio de la intensidad de las ondas que se superponen.

Los fenómenos de interferencia pueden producirse cuando se superponen fuentes de luz que han realizado diferentes recorridos para llegar hasta el punto de superposición. Por otra parte, los fenómenos de difracción pueden producirse cuando una onda encuentra un obstáculo en su camino: un objeto o una abertura. Para que se produzcan unos y otros serán necesarias determinadas condiciones, que describiremos en este capítulo.

Estos fenómenos son una parte fundamental de la óptica ondulatoria. Además, tienen un atractivo especial porque pueden observarse a menudo en nuestro entorno y también por su gran cantidad de aplicaciones en sistemas de uso común o en tecnologías de vanguardia.

A continuación vamos a ilustrar estos fenómenos con dos ejemplos de experimentos que se pueden realizar muy fácilmente en casa.

Interferencia

En primer lugar, vamos a observar el fenómeno de la interferencia con pompas de jabón. Los materiales que se necesitan para realizar este experimento son los siguientes: una cucharada de lavavajillas concentrado; 150 ml de agua; un pompero, una pajita o un alambre doblado para crear un orificio circular o cuadrado; y una fuente plana o una bandeja (mejor si tiene el fondo oscuro).

Para producir el **patrón de interferencia** debemos hacer lo siguiente: a) Añadir el lavavajillas concentrado al agua y remover. b) Verter parte de la solución en la fuente o bandeja. c) Mojar el pompero o el extremo de la pajita o el alambre en la solución unas cuantas veces. d) Soplar con cuidado hasta producir una pompa de jabón, con forma de media esfera, que se quede flotando en la fuente (Figura 1A). e) Formar una película en el pompero (Figura 1B).

Una vez que tengamos la pompa y la película de jabón, podremos observarlas durante un tiempo.

Figuras 1A y 1B
Resultados del experimento realizado:
Figura 1A. Semiesfera en la fuente. Figura 1B. Película en el pompero.
Fuente: M.ª Valero Benito.



1

¿Es uniforme el color de las películas de jabón? ¿Influye, o no, la distancia al punto más alto de la película o pompa? Y si nos fijamos en un mismo punto, ¿el color cambia con el tiempo? ¿De qué forma? (Mira el siguiente vídeo para ayudarte: <http://goo.gl/O8zAEi>. Fuente: Departamento de Óptica de la UGR).

Tras todo lo visto anteriormente, podemos plantear la siguiente hipótesis: «El color observado en la película de jabón depende del espesor de la misma». Veamos las razones que apoyan esta hipótesis: 1) Si dejamos la película en reposo, es previsible que su espesor crezca hacia la base, es decir, que sea más fina en la parte superior que en las partes intermedia e inferior por efecto de la fuerza de la gravedad. Y hemos observado que el color varía con la distancia al punto superior. 2) En un mismo punto, el espesor va cambiando con el tiempo, porque la película va adelgazando progresivamente por la parte superior y se va engrosando por la parte inferior debido a la gravedad (mira el siguiente vídeo: <http://goo.gl/fdOAGJ>. Fuente: Departamento de Óptica de la UGR). Y hemos observado que el color cambia con el tiempo en un mismo punto.

Además, en cada punto solemos encontrar un orden fijo en el cambio de colores (será así siempre que consigamos una película de jabón bastante estable). Esto nos hace pensar que hay una relación entre el color observado (que podemos describir como la longitud de onda que vemos con más intensidad) y el espesor de la película. Según vaya creciendo o decreciendo este espesor, irá también creciendo o decreciendo la longitud de onda que podemos ver en máximo (veamos de nuevo el vídeo anterior, fijándonos en la parte superior). Esto es así porque el patrón de interferencias que hemos formado se ha producido en un medio de espesor variable. Hay una relación entre dicho

espesor y la longitud de onda que produce la intensidad máxima, que puede obtenerse teniendo en cuenta que el factor clave es la diferencia de recorrido entre dos haces contiguos que se reflejan en la película de jabón (Figura 2).

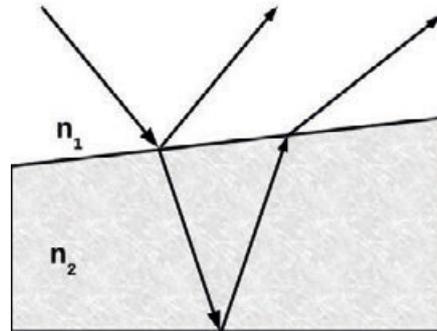


Figura 2
Esquema de los dos primeros haces reflejados en una película de jabón de espesor variable e índice de refracción n_2 , sumergida en un medio de índice de refracción n_1 .
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

Esta diferencia de recorrido, multiplicada por el índice de refracción de la película, es múltiplo semientero de la longitud de onda que nos da el máximo de intensidad cuando la luz incide según la dirección normal a la película (ecuación 1):

$$2nd = (m + 1/2)\lambda \quad 1$$

donde n es el índice de refracción de la película de jabón, d es el espesor en cada punto, m es un número natural y λ es la longitud de onda que se refleja con la máxima intensidad. Así, podemos relacionar la dependencia del color con el espesor de la película y su evolución en el tiempo.

Difracción

Tras haber observado el fenómeno de la interferencia, vamos ahora a ilustrar el fenómeno de la difracción con un pelo y un puntero láser. Vamos a ver en qué consiste este experimento...

Los materiales que se necesitan para realizarlo son los siguientes: un puntero láser (rojo o verde son los más habituales); un marco de cartón o cartulina, con forma cuadrada o rectangular; un lápiz o un cilindro delgado; un bloque de plastilina; un pelo lo

bastante largo como para llegar de un extremo a otro del marco; un alambre muy fino (como los de hilo de cobre de los cables eléctricos) y otro más grueso; cinta adhesiva o cinta aislante; una regla o cinta métrica; una caja de zapatos o similar para colocar el puntero a una cierta altura; y dos bridas de plástico para sujetar el puntero a la caja.

Para producir el patrón de difracción, deberemos hacer lo siguiente: a) Colocar el pelo y los alambres

en el marco de cartulina o cartón, fijándolos (con la cinta adhesiva o aislante) paralelos entre sí y separados a una cierta distancia. b) Sujetar el marco al lápiz con pegamento o cinta adhesiva, por su parte superior, de forma que el marco quede con el hueco por encima del lápiz. c) Pinchar el lápiz en el bloque de plastilina, intentando que quede lo más vertical posible. d) Colocar el soporte con el lápiz a unos 2 o 3 m de una pared lisa. e) Coger el puntero y colocarlo en la parte superior de la caja,

asegurándonos de que queda a la altura apropiada para que pueda iluminar los pelos y alambres que están en el marco sujeto al lápiz. Habrá que asegurar el puntero con las bridas, dejando el botón de encendido por la parte superior (Figura 3). f) Hacer pasar el haz láser por el pelo y los alambres, sujetándolo con cuidado y moviendo

la caja con el puntero lateralmente. El **patrón difraccional** es la distribución de intensidad que se forma en la pared, justo cuando el láser está atravesando el pelo o alguno de los dos alambres. Después observaremos con atención los patrones de difracción generados (Figuras 4A y 4B).

Igual que hicimos con el experimento de interferencia, vamos a plantear ahora una hipótesis: «El patrón de difracción producido por un objeto depende de la orientación del mismo. La anchura de la parte central del patrón depende del tamaño del objeto que produce la difracción».

En principio, esta hipótesis solo va a ser válida para el tipo de patrón de difracción que hemos producido en el experimento (es decir, un haz láser directo sobre el objeto, con observación a varios metros del plano del objeto y con un objeto lineal). Si hubiéramos podido encontrar una abertura u un objeto cuadrado de un tamaño similar al grosor del pelo o de los alambres utilizados, y hubiésemos generado el patrón de difracción correspondiente, habríamos podido comprobar que el hecho de que el patrón sea perpendicular a la orientación del objeto se debe a que, en realidad, para objetos muy largos y delgados, una de las dimensiones del patrón no produce cambios de intensidad apreciables. En cambio, para la abertura cuadrada hay máximos y mínimos de intensidad en las dos direcciones características del objeto. Por tanto, cuando el objeto es relativamente grande, no podemos observar este fenómeno.

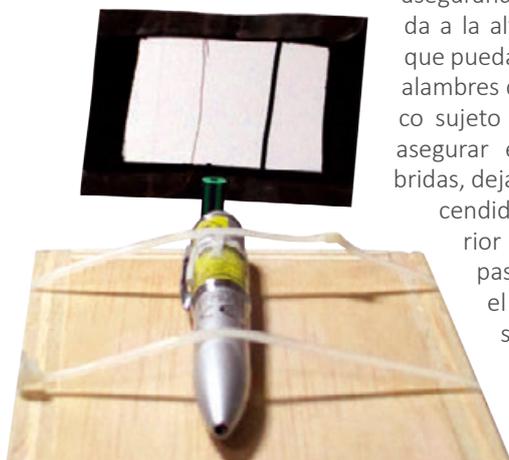
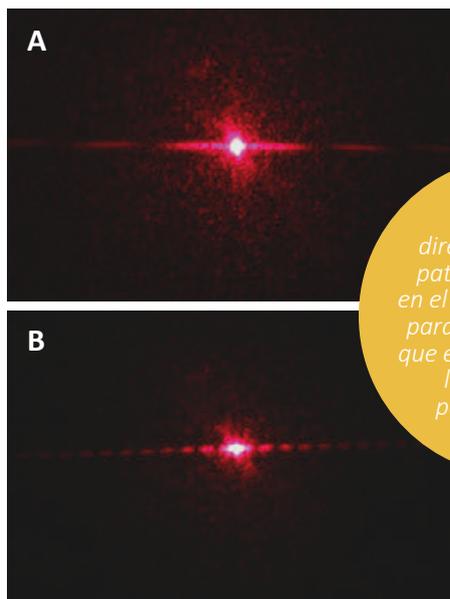


Figura 3

Montaje necesario para realizar el experimento sobre difracción.

Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.



Figuras 4A y 4B

Patrones de difracción generados en el experimento. Figura 4A. Patrón de difracción generado por un pelo. Figura 4B. Patrón de difracción generado por un alambre.

Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

2 ¿Qué dirección tienen los patrones obtenidos en el experimento? ¿Es paralela a los objetos que están produciendo la difracción o perpendicular a ellos?

3 Los patrones de difracción tienen una serie de líneas brillantes separadas por otras más oscuras. En los patrones generados en el experimento, fíjate en la línea más central y mide su anchura. ¿Está relacionada la anchura medida con el grosor del objeto que produce la difracción? ¿De qué forma: a mayor grosor se produce mayor anchura o a menor grosor se produce mayor anchura?

La referencia que tendremos será la longitud de onda de la luz del haz láser utilizado, que es aproximadamente del orden de décimas de micra. Para objetos que sean entre 100 a 1000 veces mayores que este tamaño de referencia, podremos observar patrones de difracción de este tipo. Con objetos más grandes, solo podremos producir patrones en algunas ocasiones, y si iluminamos con el láser los bordes de los mismos.

De nuestra observación de las medidas generadas hemos deducido que no solo el tamaño y la orientación del objeto son importantes en cuanto al patrón de intensidad que generan, sino que también podemos analizar el tipo de dependencia que hemos encontrado en cuanto al tamaño.

Cuando se comprende bien el fenómeno de la difracción, se es capaz de predecir varias características importantes de este tipo de patrones y, en especial, la dependencia del tamaño del máximo

central con el grosor del pelo o del alambre, explicada por la ecuación 2:

$$h = 2\lambda D/a \quad 2$$

donde h es la anchura del máximo en el patrón de difracción, a es el grosor del pelo o del alambre y D es la distancia entre el pelo y la pared donde observamos el patrón. Esta ecuación es aproximada, y la aproximación que hacemos consiste en suponer que el ángulo que subtiende el máximo central desde el plano de observación es lo bastante pequeño como para aproximar el valor del seno de ese ángulo por el valor de la tangente del mismo. Como el patrón es muy estrecho y tiende a concentrarse cuando a es grande, entenderemos por qué hemos comentado antes que es necesario utilizar objetos relativamente pequeños para producir este tipo de patrones de difracción.

Condiciones para producir patrones de interferencia y difracción

Como hemos visto, no es muy difícil generar patrones de interferencia y difracción. Posteriormente veremos también algunos experimentos sencillos a modo de complemento de lo ya analizado. Sin embargo, observando nuestro entorno, podemos darnos cuenta de que no siempre que se superponen dos fuentes de luz se generan fenómenos de interferencia, y que no siempre que la luz encuentra objetos en su camino vemos patrones de difracción. De otro modo, estaríamos constantemente viendo variaciones de intensidad en el espacio y, desde luego, desenvolverse por nuestro ambiente se haría mucho más difícil.

Según lo explicado anteriormente, si intentamos producir difracción con un alambre demasiado grueso, no vamos a tener éxito en las condiciones descritas en el experimento realizado. Por tanto, podemos pensar entonces que el tamaño de los objetos es un factor limitador para poder observar patrones de difracción en general.

También hemos visto, en el primer experimento realizado, que si la película de jabón se hacía demasiado gruesa o demasiado fina, tampoco podíamos observar los colores generados por los fenómenos de interferencia. Pero, en principio, que no podamos observar a ojo desnudo un patrón interferencial no siempre significa que no se esté produciendo. Por ejemplo, si hacemos el espesor de la película muy pequeño, entonces la longitud de onda que pasa en máximo se hace también muy pequeña, tanto que puede ser que ya no esté dentro del rango visible al cual es sensible nuestro ojo. Entonces, si fotografiáramos la película con una cámara sensible al ultravioleta cercano, sí podríamos darnos cuenta de si se está generando el patrón o no. Y lo mismo ocurriría si hacemos el espesor de la película muy grande: la longitud de onda de máximo estará entonces en el rango del infrarrojo y nuestro ojo no será sensible al patrón generado.

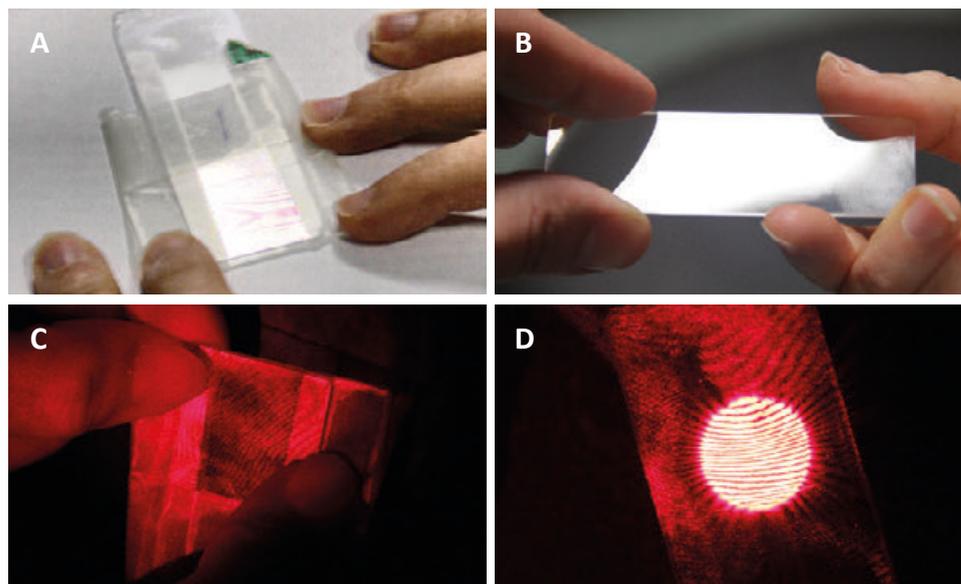
Sin embargo, con el siguiente experimento podremos comprobar si efectivamente el espesor es un factor limitante o no. Vamos a realizar patrones de interferencia en láminas de aire de espesor variable.

Para realizar este experimento, necesitaremos un puntero láser, una lámpara fluorescente (capítulo 2), una lupa de por lo menos 10 aumentos (10x) y dos láminas de vidrio de aproximadamente 1 mm de espesor.

Iremos realizando los siguientes pasos: a) Preparar las láminas, uniéndolas de forma que el espesor de aire que quede entre las dos sea muy pequeño. Se pueden pegar con cinta adhesiva o bien, simplemente, poner una sobre la otra y presionarlas para que se produzca algo de adherencia. b) Observar qué sucede cuando se iluminan las láminas con la luz de la fuente fluorescente. Veremos, si todo funciona correctamente con la fuente fluorescente escogida y la preparación de las láminas, que aparece un patrón coloreado cuando las láminas están muy juntas entre sí (Figura 5A). c) Separar las láminas y observar la luz de la fuente reflejada en una de ellas. Veremos que no se podrá apreciar ningún patrón interferencial en este caso (Figura 5B). d) Repetir ambos experimentos,

esta vez, con la luz láser, haciéndola pasar a través de la lupa para obtener un haz de luz de mayor anchura. Ahora podremos ver también el patrón interferencial generado en la capa de aire de espesor variable, pero solo con el color correspondiente a la longitud de onda del puntero láser. Probablemente, dado que el láser puede ser algo intenso, es mejor observar el patrón por transmisión a través de las láminas, utilizando la luz reflejada del haz láser en la pared o en una superficie plana (Figura 5C). e) Separar de nuevo las láminas. Si observamos la reflexión del haz láser generada sobre una de las láminas (en este caso sí que será necesario buscar el reflejo directo del haz láser abierto y fotografiarlo con poca exposición, porque es muy intenso), encontraremos también franjas de interferencia producidas por la reflexión en la primera superficie de la lámina (interfaz aire-vidrio) y en la segunda superficie de la lámina (interfaz vidrio-aire) (Figura 5D). En esta Figura 5D también se aprecia el patrón generado fuera del reflejo directo, pero a simple vista es muy difícil verlo debido a la intensidad del propio reflejo.

Si el espesor es pequeño (es decir, el espacio entre las dos láminas), se observan patrones de



Figuras 5A, 5B, 5C y 5D
Resultados del experimento para realizar patrones de interferencia en láminas de aire de espesor variable. Figura 5A. Patrón interferencial generado con una fuente de luz fluorescente en el espacio de aire entre dos láminas de vidrio. Figura 5B. Ausencia de patrón interferencial cuando se utiliza una sola lámina de vidrio. Figura 5C. Patrón interferencial generado por transmisión en el dispositivo utilizado, cuando está retroiluminado con un haz láser abierto. Figura 5D. Patrón generado por reflexión con el dispositivo iluminado por un haz láser abierto.

Fuente: Eva M.ª Valero y Miguel Ángel Martínez Domingo.

interferencia cuando se ilumina con el láser y también cuando se ilumina con la luz fluorescente. Sin embargo, si el espesor es grande, solo pueden observarse patrones con el haz láser. Por tanto, podemos concluir que el factor limitador para producir los patrones interferenciales debe depender no solo del espesor del medio, sino también de las características de la fuente de luz. El láser es mejor para producir patrones interferenciales que la luz blanca del fluorescente, como se deduce de las Figuras 5C y 5D.

Este factor limitador que depende de la fuente de luz utilizada se aparece «coherencia». La coherencia de una fuente de luz es tanto mayor cuanto más monocromática sea esta (es decir, cuanto más cerca esté de emitir en un rango muy pequeño de longitudes de onda, como ocurre con el láser) y cuanto más pequeña sea (el láser tiene una extensión mucho menor que la lámpara fluorescente, ya que emite en diferentes direcciones desde un área muy pequeña).

Las interferencias pueden producirse de forma observable siempre que la diferencia de recorrido entre los haces no supere un valor máximo, que dependerá del grado de coherencia de la luz. Por eso, con la luz de la lámpara fluorescente no se observa patrón cuando el espesor es algo mayor, ya que habríamos superado este valor máximo de diferencia de recorrido. Sin embargo, para el láser, el valor máximo es bastante superior, porque es una fuente más coherente.

Asimismo, los patrones de difracción también están limitados por la coherencia de la fuente. Por ejemplo, si intentáramos repetir el segundo experimento iluminando el pelo solamente con una fuente extensa de luz blanca, como una linterna de led que nos dé un haz bastante direccional, no observaríamos ningún tipo de patrón en la pared.

Otros factores limitadores para producir patrones de interferencia

Además de la coherencia de la fuente, en el caso de los patrones interferenciales hay dos limitaciones

Algo de historia Los anillos de Newton

Aunque *sir* Isaac Newton (1642-1727) no era partidario de la teoría ondulatoria de la luz y tuvo discrepancias al respecto con Robert Hooke, en 1717 analizó un patrón de interferencias formado al situarse una lente o superficie curvada sobre una lámina plana (patrón descrito en primer lugar por Hooke, pero que él no estudió en detalle). Este patrón se denomina «anillos de Newton» (Figura 6), aunque él no fuera capaz de explicar su origen de forma exhaustiva por las limitaciones que suponía el tratar de utilizar la teoría corpuscular de la luz para explicar este fenómeno.

El patrón interferencial de anillos de Newton se forma en el espacio de aire entre la lámina y la lente. Es posible predecir el radio de los anillos sabiendo la longitud de onda de la fuente y el radio de curvatura de la lente, o bien se puede calcular el radio de curvatura de la lente midiendo el radio de varios anillos de Newton, generados con luz casi monocromática para poder medir con más precisión. Este patrón también se utiliza para controlar la calidad de las superficies curvas de la lente, puesto que desviaciones muy pequeñas sobre la curvatura ideal en algún punto de la lente se hacen muy notorias en el patrón de anillos.



Figura 6
Anillos de Newton obtenidos con luz blanca y una lente biconvexa.
Fuente: Eva M.ª Valero Benito y Miguel Ángel Martínez Domingo.

4 ¿Cómo eliminan los reflejos las lentes antirreflejantes?

más: la necesidad de que haya direcciones de vibración paralelas en las dos fuentes y que las

longitudes de onda (o frecuencias) sean iguales. O dicho en otras palabras: no puede producirse interferencia si las dos ondas que se superponen son polarizadas linealmente y están vibrando en direcciones perpendiculares (o casi perpendiculares) entre sí.

Esto no va a pasar nunca si generamos interferencias con pompas de jabón, pero sí podría pasar con otros dispositivos, como el de la doble rendija de Young, que históricamente fue uno de los experimentos clave para el estudio de los fenómenos de interferencia (se puede acceder al enlace <http://goo.gl/F5ljA> para una explicación más detallada, en inglés).

Si colocamos un polarizador en cada rendija y los orientamos perpendicularmente, entonces el patrón de interferencia desaparecerá. En cambio, si los orientamos paralelos entre sí, el patrón se generará sin problemas. Explicar por qué sucede esto requiere una exposición más complicada, pero vamos a comentar al menos la idea básica: el tipo de superposición de ondas que resulta en la generación de patrones de interferencia requiere que las direcciones de vibración de las dos ondas que se superponen sean similares.

Utilizando como referencia el experimento de Thomas Young mencionado anteriormente, si la fuente primaria emite luz blanca y, luego, en cada una de las rendijas pusieramos un filtro coloreado diferente (uno azul y otro amarillo, por ejemplo), entonces el patrón de interferencia tampoco podría generarse. Esto se debe a que, para que pueda producirse interferencia, las dos ondas que se superponen tienen que tener la misma longitud de onda. La razón es que si las frecuencias difieren, el tipo de patrón de superposición generado será diferente al de las interferencias y, entonces, no generará variaciones de intensidad en distintos puntos del espacio.

Esto no impide que puedan producirse interferencias (o difracción) con luz blanca, pero siempre y cuando las dos ondas que se superponen contengan distribuciones de longitud de onda iguales (como es el caso de las interferencias en pompas de jabón que hemos visto en el primer experimento realizado). En estos casos, cada longitud de onda de ambas fuentes generará un patrón ligeramente

diferente y veremos, como resultado, el conjunto de todos los patrones generados.

Algo de historia

Young, un pionero frustrado

Thomas Young (1773-1829), médico y profesor de física durante algunos años en Edimburgo, presentó en 1801 y 1803, ante la Royal Society de Londres (Reino Unido), una serie de artículos sobre los fenómenos de interferencia en ondas sonoras, mecánicas y luminosas. El análisis que hizo Young para las interferencias luminosas no fue aceptado por sus contemporáneos, que sostenían mayoritariamente la teoría corpuscular de Newton. Realizó el muy famoso experimento de la doble rendija (o doble orificio, tal como él lo presentó, aunque originalmente su idea fue dividir simplemente un haz muy estrecho de luz solar utilizando una tira de papel muy fina, de 0,8 mm aproximadamente, un tamaño un poco menor que el del haz de luz solar). El patrón interferencial observado no podía ser explicado de forma coherente utilizando la teoría corpuscular. Sin embargo, a pesar de esta demostración tan explícita, en aquella época, Young no fue capaz de convencer a sus colegas científicos sobre la validez de la teoría ondulatoria de la luz. En el vídeo del enlace <https://goo.gl/TkT7Y0> se explica cómo construir un dispositivo portátil para observar fuentes lejanas y producir patrones interferenciales, pero no debe usarse para la observación directa de un puntero láser o del Sol.

Algo de historia

Las lentes difractivas de Fresnel

Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) contribuyó decisivamente a demostrar la naturaleza ondulatoria de la luz. Aportó la idea de que se trata de una onda transversal. Desarrolló una de las primeras teorías para explicar la difracción, en especial, la que se produce cuando la fuente se sitúa relativamente cerca del objeto difractante y el patrón se observa a una distancia no muy grande del objeto.

Este tipo de difracción se denomina «de campo cercano». Por el contrario, la difracción producida apuntando al objeto directamente con un haz láser, por ejemplo, y que se observa a varios metros del objeto difractante, se denomina «de campo lejano».

Fresnel era una persona bastante modesta que afirmaba: «En mí, esa sensibilidad o vanidad que se llama “amor a la gloria” está atrofiada; los elogios que he recibido de Arago, Laplace y Biot nunca me causaron mayor placer que un descubrimiento

teórico o la confirmación del mismo a través de un experimento». Con su teoría sobre la difracción ganó el Premio Nacional de la Academia de Ciencias de Francia. Además, sugirió cómo utilizar la difracción para concentrar la luz a distancias determinadas de una abertura circular que contenga un dibujo de círculos concéntricos claros y oscuros alternos, cuyos radios son proporcionales a la raíz cuadrada de los números naturales. Este diseño fue la base para las actuales **lentes difraccionales** o lupas planas.

¡A la caza del patrón! Interferencias y difracción en nuestro entorno

Si lo observásemos detenidamente, nos daríamos cuenta de que se producen multitud de fenómenos de interferencia y difracción en nuestra vida

cotidiana, en nuestro entorno. Vamos a analizar algunos de ellos.

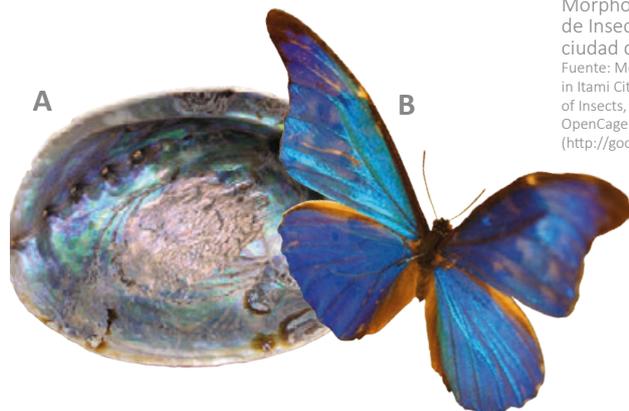
Fenómenos de iridiscencia

La **iridiscencia** o goniocromatismo se define como un cambio en el color observado cuando varía el ángulo de iluminación y/o de observación de un objeto. Podemos citar, a modo de ejemplo:

- Interferencias en películas delgadas de aceite o gasolina, por ejemplo, en charcos creados sobre el asfalto. Son muy similares a las que hemos observado en las pompas de jabón, que, con un criterio amplio, también pueden considerarse fenómenos de iridiscencia.
- Iridiscencia en el mundo animal. Muchas especies animales utilizan estructuras muy finas con muchas capas para producir efectos sorprendentes, como algunas especies de escarabajos, moscas, mariposas o moluscos (Figuras 7A y 7B). En cuanto a los patrones de iridiscencia que se producen en el plumaje de algunas especies de aves, como el pavo real, se deben a un mecanismo más complejo basado en microestructuras similares a las que pueden encontrarse en los **cristales fotónicos**.

- Iridiscencia en la atmósfera. Este tipo de iridiscencia se produce cuando se forman cristales o gotas de agua de muy pequeño diámetro y se produce difracción al iluminarlas el Sol. Es relativamente poco frecuente observar este fenómeno.

Cuando las gotitas de agua son del mismo tamaño en toda la nube y se colocan tapando el Sol o la Luna, se produce un caso especial de iridiscencia en la atmósfera que se denomina «corona».



Figuras 7A y 7B
Ejemplo de iridiscencia en la naturaleza.
Figura 7A. Concha de Paua, en las Islas Fiyi.
Fuente: Haliotis iris shell, Jan Delsing, Wikimedia Commons.
Figura 7B. Mariposa Morpho (Museo de Insectos de la ciudad de Itami).
Fuente: Morpho butterfly in Itami City Museum of Insects, Dajju Azuma, OpenCage.info, CC BY-SA 2.5 (<http://goo.gl/Ta0HbU>).

Por otra parte, es relativamente frecuente observar un fenómeno parecido denominado «gloria» cuando se vuela en avión. La gloria se observa alrededor de la sombra del avión, proyectada sobre las nubes, y también puede observarse alrededor de la sombra de la cabeza de una persona cuando esta se proyecta sobre nubes ligeras, por ejemplo, durante un paseo o escalada en la montaña. Este fenómeno se denomina «espectro de Brocken», y su nombre hace referencia a un pico en las montañas Harz, en Alemania, donde es frecuente observarlo.

Algo de historia

Hooke y los pavos reales

Sir Robert Hooke (1635-1703), quien estuvo a cargo de la división de experimentación de la Royal Society en Londres (Reino Unido) durante muchos años, estudió la iridiscencia de las plumas del pavo

real, entre otros fenómenos, y plasmó sus descubrimientos en su obra *Micrographia* (1665). Este libro está dedicado a la observación de elementos naturales y objetos artificiales a través del microscopio, una invención relativamente reciente por aquel entonces. Hooke señaló que, ya que la iridiscencia de las plumas del pavo real desaparecía al introducirlas bajo el agua, pero reaparecía de nuevo al dejarlas secar, no podía tratarse de un efecto ligado a un pigmento presente en las plumas. En realidad, la microestructura de las plumas funciona bien solo cuando los espacios intermedios entre sus elementos están ocupados por aire.

5 ¿Cómo se pueden diferenciar un halo y una corona?

¿Cómo podemos crear una corona?

Bastará con utilizar un trozo de cristal o una lente de gafas y empañarla con nuestro aliento. Especialmente en invierno, notaremos que aparecen anillos coloreados rodeando las fuentes de luz vistas a través de la lente o cristal. En este caso, la difracción se produce en las gotitas de vapor que cubren la superficie del cristal.

Patrones de difracción en el proceso de formación de una imagen

Es muy común encontrar patrones de difracción cuando se mira o se fotografía una fuente de luz, especialmente si esta es relativamente intensa y pequeña como, por ejemplo, el Sol visto a través de la hoja de un árbol (Figura 8).

En este caso, la difracción se produce a través de la abertura de entrada de luz del sistema formador de imagen. De hecho, este tipo de difracción es un

factor limitador de la calidad de imagen en todos los sistemas ópticos, incluido nuestro ojo, porque el patrón producido para una fuente casi puntual y lejana que atraviesa una abertura circular es una distribución de intensidad variable con simetría radial denominada «disco de Airy». Así, si dos fuentes casi puntuales están muy juntas, es imposible separarlas en el patrón de difracción resultante, aspecto que resultará clave en el poder resolutivo de los instrumentos ópticos. Cuanto mayor sea el tamaño de la abertura del sistema, menos efectos de difracción se observarán en la imagen.

En ocasiones se utilizan filtros para exagerar los efectos de difracción cuando se forman imágenes de fuentes de luz, para crear un efecto estético. Es bastante común su uso en el cine o en algunas series televisivas de ficción.

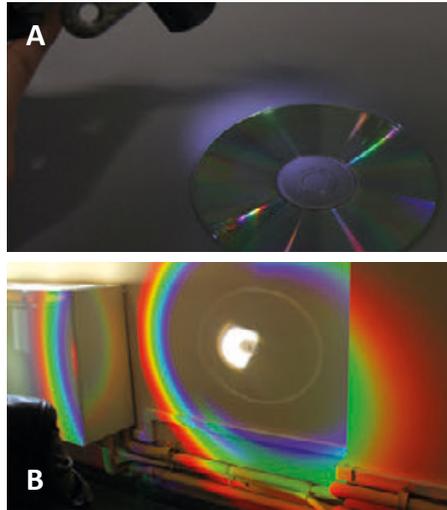
6 ¿Por qué los grandes telescopios tienen espejos con varios metros de diámetro?



Figura 8
Patrón de difracción obtenido al fotografiar el Sol visto a través de una hoja de árbol.
Fuente: reincarnation40, Pixabay, CC0 1.0 (<https://pixabay.com/en/sun-heart-autumn-leaf-beautiful-622740>).

Patrones de difracción en sistemas de almacenamiento de datos

Los discos CD-ROM y DVD tienen una estructura con relieve de muy pequeño tamaño (para un CD-ROM virgen, se encuentra entre unas 1,6 micras entre surco y surco, aproximadamente). Esta estructura crea patrones de difracción por reflexión de cualquier fuente de luz (Figura 9A). Construye tu propio «arcoíris difractivo». Si cuelgas un CD o DVD de un hilo y lo colocas a 1 m aproximadamente de una ventana, de forma que la luz del Sol se refleje en él cuando entre, podrás conseguir un patrón de difracción muy decorativo (Figura 9B). Este patrón nos recuerda a un pequeño arcoíris, pero, en realidad, el origen de los dos fenómenos es totalmente diferente: el arcoíris es un fenómeno relacionado con la refracción y posterior reflexión de la luz del Sol en pequeñas gotas de agua.



Figuras 9A y 9B
Patrón de difracción de dos fuentes de luz obtenido por reflexión en la superficie de un CD-ROM. Figura 9A. Patrón producido por la luz de una linterna. Figura 9B. Patrón producido por la luz solar.
Fuente: Eva M.ª Valero Benito y Miguel Ángel Martínez Domingo.

La experiencia de difracción más sencilla

Con dos lápices bien afilados y una linterna, puede observarse sencillamente un patrón de difracción. Deben situarse las puntas de los lápices muy juntas y mirar la luz de la linterna a través de las mismas, según se muestra en la Figura 10.

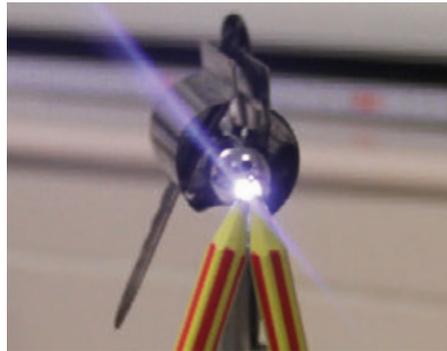


Figura 10
Difracción a través de la pequeña abertura creada entre las puntas de dos lápices.
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

Algo de historia Grimaldi y las sombras

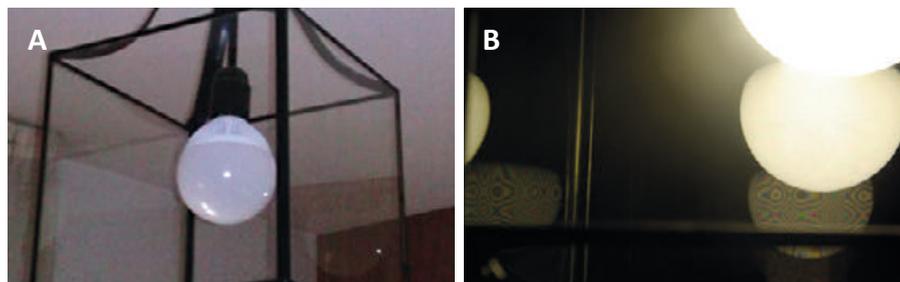
Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) fue profesor de matemáticas de la Università di Bologna (Italia). Acuñó el término *diffraetio* (cuyo significado es 'ruptura' o 'fractura'), tras un experimento en el que hizo un orificio muy pequeño (de 0,4 mm aproximadamente) en una pantalla opaca iluminada por la luz del Sol. Después, observó las sombras proyectadas por una varilla que colocó en el cono de luz, a una distancia de entre 3 y 6 m de la abertura circular, en una segunda pantalla situada tras la varilla. Al realizar este experimento, encontró

que el tamaño de las sombras no correspondía a lo calculado según las trayectorias rectilíneas de los rayos de luz, ya que los extremos estaban más difuminados y había varias franjas coloreadas en la parte externa de la sombra. Pensando, seguramente, en que la varilla había causado una ruptura de las trayectorias originales de la luz al iluminarla, decidió llamar al fenómeno «difracción».

Patrones de interferencia en objetos cotidianos de nuestro entorno

En la Figura 11A se muestra una lámpara de diseño granadino y en la Figura 11B se muestra un patrón interferencial producido en esa lámpara por una fuente de luz fluorescente de bajo consumo.

El patrón se genera en una fina lámina de recubrimiento que se ha depositado en el vidrio de los laterales de la lámpara, tras el uso continuado de productos de limpieza.



Figuras 11A y 11B
Figura 11A. Lámpara que produce el patrón interferencial ilustrado en B. Figura 11B. Patrón interferencial en láminas de espesor variable producido por reflexión de la fuente fluorescente de la lámpara.
Fuente: Eva M.ª Valero Benito.

Aplicaciones de la interferencia y la difracción

A continuación vamos a ver algunos ejemplos representativos de las muchas utilidades que el registro o análisis de los patrones de interferencia

o difracción han generado a lo largo del tiempo, aunque la mayoría de estas técnicas son relativamente recientes.

Holografía

Una de las aplicaciones más populares y extendidas de los fenómenos de interferencia es la construcción

de hologramas. La **holografía** convencional (no digital) tiene dos fases: 1) el registro, cuando se almacena y se fija en una placa especial el patrón de interferencia que resulta de superponer un haz de referencia con otro que llega del objeto; y 2) la reconstrucción, cuando se ilumina la placa con un haz de luz similar al de referencia y se recupera el haz proveniente del objeto (Figura 12). Este haz de luz es totalmente idéntico al que llega a nuestros ojos cuando iluminamos el objeto. Por eso, podemos observar dicho objeto desde diferentes puntos de vista y conseguir así una reconstrucción tridimensional del mismo. Esto se denomina «paralaje». Los hologramas pueden realizarse por reflexión y por transmisión, dependiendo de cómo coloquemos la placa con respecto a los dos haces que

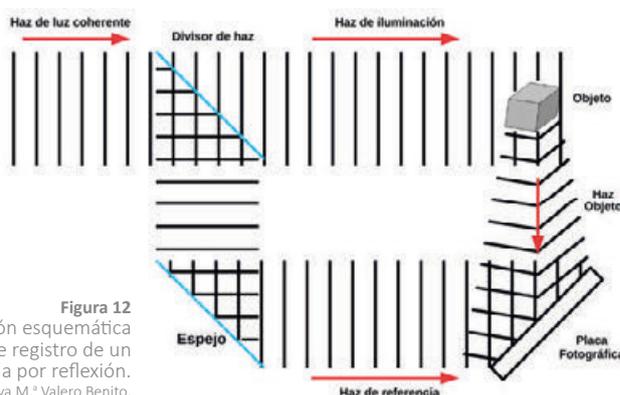


Figura 12
Representación esquemática de la fase de registro de un holograma por reflexión.
Fuente: Eva M.ª Valero Benito.

interfieren en la etapa de registro. Otro dato curioso es que basta iluminar un solo punto del holograma para obtener una imagen completa del objeto, aunque con menos intensidad que si iluminamos más porción de la placa (Figura 13). Además, podemos obtener al mismo tiempo una imagen virtual reflejada y una imagen real por transmisión. Los hologramas tienen muchas aplicaciones: se utilizan en seguridad (en la impresión de billetes, en las tarjetas de crédito...); se colocan en prendas de ropa para identificarlas como originales, es decir, que se distinga que no son falsificaciones; se usan en los displays holográficos para presentar información superpuesta a una escena que está viendo un determinado sujeto (los llamados HUD o *head-up* displays, Figura 14) y en las pantallas holográficas, que permiten visualizar una imagen sobre un sustrato transparente, etcétera. Además, también hay aplicaciones médicas y de control de calidad de la producción de superficies metálicas: se trata de la interferometría holográfica. Y en almacenamiento de datos, las memorias holográficas o HVD contienen hasta 830 veces más datos que un DVD convencional (se puede



Figura 13
Imágenes del objeto (real, en la pared, y virtual, delante del holograma) en un holograma máster por transmisión.
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.



Figura 14
Head-up display o HUD en el panel frontal de la cabina de un avión.
Fuente: C-130J co pilot's head-up display, Telstar Logistics, Wikimedia Commons, CC BY 2.0 (<https://goo.gl/zgYf5y>).

ver una presentación, en inglés, sobre este tema en el siguiente enlace: <http://goo.gl/mnml4z>).

Lectores de CD-ROM, DVD y Blue-ray

Un lector de CD-ROM o DVD funciona haciendo pasar un haz de luz láser por la estructura interna del CD, que está formada por huecos y relieves alternos. Cuando el láser pasa por un hueco, se produce intensidad máxima en la interferencia de los pulsos que se envían a la superficie del CD, y

cuando el láser pasa por un relieve, se produce intensidad mínima.

La información se codifica de forma binaria equivalente al resultado de la interferencia (luz = 1, oscuridad = 0). Habitualmente, la longitud de onda de los lectores de CD-ROM es de 780 nm, que

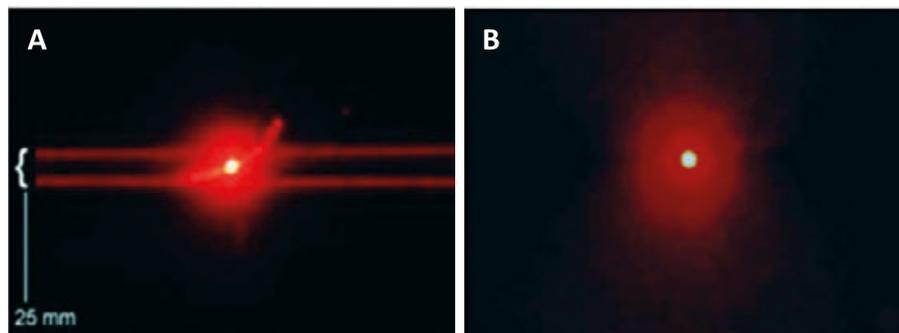


Figura 15
Patrones de difracción generados por un CD-ROM regrabable (izquierda) y original no regrabable (derecha).
Fuente: José Fernández Dorado.

posteriormente evolucionó a 650 nm para los lectores de DVD y a 450 nm para los lectores de Blu-ray. Cuanto menor es la longitud de onda, más próximos pueden estar los diferentes «surcos» de los huecos y relieves entre sí, y esto hace que el disco tenga mayor capacidad.

A continuación vamos a ver cómo, utilizando un puntero láser, es posible distinguir si un CD-ROM es original o es una copia, observando el patrón de difracción generado (sistema patentado por el

Departamento de Óptica de la UGR). Si el CD es una copia generada por «quemado» en un disco regrabable, al colocar el disco con los surcos en vertical e iluminarlo directamente con el láser, se producen dos líneas horizontales alrededor del máximo central del patrón de difracción (Figura 15). Esto puede explicarse si pensamos que el CD copia tiene un sustrato físico diferente al CD original, el cual tiene una estructura de surcos concéntricos pregrabada en el material plástico.

Interferometría estelar

Albert A. Michelson construyó en 1890 un dispositivo basado en interferencia para medir la anchura estelar de las estrellas. En dicho dispositivo, la luz de las estrellas pasa a través de dos rendijas muy separadas entre sí (unos 2,5 m), que son móviles para determinar a qué distancia se establece el primer mínimo del patrón interferencial formado.

Este dispositivo fue el pionero, pero hoy en día puede llegarse a separaciones de 130 m en varios ejes, y a medir diámetros de estrellas de hasta 0,005 segundos de arco (<http://goo.gl/58VHAh>). También se utiliza la interferometría estelar para analizar los patrones de movimiento de fuentes estelares lejanas e intentar localizar nuevos planetas.

Tomografía de coherencia óptica

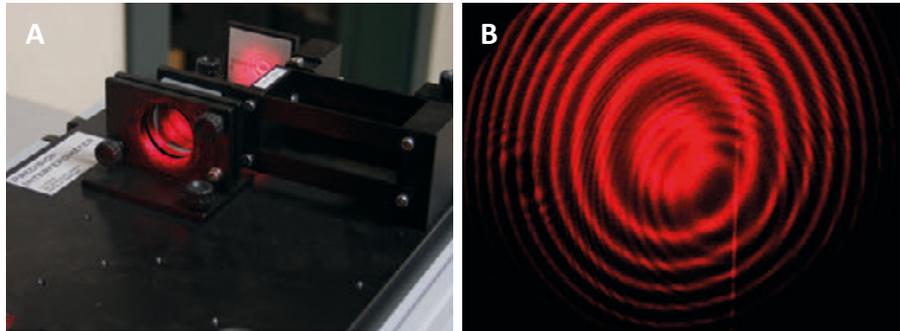
La **tomografía** de coherencia óptica, basada en hacer interferir dos haces de luz, uno de referencia y otro reflejado en un tejido y que penetra en él, ha revolucionado las técnicas de imagen médica al permitir construir imágenes tridimensionales de muy elevada resolución. Las fuentes que se utilizan no son muy coherentes, porque la resolución espacial que se consigue depende inversamente de la

coherencia de la fuente. Es una técnica muy utilizada en imágenes de la retina (ver <http://goo.gl/5G5ZM>) y también de vasos sanguíneos. Es capaz de alcanzar resoluciones espaciales del orden de micras y una penetración en profundidad del orden de milímetros; con lo cual, incluso, permite evaluar la integridad de los axones de las células nerviosas de la retina.

Espectroscopia con interferómetros y redes de difracción. Aplicación a técnicas de imagen espectral

Una red de difracción es un dispositivo formado por muchas líneas paralelas separadas entre sí a una distancia muy pequeña. Habitualmente, este dispositivo se produce por un grabado de alta precisión en un molde original y posterior impresión

repetida. Tiene la ventaja de que es capaz de separar espacialmente las diferentes longitudes de onda de una fuente de forma muy eficaz, mucho más que un prisma convencional de vidrio. Por eso, muchos dispositivos que miden la cantidad de



Figuras 16A y 16B

Figura 16A. Interferómetro de Fabry-Perot.
Figura 16B. Patrón interferencial típico de este interferómetro.

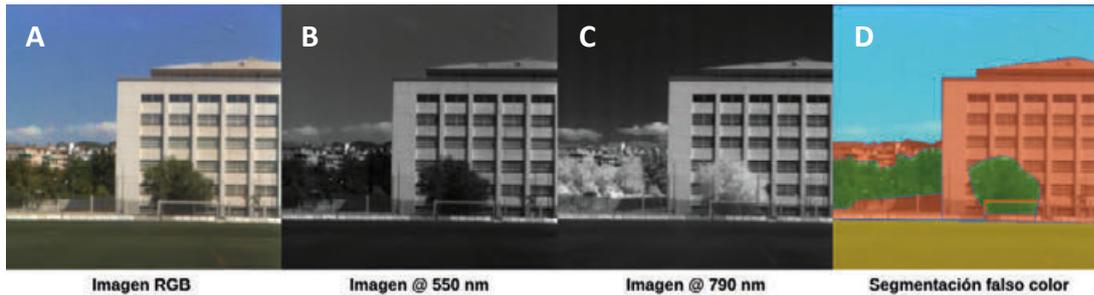
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

energía emitida por las fuentes de luz utilizan redes de difracción. También se utiliza para intentar identificar las diferentes longitudes de onda de la emisión que caracteriza un material (composición química) de la fuente que la produce. Esto último se conoce como **«espectroscopia»**.

Algunos interferómetros (dispositivos especiales con elementos ópticos que producen patrones de interferencia) pueden utilizarse para separar dos longitudes de onda que están muy próximas, como el dispositivo llamado «Fabry-Perot» (Figura 16A), que es utilizado habitualmente para resolver separaciones muy pequeñas entre líneas del

espectro, lo que se conoce como «espectroscopia fina». La Figura 16B representa un patrón interferencial típico obtenido con un interferómetro de Fabry-Perot.

Además, algunos tipos especiales de redes de difracción suelen utilizarse en las denominadas «cámaras hiperespectrales», que permiten capturar imágenes correspondientes a una sola banda espectral o longitud de onda, lo que resulta muy útil, por ejemplo, para identificar los materiales u objetos que componen una cierta escena, de forma casi independiente de la iluminación que esté presente en esta (Figuras 17A, 17B, 17C y 17D).



Figuras 17A, 17B, 17C y 17D

Figura 17A. Imagen hiperespectral de una escena urbana vista a través de los ojos de un observador con visión normal del color. Figuras 17B y 17C. Se trata de la misma escena, pero ahora aislando las bandas de 550 y 790 nm (obsérvese la elevada emisión de las plantas en la banda de 790 nm). Figura 17D. Segmentación de los diferentes materiales u objetos presentes en la escena.

Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

ENLACES WEB

Interferences with soap bubbles 2, Departamento de Óptica de la UGR:
 ▶ <http://goo.gl/fdOAGJ>



Gráficos interactivos de simulación de fenómenos ópticos, Departamento de Física y Astronomía de la Mississippi State University (en inglés):

▶ <http://goo.gl/Tm8W6R>



Ejemplos de patrones de difracción:

▶ <http://goo.gl/m1VsaK>



Thin-film interference, en Wikipedia (en inglés):

▶ <http://goo.gl/F4aK>



Example of a cloud iridescence effect of the sunlight diffracting through the cloud, en Wikimedia Commons (en inglés):

▶ <https://goo.gl/Y2CTeJ>



Broken spectre, en Wikipedia (en inglés):

▶ <http://goo.gl/BIS84>



Diffrazione, en Wikipedia (en italiano):

▶ <http://goo.gl/ATBNxT>



How a CD ROM works, en YouTube (en inglés):

▶ <https://goo.gl/TFsz3i>



Francesco Maria Grimaldi, Wikipedia (en inglés):

▶ <http://goo.gl/pP6gQ0>



BIBLIOGRAFÍA

- Casas, J. (1994): *Óptica*. Universidad de Zaragoza.
- Hecht, E. y Zajac. A. (2000): *Óptica*. Addison-Wesley Iberoamerica.
- Malacara, D. (1997): *Óptica tradicional y moderna*. Fondo de Cultura Económica de México.
- Pedrotti, F. L.; Pedrotti, L. S., y Pedrotti, L. M. (2014): *Introduction to Optics*. Pearson.



Capítulo 7

El ojo humano

Javier Hernández Andrés

Introducción

No se puede entender el concepto de «luz» sin hablar del órgano responsable de la visión humana: el ojo. De hecho, en la propia definición de luz se hace referencia a la visión humana. Los ojos son órganos del cuerpo humano con un diseño casi inmejorable y su importancia en nuestras vidas es incuestionable. En este capítulo describiremos la sensibilidad de nuestros ojos a las ondas electromagnéticas, acotando lo que se conoce como

«espectro visible». Posteriormente, abordaremos la descripción anatómica de las distintas partes del ojo, que son esenciales para la formación de imágenes en nuestra retina. Analizaremos también las propiedades de la retina, el primer estadio para poder tener visión del color. Y finalizaremos preguntándonos y comprendiendo por qué tenemos dos ojos.

El sentido de la visión

Si tuviésemos que elegir el sentido más importante de los seres humanos, seguramente la mayoría nos decantaríamos por la visión, al ser la responsable de más del 75% de la información que recibimos de nuestro entorno.

La visión comienza cuando la luz visible reflejada por los objetos entra en el ojo. Para poder «ver» necesitamos la interacción de los ojos (como elementos que forman imágenes) con el cerebro (que procesa la información para producir la percepción final). Desde un punto de vista anatómico y fisiológico, el conocimiento del ojo humano es muy amplio y completo. Sin embargo, como el cerebro

sigue siendo el gran desconocido a nivel científico, debido a su complejidad, todavía existen aspectos ligados a la visión que no están del todo explicados. Por esta razón, hay miles de investigadores que se dedican a estudiar el proceso de la visión desde múltiples puntos de vista (fisiológico, anatómico, neurofisiológico, psicofísico, etcétera).

Reflexiona

¿La visión es, realmente, el sentido más importante en nuestras vidas? Reflexiona sobre ello, teniendo en cuenta el siguiente dato: en 2011, en las universidades españolas había matriculadas 50 personas sordas frente a 717 personas ciegas.

El rango visible del espectro electromagnético

Con el término «luz» nos referimos a una pequeña región del espectro electromagnético a la que el sistema visual humano es sensible (Figura 1). La energía en este espectro suele describirse en función de su longitud de onda.

Las longitudes de onda en el espectro electromagnético van desde las extremadamente pequeñas de los rayos gamma (10^{-12} metros), hasta las grandes longitudes de onda de las ondas de radio

(10^4 metros). La luz visible posee longitudes de onda desde aproximadamente 400 a 700 nanómetros (nm), siendo 1 nm igual a 10^{-9} metros (Figura 1), como ya se ha comentado anteriormente en el capítulo 1. Por tanto, el sistema visual humano no es sensible al resto del espectro electromagnético: ni a los rayos ultravioletas, ni a los rayos X, ni a los rayos gamma, ni a la luz infrarroja, ni a las ondas de radio...

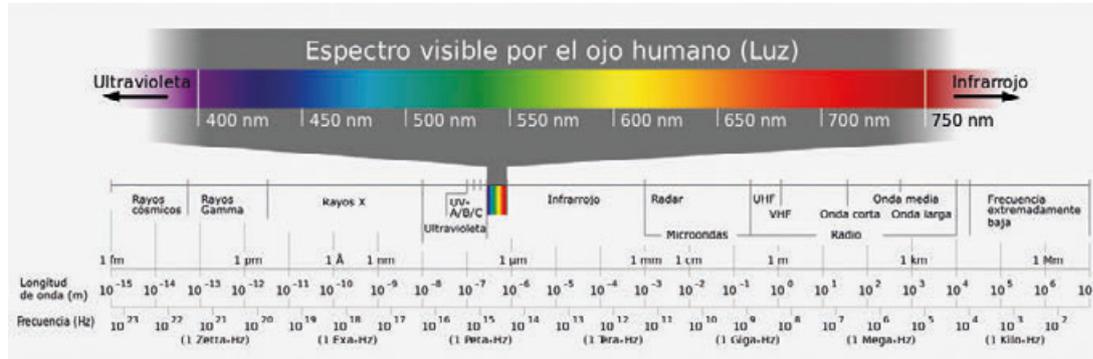


Figura 1
Espectro electromagnético con la parte del espectro visible ampliado.
Fuente: Espectro electromagnético, Horst Frank, con modificaciones añadidas por Jailbird, Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0 (<https://goo.gl/KxOKu>) y GNU 1.2 (<https://goo.gl/vx9IPv>).

¿Sabías que...?

La retina de los ojos humanos es sensible a los rayos X. En 1938, W. A. H. Rushton propuso un método para medir la longitud del ojo humano utilizando rayos X, ya que estos producen fosfenos en la retina. Este método fue abandonado para dicha finalidad años después, al descubrirse sus efectos nocivos sobre la salud. Los fosfenos son patrones luminosos provocados por estimulación mecánica, eléctrica o magnética de la retina, que se producen en ciertas situaciones, como cuando nos frotamos los párpados con bastante presión o cuando nos damos un golpe en la cabeza (representado en los dibujos animados como «estrellas» alrededor de la cabeza).

Saber más

¿El ojo humano puede detectar la polarización de la luz? Nuestros ojos no están diseñados para distinguir la polarización de la luz, al contrario de lo que les sucede a algunos animales. Sin embargo, una peculiaridad en la estructura de nuestros ojos sí que nos permite poder detectar la polarización de la luz en determinadas circunstancias. Wilhelm Haidinger, en 1844, descubrió que al mirar una luz polarizada, en unas condiciones especiales, era capaz de ver una especie de mancha que se movía al girar el estado de polarización de la luz, recibiendo en su honor el nombre de «haz de Haidinger» (Figura 2).

El haz de Haidinger es un fenómeno entóptico, es decir, que se trata de un fenómeno cuya causa está en el propio ojo. Otros fenómenos entópticos son, por ejemplo, los fosfenos, las moscas volantes, las **imágenes de Purkinje**, etcétera. Por ejemplo, cuando estamos mirando el cielo azul, de pronto percibimos un haz de Haidinger amarillo en forma de pajarita, que rápidamente se desvanece debido a la adaptación visual. O si miramos a un fondo blanco a través de un polarizador lineal veremos dos pajaritas (una amarilla y otra azul, perpendiculares entre sí).



Figura 2
Recreación de cómo se ve el haz de Haidinger.
Fuente: Luis Gómez Robledo.

Actualmente no está del todo claro su origen, aunque sí se sabe que se forma en la **mácula** y se centra en la **fóvea**. De hecho, en la práctica clínica de los optometristas, este fenómeno se utiliza habitualmente para el entrenamiento visual de personas con fijación excéntrica y ojos vagos.

- 1 ¿Cuál es el espectro visible para otros animales?
- 2 ¿Hay animales sensibles al ultravioleta? ¿Para qué les sirve?
- 3 ¿Hay animales capaces de detectar el infrarrojo?
- 4 ¿Hay animales sensibles a la polarización de la luz? ¿Qué les aporta esta característica?

El proceso de la visión

La visión comienza en el ojo, al ser el responsable de formar imágenes en la retina. La luz reflejada por los objetos entra en el ojo y es enfocada por la córnea y el cristalino para producir imágenes nítidas de dichos objetos en la retina, que contiene los receptores visuales. Pero el proceso de la visión no finaliza en la retina, ya que, posteriormente, el cerebro será el encargado de procesar esa información para generar la percepción visual final.

Hay dos tipos de receptores visuales: los conos y los bastones. Estos receptores contienen pigmentos que son sensibles a la luz y que reaccionan a ella produciendo señales eléctricas que viajan a través de la red de neuronas que forman la retina (Figura 3). Las señales que emergen de la parte

trazera del ojo a través del nervio óptico son conducidas hacia el cerebro. La córnea y el cristalino (en la parte delantera del ojo), y los fotorreceptores y las neuronas en la retina (que cubren la parte trasera del ojo) determinan lo que vemos, creando las transformaciones que ocurren al comienzo del proceso de la percepción visual.

Por tanto, percibir una escena es el resultado final de un proceso al que se denomina «visión». Este proceso es complejo y consta de diferentes fases, que podemos concretar como sigue: fase óptica (imagen en la retina) + fase fotoquímica (acción de los fotorreceptores) + respuestas eléctricas que se combinan entre sí a lo largo del camino visual hacia el cerebro + fase de interpretación perceptiva.

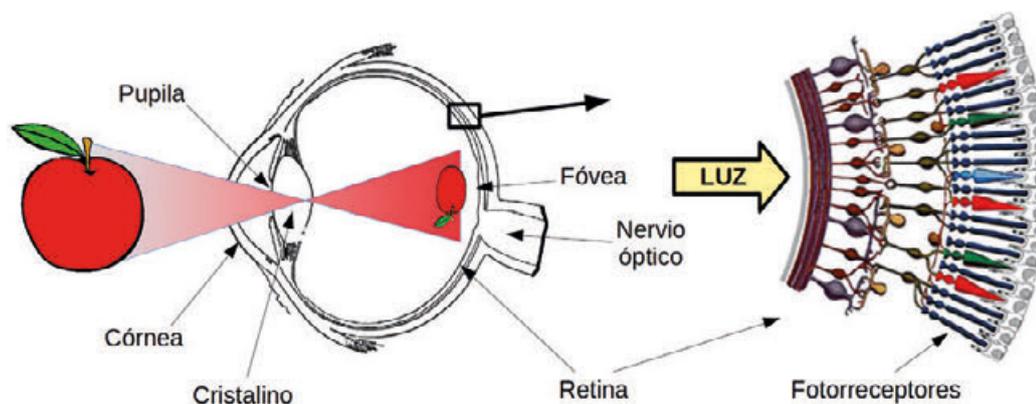


Figura 3
Diagrama esquemático del ojo humano donde se muestra la formación de una imagen en la retina.
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

La formación de imágenes en retina

Los principios de la formación de imágenes por el ojo son bastante similares a los de cualquier sistema óptico, como puede ser una cámara fotográfica, ya que existen elementos formadores de imagen (estructuras que actúan como lentes), elementos reguladores de la cantidad de luz (iris) y elementos receptores de la imagen (retina).

En su camino hasta la retina, la luz tiene que atravesar varios medios: la córnea, la cámara anterior, el cristalino y el cuerpo vítreo. Por otra parte,

en el proceso de la visión, dentro del ojo la luz se refracta, se refleja, se absorbe, se esparce y se difracta.

El ojo humano posee un diámetro aproximado de dos centímetros y medio. Su forma prácticamente esférica se debe al equilibrio de fuerzas que se establece entre la presión interna que ejercen los líquidos internos del ojo (humor acuoso y humor vítreo) y la elasticidad de los medios oculares (fundamentalmente, la esclerótica).

A continuación, vamos a considerar los principales elementos que forman el ojo humano:

- La córnea es la primera lente del ojo humano, tiene forma de menisco, un diámetro de unos 12 mm y un espesor de solo medio milímetro. Es la responsable del 70% del poder refractor del ojo, con una **potencia** fija de aproximadamente 43 dioptrías.
- La cámara anterior es una cavidad de unos 3 mm de espesor que contiene un líquido, denominado «humor acuoso», muy transparente debido a su alto contenido en agua.
- El iris es un diafragma de diámetro variable que permite regular la cantidad de luz que llega a la retina, jugando también un papel muy importante en el enfoque de la imagen.
- El cristalino es una lente de potencia variable que se encuentra detrás del iris y que aporta el 30% restante del poder refractor. Posee un diámetro de unos 10 mm y un espesor de 4 mm en estado relajado. Es capaz de cambiar su forma y, por tanto, su potencia, para poder enfocar en retina objetos situados a distintas distancias (desde los 10-15 cm al infinito, aunque el rango varía de unas personas a otras y va disminuyendo con la edad). Este mecanismo de enfoque del ojo humano se denomina «acomodación». La forma del cristalino cambia gracias a la acción de los músculos ciliares, que con un aumento o disminución de su tensión permiten curvar o aplanar el cristalino.
- La cámara vítrea, también denominada cámara posterior, contiene el último medio ocular, el humor vítreo, que es una masa gelatinosa transparente con un índice de refracción muy parecido al del humor acuoso.

Para poder estudiar la formación de imágenes en el ojo humano, se suelen usar modelos esquemáticos del ojo (como, por ejemplo, el modelo de Le Grand) que representan, desde un punto de vista óptico, los distintos elementos que conforman el ojo (radios de curvatura, espesores, índices de refracción, distancias...). A estos modelos se les aplica la óptica paraxial. Sin embargo, esta no es capaz de predecir las aberraciones ni permite trabajar con elementos que no sean perfectamente esféricos (como son la córnea y el cristalino), ni

con **medios de gradiente de índice** (como el cristalino), ni con el descentramiento de los elementos (como ocurre en el ojo humano), etcétera. Por ello, se hacen necesarios modelos más complejos, los denominados «modelos finitos», en los que utilizando la ley de la refracción se analiza el comportamiento de millones de rayos de luz que entran al ojo humano.

Experiencia 1

En el proceso de la visión, es importante comprender la acomodación que realiza el ojo para enfocar adecuadamente objetos cercanos y lejanos. Normalmente no se es consciente de la labor del cristalino, que está continuamente cambiando su forma y potencia para que podamos ver a distintas distancias. Este mecanismo de enfoque inconsciente funciona tan eficientemente que la mayoría de las personas asumen que todos los objetos, los que están lejos y los que están cerca, están siempre enfocados en la retina. Pero esto no es así. Vamos a comprobarlo en la siguiente experiencia que se propone:

- Con un ojo cerrado o tapado, coge un bolígrafo con tu mano y extiende el brazo (Figura 4A).
- Después, mira un objeto que esté situado a más de 6 m. Cuando estés mirando ese objeto lejano, mueve el bolígrafo hacia ti sin mirarlo (mantén tu enfoque en el objeto que está lejos). Verás el bolígrafo borroso.
- Sigue acercando el bolígrafo hacia ti mientras mantienes tu enfoque en el objeto lejano. Comprueba que verás el bolígrafo cada vez más borroso y doble. Cuando el bolígrafo esté a unos 30 cm de tus ojos, focaliza tu mirada en él y lo verás con nitidez; sin embargo, el punto lejano ahora borroso.
- Después sigue acercando el bolígrafo aún más hacia ti (Figura 4B), hasta un punto en el que, por mucho que te esfuerces, ya no puedas verlo nítido (punto próximo). Notarás el esfuerzo en tus ojos cuando intentas, sin éxito, verlo nítido.



Figuras 4A y 4B

Experiencia 1: posición que deben tener tus manos y brazos para realizar este experimento sobre la acomodación.

Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

Experiencia 2

La parte coloreada del ojo, el iris, es un músculo circular que controla el tamaño de la pupila, es decir, el agujero que deja pasar la luz al ojo.

Cuando hay poca luz, la pupila se dilata para dejar pasar más luz y, por el contrario, cuando hay mucha luz, se contrae para limitar la cantidad de luz que entra, aunque no puede cerrarse completamente.

Por ejemplo, al entrar en una habitación oscura, el ojo responde rápidamente al cambio de iluminación ajustando el tamaño de la pupila. Si se permanece en esa habitación durante algún tiempo, las células sensibles a la luz de la retina también se adaptarán a la poca cantidad de luz, haciéndose más sensibles a ella.



Figura 5

Experiencia 2: utilización en un ojo de un dispositivo que emite luz para visualizar el iris aumentado de tamaño en el otro ojo. Con el ojo no cubierto abierto, otra persona puede comprobar el acto reflejo de ese iris.

Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

El tamaño de la pupila también puede reflejar nuestro estado emocional. El miedo, la alegría y la sorpresa dilatan la pupila. Aunque hay que indicar que el tamaño de la pupila decrece con la edad y su capacidad de reacción es menor al envejecer.

En un sistema visual humano sano existe un «acto reflejo consensuado», es decir, las dos pupilas cambian de tamaño al unísono aunque se estimule solo un ojo. Incluyendo una fuente de luz cuya intensidad se pueda regular (por ejemplo, un led), se podrá analizar la reacción de tu iris al cambiar la intensidad de la luz y podrás comprobar el acto reflejo del iris del otro ojo. Puedes construir un dispositivo con una lente y un espejo, adecuadamente situados, que te permitan ver tu iris más grande, o que otra persona sea quien compruebe ese acto reflejo del iris del ojo destapado.

5 ¿Decide la retina o decide el cerebro? Piensa en el caso de una rana: el inicio del reflejo de lanzar la lengua cuando percibe un insecto cerca, ¿está ligado directamente al procesado visual retiniano?

6 ¿Qué ocurriría si la cámara anterior y la cámara vítrea estuviesen rellenas de aire?

7 ¿Por qué crees que la velocidad de cierre del iris es mucho mayor que la de abertura?

8 Cierra todos los dedos de las manos a excepción de los dos índices, que debes colocar horizontalmente delante de tus ojos, a unos 10 o 15 cm, y separados 1 cm entre sí. En esta posición, observa un punto más alejado de los dedos. ¿De dónde sale esa salchicha flotante? ¿Sabrías explicar el porqué?

La retina

A veces, al comparar el ojo humano con una cámara de fotos, se suele identificar la retina, de forma bastante simplista, la retina con la película fotográfica o con el sensor de una cámara digital. Sin embargo, la retina es mucho más. De hecho, podríamos incluso decir que la retina es una «parte móvil del cerebro», ya que, por un lado, no es propiamente un tejido ocular, sino que es un tejido nervioso y, por tanto, una «extensión cerebral». Por otro lado, además, se mueve al moverse el ojo. La retina no es un órgano pasivo, como lo sería una película fotográfica. Todo lo contrario. En la retina comienza el proceso de analizar activamente la imagen que se forma sobre ella. La retina resalta cierta información e ignora otra, tomando decisiones sobre qué tipo de información es vital para nuestra supervivencia y, consecuentemente, cuál será transmitida a los centros visuales superiores. La información del color, del movimiento y del contraste es analizada por la retina y transmitida como señal neural compleja al cerebro. Por tanto, debido a este complejo procesado neural que realiza la retina, se asume que esta forma parte del cerebro. De hecho, los mismos procesos básicos que se producen en el cerebro ocurren también en la retina.

La retina consiste en un conjunto de capas celulares y capas pigmentadas más una capa con fibra nerviosa (Figura 6). Su espesor varía entre 50 micras (0,05 mm) en el centro de la fovea y 600 micras (0,6 mm) cerca del nervio óptico.

La retina posee, en la parte anterior, una capa de células fotosensibles. Esto obliga a la luz a atravesar las otras capas (**ganglionares, bipolares, horizontales y amacrinas**) antes de incidir sobre estas células, denominadas «fotorreceptores». En la retina humana existen dos tipos de fotorreceptores: los conos (de los que tenemos aproximadamente unos 7 millones) y los bastones (de los que tenemos unos 120 millones), distribuidos de manera heterogénea.

Se puede construir una cadena de procesamiento de la señal en la retina si examinamos las conexiones de los fotorreceptores con las células

bipolares, que, a su vez, están conectadas a células ganglionares que conforman el nervio óptico. Este camino y su convergencia conllevan que la señal de varios fotorreceptores sea comparada y combinada.

El procesamiento específico que ocurre en cada tipo de célula no se conoce por completo, pero es importante tener en cuenta que las señales transmitidas desde la retina a áreas superiores del cerebro, a través de las células ganglionares, no son una simple representación punto a punto de las señales de los receptores, sino unas combinaciones complejas de estas. La red neuronal de la retina es como un «sofisticado ordenador», donde la información procedente de unos 130 millones de fotorreceptores se reduce a la señal de aproximadamente 1 millón de células ganglionares, sin pérdida significativa de información desde el punto de vista visual.

Si se comparan los conos con los bastones, se suele afirmar que estos son más sensibles a la luz que los conos y que, por tanto, son responsables de la visión en condiciones de baja iluminación. Esta diferencia no es debida a las características individuales de unos y otros, que son bastante similares en cuanto a su sensibilidad a la luz, sino al cableado neural. Y es que la red neuronal de los bastones se configura de manera que las respuestas de aproximadamente 100 bastones se combinan entre sí

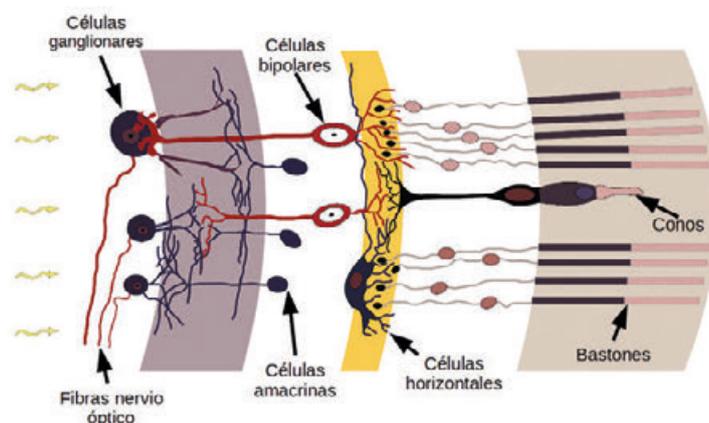


Figura 6
Diagrama esquemático del «cableado» de las células en la retina del ojo humano.

Fuente: *Axial organization of the retina*, Cajal/Anka Friedrich/Chris, Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0 (<https://goo.gl/KxOKu>).

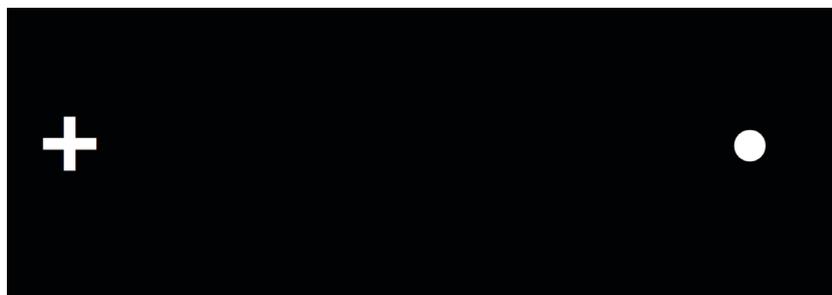


Figura 7

Experiencia 3: comprobación de la existencia del punto ciego en nuestra retina. Cierra tu ojo izquierdo y mira con tu ojo derecho la cruz. Ajusta la distancia de la imagen hasta que desaparezca en tu visión el punto blanco.

Fuente: Javier Hernández Andrés.

en su camino hacia el cerebro. Por tanto, una célula ganglionar recibe la respuesta combinada de aproximadamente 100 bastones, lo que dota a esa agrupación de bastones de una alta sensibilidad a la luz, pero de una baja resolución espacial. Por su parte, los conos, principalmente aquellos situados en la fóvea, tienen una correspondencia uno a uno con las células ganglionares, de manera que una célula ganglionar recibe la respuesta de un solo cono. Esta ausencia de convergencia en la información dota a la fóvea de una gran resolución espacial, pero de una baja sensibilidad a la luz.

¿Sabías que...?

Tu dedo pulgar, con la mano extendida, subtiende aproximadamente un ángulo de 1° , lo que equivale a una pequeñísima parte de todo tu campo de visión. Fuera de ese 1° (lo que ocupa el pulgar) eres «legalmente ciego o ciega», porque tu visión es muy pobre (baja resolución espacial, visión del color reducida, bastantes aberraciones). Pero no tenemos esa sensación, ¿verdad?

Experiencia 3

En la retina hay una zona, denominada «punto ciego», donde no hay fotorreceptores. Esta zona está situada justo donde el nervio óptico sale del globo ocular hacia el cerebro. No nos damos cuenta de su existencia porque el cerebro se encarga de rellenar este punto ciego, complementando la información que le falta para evitar que se produzcan

discontinuidades en la percepción visual. Pero hay una forma sencilla de comprobar que existe:

- Observa la Figura 7 con el ojo izquierdo cerrado o tapado y mirando la cruz con el derecho.
- Acerca o aleja la imagen hasta que el punto blanco deje de verse.

¿Qué crees que está pasando?

Experiencia 4

Nuestra retina posee numerosos vasos sanguíneos, situados delante de los fotorreceptores, que sirven para nutrir a millones de células retinianas. Normalmente no los vemos porque son muy finos y su sombra es estática. El cerebro no es capaz de percibir patrones estáticos, porque, si no, estaríamos viendo continuamente los vasos sanguíneos y otras estructuras fijas; para evitar esto, el ojo realiza continuos movimientos de pequeña amplitud. Entonces, ¿cómo podemos ver los vasos sanguíneos de nuestro ojo? Se puede conseguir de la siguiente manera:

- Cierra los ojos y sitúa una pequeña linterna tocando el extremo de los párpados (Figura 8).
- Mueve suavemente la linterna en círculos.



Figura 8

Con una linterna podrás observar los vasos sanguíneos en tu retina.

Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

- Verás el entramado de vasos sanguíneos que se encuentran en tu retina (Figura 9). Al ser iluminados, proyectan su sombra sobre la retina y, al mover la luz, esas sombras se mueven sobre la retina, por lo que se hacen perceptibles.

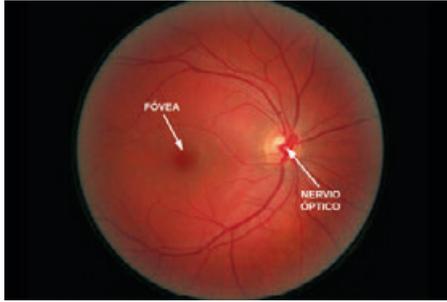


Figura 9
Vasos sanguíneos en una retina humana.
Fuente: *My right eye*, Danny Hope/Brighton & Hove UK, Wikimedia Commons, CC BY 2.0 (<https://goo.gl/zgYfSy>).

Experiencia 5

Por los vasos sanguíneos de nuestra retina fluyen continuamente células de sangre siguiendo el ritmo cardíaco, aproximadamente un millar de células de sangre por milímetro cuadrado. Para percibir su existencia, sigue los siguientes pasos:

- Observa una zona del cielo azul en un día despejado.
- A la vez, siente tu pulso cardíaco mientras sigues mirando. Puedes hacerlo situando tu dedo índice en tu cuello, sobre la carótida. Verás pequeños puntitos que se mueven sincronizadamente con el latido de tu corazón: son las células de sangre de tu ojo, que se desplazan por tu retina.

Visión del color

Una de las características más sorprendentes de nuestra visión es la percepción del color, que aumenta enormemente nuestras capacidades visuales.

A continuación vamos a estudiar el proceso que se desarrolla en nuestro ojo para que dicha percepción se produzca. La primera etapa en nuestra visión del color se debe a la existencia de tres tipos de conos: L, M y S. Con estas tres letras se identifican sus distintas responsabilidades espectrales: los conos L (*long*) se denominan así por ser más sensibles a las largas longitudes de onda del espectro visible; los conos M (*medium*), a las longitudes medias; y los conos S (*short*), a las cortas. En la Figura 10 se muestran sus responsabilidades espectrales relativas, junto con la de los bastones, donde se observa cómo los tres tipos de conos poseen responsabilidades espectrales que se solapan bastante entre sí, a diferencia de lo que ocurre con las responsabilidades espectrales de los sensores de los dispositivos de imagen que usamos a diario (cámaras, escáneres, televisiones, etcétera).

Reflexiona

¿Cómo sería nuestra supervivencia como especie sin esta habilidad?

Otra característica que diferencia a los conos L, M y S es su distribución espacial. En la retina hay muy pocos conos S—y no hay ninguno en la parte central de la fóvea—y existe el doble de conos L que de conos M. En definitiva: la proporción relativa de conos es de aproximadamente 12 L, por cada 6 M y por cada 1 S. Por otra parte, en la

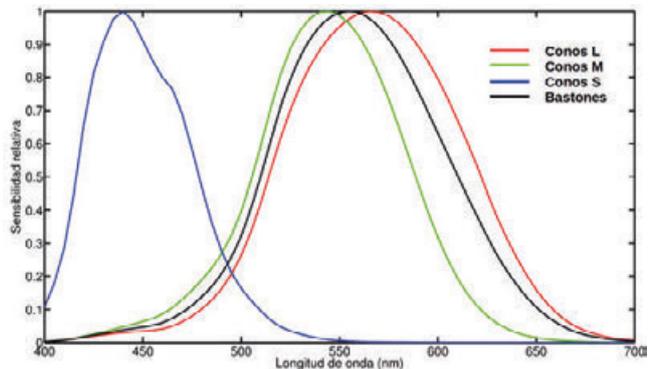


Figura 10
Responsibilidades espectrales relativas de los bastones y de los conos L, M y S.
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

fóvea tampoco hay bastones, lo que provoca que en condiciones de baja iluminación seamos ciegos en esta parte. De hecho, en condiciones de visión nocturna, la imagen de los objetos observados se centra a unos 15° de la fóvea, precisamente donde hay mayor densidad de bastones.

Como hemos visto, lo habitual es tener tres tipos de conos en la retina, por lo que la gran mayoría de la población es tricrómata. Pero, además, hay personas, muy pocas, que son monocrómatas porque en sus retinas solo tienen un tipo de cono: por ello, su percepción visual carece de la sensación de color y todo lo ven en escala de grises. También existen personas dicrómatas, con solo dos tipos de conos en sus retinas: en este caso, poseen cierta visión del color, aunque limitada. Por último, también existen personas sin ningún tipo de conos y que, por tanto, solo tienen bastones en la retina; como consecuencia, su visión es pobre, con baja **agudeza visual** y deslumbramiento.

¿Sabías que...?

¿Qué hay de cierto en el aforismo «De noche todos los gatos son pardos»? Cuando el nivel de iluminación es bajo, los conos no son capaces de excitarse, ya que necesitan un número mínimo de fotones para hacerlo. Por tanto, la única señal que le llegará al cerebro procederá de los bastones. Al haber solo un tipo de bastones en nuestras retinas (a diferencia de lo que ocurre con los conos), el tipo de visión que generará el cerebro será una visión monocrómata, es decir, sin colores.

Saber más

¿Existen personas con cuatro tipos de conos? Existen ciertas evidencias de que algunas mujeres poseen un cuarto tipo de cono, lo que podría proporcionarles una visión tetracromática. Este tema es todavía una incógnita, ya que se ha investigado poco, es difícil encontrar candidatas sospechosas de poseer el cuarto tipo de cono y, además, es difícil evaluar la tetracromaticidad funcional de forma empírica.

Saber más

¿Hay animales con un mayor o menor número de conos? En el reino animal hay una gran variedad de tipos de visión del color, dependiendo del número de tipos de conos. Por ejemplo, los mamíferos suelen ser dicrómatas, al tener dos tipos de conos, siendo incapaces de distinguir algunas tonalidades de rojos con algunas de verdes. Los seres humanos y algunos primates son tricrómatas, al poseer tres tipos de conos. Por otra parte, muchas especies de pájaros, peces, reptiles y anfibios suelen tener más de tres conos y, por tanto, una visión del color mejor que la de los humanos. Por ejemplo, la mariposa papilio posee seis tipos de conos y es posible que posea una visión pentacromática. Por último, cabe destacar el sistema de visión del color más complejo en el reino animal, el de los estomatópodos (como la langosta mantis), que posee hasta doce tipos de conos.

Saber más

El daltonismo... ¿es una cuestión de sexo? El 8% de la población masculina es daltónica, frente a tan solo un 0,5% de la población femenina. ¿Por qué? El daltonismo más frecuente, denominado «daltonismo heredado», está relacionado con una anomalía en un **gen recesivo** ubicado en el cromosoma X. Los hombres tienen un cromosoma X y las mujeres dos; por ello, la forma de heredar, padecer y transmitir el daltonismo es muy distinta en hombres que en mujeres. Hay dieciséis hombres daltónicos por cada mujer daltónica. Para que una mujer sea daltónica tiene que coincidir que el cromosoma X heredado de su padre tenga esa anomalía y el cromosoma X heredado de su madre también la tenga, y esto ocurre con muy poca frecuencia. Además, hay otros tipos de daltonismo, que, al no tener una causa genética, se denominan «daltonismos adquiridos».

Parece ser que en la Segunda Guerra Mundial se utilizaron personas daltónicas para detectar el camuflaje del enemigo, ya que determinados tipos de daltónicos son capaces de distinguir entre pares de colores que para el resto parecen idénticos.

¿Por qué tenemos dos ojos?

¿Para qué tenemos dos ojos? ¿Por qué no existe ningún animal con un solo ojo (salvo algunos pequeños crustáceos)? ¿Por razones estéticas? ¿Por razones de supervivencia? A continuación, comprobaremos que tener dos ojos ofrece muchas ventajas: tenemos un campo de visión más grande; muchas de las capacidades visuales que tenemos mejoran al utilizar los dos ojos; si un ojo falla, el otro sigue funcionando; percibimos la profundidad y, así, podemos estimar distancias...

Experiencia 6

Intenta llevar a cabo tu día a día con un solo ojo. Comprobarás que determinadas tareas aparentemente sencillas se complican. Tápate un ojo y sigue los pasos de los retos que te proponemos: intenta 1) hacer coincidir tus dos dedos índices; 2) insertar un palillo de dientes en una pajita; 3) llenar un vaso con agua de un grifo.

Pero, entonces, si tenemos dos ojos, ¿por qué no vemos doble? Vamos a seguir analizando nuestro sistema de visión para descubrirlo. Los humanos tenemos visión frontal, nuestros ojos están separados unos 6 cm y en ambas retinas se forman dos imágenes bidimensionales con una perspectiva ligeramente diferente. Podemos hacer la prueba: si mientras observamos una escena nos tapamos alternativamente cada uno de los ojos, comprobaremos que no ven exactamente lo mismo uno y el otro.

Saber más

En los vertebrados se observan dos tipos de situación anatómica de los dos ojos (Figura 11):

- Visión frontal (con los ojos dirigidos hacia el frente, como en los seres humanos o en los búhos). En este caso se obtiene un pequeño campo de visión total, pero un gran campo de visión binocular. Este tipo de visión es típica de los

depredadores, para los que es esencial conocer a qué distancia está situada la presa. El gran campo de visión binocular les ayuda en el reconocimiento y localización de objetos, ya que mejora la percepción de la profundidad.

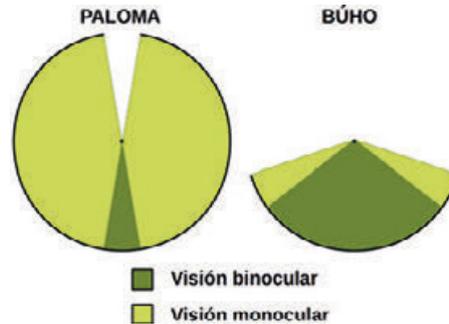


Figura 11 Situación anatómica de los dos ojos en los vertebrados, donde se destaca el campo de visión monocular y binocular. Fuente: Javier Hernández Andrés.

- Visión lateral (con los ojos dirigidos hacia los laterales de la cabeza, como en las palomas o los conejos). Los animales con visión lateral poseen

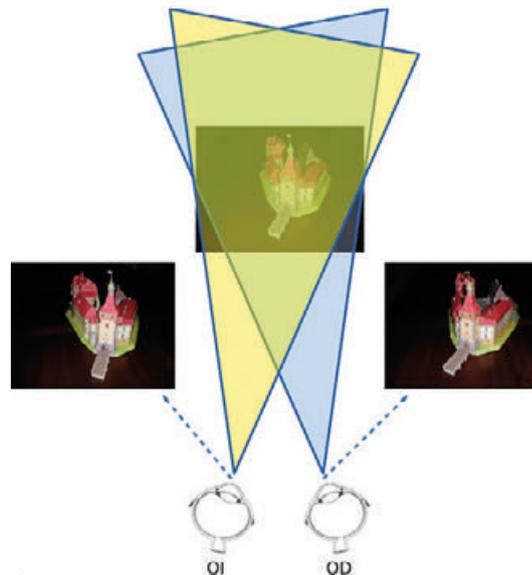


Figura 12 Al estar separados nuestros ojos unos seis centímetros entre sí, cada ojo ve una imagen distinta de un mismo objeto. Posteriormente, el cerebro se encarga de fundir esas dos imágenes retinianas diferentes para producir la sensación de profundidad. Fuente: M.ª Angustias Pérez Fernández.

un campo total de visión enorme, a veces de 360°, pero el área de superposición binocular es muy pequeña. Este tipo de visión es típica en animales que deben detectar la presencia de depredadores.

Sin embargo, el cerebro es capaz de procesar (interpretar) y fundir esas dos imágenes retinianas diferentes y bidimensionales para producir una sola imagen con apariencia tridimensional y sensación de profundidad, que nos permitirá percibir o reconocer objetos y espacios tridimensionales. Esta visión estereoscópica (del griego *estéreos*, ‘sólido’

o ‘corpóreo’, y *skopein*, ‘ver’ o ‘mirar de cerca’) es esencial en nuestra vida cotidiana y en muchas profesiones, como, por ejemplo, la de cirujano, piloto, deportista, etcétera.

Para llegar a la percepción tridimensional del espacio, el cerebro utiliza principalmente la información binocular, aprovechando la disparidad (diferencia) de información entre las dos imágenes retinianas. Sin embargo, incluso observando una escena con un solo ojo, también podemos llevar a cabo tareas que implican la valoración de la proximidad o lejanía de un objeto, o su perspectiva.

Estereoscopios, anaglifos y hologramas

Aun cuando un objeto tenga un cierto relieve, su foto es una imagen plana (bidimensional) y, como tal, carece de la tercera dimensión: la profundidad. En 1838, Charles Wheatstone diseñó un dispositivo, denominado «estereoscopio», que permite observar imágenes con sensación de profundidad usando dos fotos (denominadas «estereogramas») que se toman con una estereocámara (Figura 13).



Figura 13
Ejemplo de una estereocámara: cámara de fotos con dos objetivos que están separados aproximadamente a la misma distancia que hay entre los dos ojos en los humanos.
Fuente: *Kodak stereo camera*, John Kratz, Wikimedia Commons, CC BY-SA (<https://goo.gl/51EJF1>).

También existen otras técnicas para lograr sensación de profundidad, como los anaglifos: usando «gafas rojo-verde» se consigue que a cada ojo llegue solo la imagen correspondiente: la verde o la roja (Figura 14). Sin embargo, estas técnicas ofrecen una única perspectiva. Este inconveniente se solventa con la invención de la holografía en 1947:

la imagen que genera un holograma no solo posee profundidad, sino que también presenta distintas perspectivas y puede disfrutarse con un solo ojo.

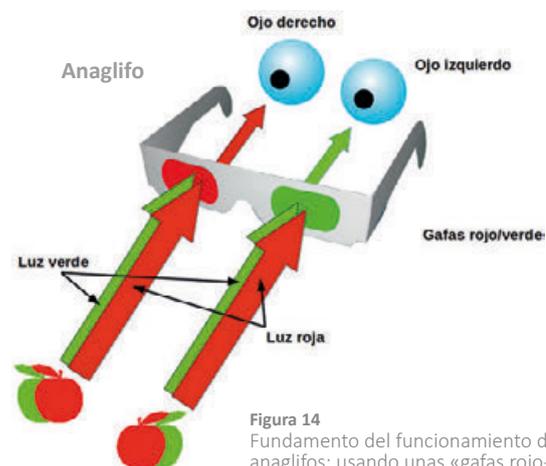


Figura 14
Fundamento del funcionamiento de los anaglifos: usando unas «gafas rojo-verde» se consigue que a cada ojo solo llegue la imagen correspondiente: la verde o la roja.
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

Algo de historia

En el siglo XI, en Persia ya se realizaban operaciones de cataratas, a pesar de que en aquella época se sabía poco acerca de la estructura interna del ojo humano.

¿Y sabías que ya en la Antigüedad se realizaban test de visión? Consistían en reconocer e identificar objetos celestes en el firmamento nocturno, como, por ejemplo, dos estrellas muy juntas. La habilidad para percibir cuán separadas estaban ambas estrellas se consideraba un test cualitativo de buena visión.

Alhacén, matemático, físico y astrónomo (965-1040 d. C.), es considerado como uno de los pioneros en el estudio de la óptica, por sus trabajos y experimentos con lentes, espejos, reflexión y refracción. Asume que la imagen óptica en el interior del ojo se produce de forma similar a la formación de imágenes en una cámara oscura.

¿Sabías que...?

A finales del siglo XIX, el psicólogo californiano G. M. Stratton se preguntó qué pasaría si una persona llevara unas gafas para ver el mundo al revés (en posición invertida o bocabajo) durante suficiente tiempo. Para quien utilizó esas gafas, las primeras sensaciones fueron de desorientación y mareo. Pero después de usar las gafas durante varios días de forma ininterrumpida, ¡oh, sorpresa!, empezó a ver el mundo del derecho. Su cerebro se había adaptado a los cambios, demostrando su versatilidad y flexibilidad.

ENLACES WEB

¿Podremos los humanos llegar a ver en el infrarrojo? (en inglés):

► <https://goo.gl/Ckdo4b>



Retina invertida: ¿anomalía en la evolución? (en inglés). Se suele decir que nuestra retina es invertida porque la luz tiene que atravesar varias capas de neuronas antes de llegar a los fotorreceptores. Hoy en día todavía hay cierta controversia entre los científicos sobre este tema.

► <http://goo.gl/iWKR2s>



La evolución del ojo desde el comienzo de la vida en la tierra, en TED Ed.

► <https://goo.gl/tcmxoD>



¿Por qué vemos «moscas volantes» en nuestro ojo y por qué se pueden observar las células de sangre que pululan por los vasos sanguíneos de nuestra retina?, en TED Ed.

► <https://goo.gl/DZ7S4U>



¿Cómo vemos el color?, en TED Ed.

► <https://goo.gl/clFFQc>



Anatomía de los ojos en el reino animal (en inglés).

► <https://goo.gl/dVXs5W>



Simulación de la visión del color en los humanos (en inglés).

► <https://goo.gl/RBEHOH>



¿Cómo vemos el color? (en inglés).

► <https://goo.gl/UXSNx>



BIBLIOGRAFÍA

- Artigas, J. M.; Capilla, P.; Felipe, A., y Pujol, J. (1995): *Óptica fisiológica. Psicofísica de la visión*. McGraw-Hill Interamericana de España.
- Atchison, D. A. y Smith, G. (2000): *Optics of the Human Eye*. Butterworth-Heinemann.
- Goldstein, E. (2013): *Sensation and Perception*. Cengage Learning.
- Schwartz, S. H. (2009): *Visual Perception: A Clinical Orientation*. McGraw-Hill Professional.

The background of the page features four glass bottles of varying sizes, each containing a different colored liquid. From left to right, the bottles contain blue, yellow-green, red, and teal liquids. The bottles are arranged in a slightly overlapping manner, with the red bottle being the most prominent in the foreground.

Capítulo 8

**El color
de la luz
y los objetos**

*Rafael Huertas Roa
Luis Gómez Robledo*

Introducción

Gracias a nuestro sentido de la vista percibimos el entorno que nos rodea lleno de color. En nuestro día a día (en casa, en el trabajo, en la calle...), estamos habitualmente rodeados de objetos iluminados por alguna fuente de luz: bien sea luz natural o «luz día», bien sea algún tipo de luz artificial. Si nos paramos a pensar, en realidad hay pocas ocasiones en las que no estemos en un entorno con muchos objetos de diferentes formas, tamaños, texturas y colores.

El color que percibimos, tanto en los objetos como directamente en las fuentes de luz, depende en gran medida de las propiedades de esos objetos

y de esas fuentes, pero también de las características de nuestro sistema visual y, en menor medida, de muchos otros factores, como aspectos cognitivos, el nivel de iluminación, etcétera.

Por tanto, si el objetivo de la física es explicar y entender nuestro entorno, no puede estar más justificado el intentar comprender cómo y por qué percibimos el color de los objetos y de las fuentes de luz. En capítulos anteriores ya hemos estudiado muchos de los conceptos que son útiles para poder explicar la percepción del color, y en ellos nos basaremos en este capítulo.

Visión del color

El proceso de la visión se inicia al interactuar la luz con los fotorreceptores situados en la retina del ojo: los conos y los bastones (capítulo 7). La interacción de la luz con los bastones (que ocurre en el rango de iluminación de 10^{-6} hasta 1 cd/m^2) no produce visión del color. Para percibir el color necesitamos que la luz excite los conos, cuyos niveles de umbral y saturación son más altos que en el caso de los bastones (desde 10^{-2} hasta 10^6 cd/m^2). En nuestra vida cotidiana, tanto en la calle con luz natural como en el trabajo o en casa con luz artificial, los niveles de iluminación suelen ser superiores a 1 cd/m^2 , lo que provoca que nuestros bastones estén saturados y que nuestra visión, por tanto, se base únicamente en la respuesta de los conos y podamos percibir el color. También sabemos que en nuestra retina hay un único tipo de bastón, pero tres tipos de conos (L, M y S), por lo que decimos que nuestra visión del color es tricromática. La respuesta de conos y bastones depende de la composición espectral (en longitudes de onda) de la luz incidente sobre la retina.

Pero, para explicar el tricromatismo del ojo humano, no nos podemos quedar solo en lo que ocurre a nivel receptor en la retina. Es necesario conocer

qué ocurre a nivel cerebral con las señales procedentes de los tres tipos de conos. Actualmente, la teoría más aceptada para explicar la visión del color es la de los canales oponentes. Esta teoría postula que las respuestas de los tres tipos de conos se combinan para formar tres canales de visión: uno de luminancia (oscuridad-claridad) y dos

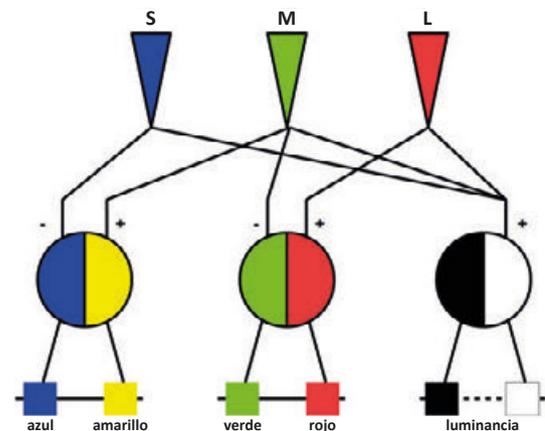


Figura 1
Los tres canales de visión del color.
Fuente: Rafael Huertas Roa.

cromáticos (rojo-verde y amarillo-azul), como se observa en la Figura 1. El procesado de la información de estos tres canales, que ya comienza en la propia retina, finalmente se completa en el cerebro (área visual en el lóbulo occipital del córtex), produciendo la percepción del color.

Llamamos «señal de color» a la luz que, dentro del espectro visible, llega a la retina. Esta luz tendrá una composición espectral determinada, que es la que determinará el color que se percibe. Cuando la señal de color es una luz casi monocromática, el color que percibimos dependerá de su longitud de onda. Si la señal de color está formada por varias longitudes de onda, también percibiremos un único color. Es importante señalar que nuestro sistema visual no es capaz de identificar las frecuencias, o las longitudes de onda, de la luz que le llega, a diferencia de cómo actúa el sistema auditivo con los sonidos, que sí es capaz de diferenciar las distintas frecuencias que forman un sonido (el timbre de los sonidos). El sistema visual funciona de forma diferente al auditivo, ya que integra la señal recibida para dar tres respuestas (de los conos L, M y S), que, tras ser procesadas, dan como resultado la visión de un color.

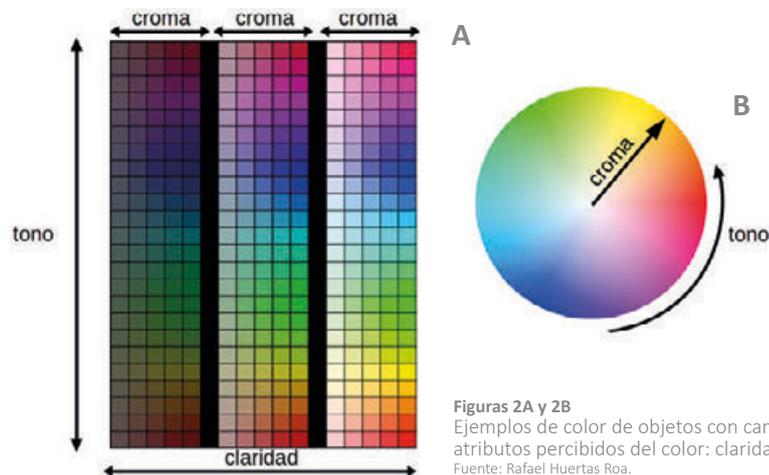
Como consecuencia del tricromatismo, en los colores percibidos podemos distinguir tres atributos: luminosidad o claridad, saturación o croma, y tono. En las Figuras 2A y 2B se muestran distintos colores que se diferencian en uno de estos atributos. En la Figura 2A se pueden ver colores que cambian solo el tono (verticalmente) o solo la claridad (horizontalmente), de los tres grupos donde dentro solo cambia (horizontalmente) el croma. La claridad está relacionada con la luminosidad que percibimos, comparada con un color blanco. En cambio, el croma y la saturación están relacionados con la vivacidad del color. Finalmente, el tono tiene que ver con las diferentes tonalidades: rojo, verde, amarillo, azul... que percibimos. Por todo ello,

para especificar adecuadamente un color, tendremos que utilizar tres números.

En la percepción de nuestro entorno podemos distinguir dos casos generales: que la señal de color consista en la luz proveniente de un objeto (fuente secundaria) o en la luz proveniente directamente de una fuente primaria de luz. El caso más usual es que la señal de color provenga de un objeto, pero también puede provenir de fuentes de luz como, por ejemplo, un semáforo, una pantalla de televisión, de un ordenador o de un móvil, etcétera. Para otras fuentes de luz, como el Sol o las lámparas de iluminación, normalmente no las observamos directamente, porque sufriríamos deslumbramiento y su nivel de iluminación es tan alto que nos podrían producir daños en la retina.

Saber más

Necesitamos tres números para especificar de forma unívoca cualquier color. Estos tres números pueden ser las coordenadas de alguno de los sistemas de apariencia del color (CIELAB, CIELUV, CIECAM, HSI, etcétera). Estas coordenadas están relacionadas con los canales de percepción (luminancia, rojo-verde y amarillo-azul) o bien con los atributos del color que percibimos (claridad, croma y tono).



Figuras 2A y 2B
Ejemplos de color de objetos con cambios en los tres atributos percibidos del color: claridad, croma y tono.
Fuente: Rafael Huertas Roa.

Color de los objetos

En nuestro entorno cotidiano estamos constantemente rodeados de objetos. Para percibir su color, estos han de estar iluminados. Es usual que los objetos se encuentren iluminados por una mezcla de la luz directa de la fuente (natural y/o artificial) y la luz reflejada por otros objetos (paredes, suelo, techo y otros elementos de la escena).

Para la percepción del color de un objeto, necesitamos la concurrencia de tres elementos fundamentales: la luz que ilumina el objeto, el objeto iluminado y un observador. Observa la Figura 3, en la que esto se representa esquemáticamente: la luz, proveniente de la fuente, llega hasta el objeto y, dependiendo del tipo de objeto y de sus propiedades físicas y químicas, parte de la luz se reflejará, otra parte se transmitirá y otra parte podrá ser absorbida. La señal de color estará formada por la luz proveniente del objeto que alcanza el ojo, es decir, la luz de la fuente, bien reflejada o bien transmitida por el objeto y modulada por él.

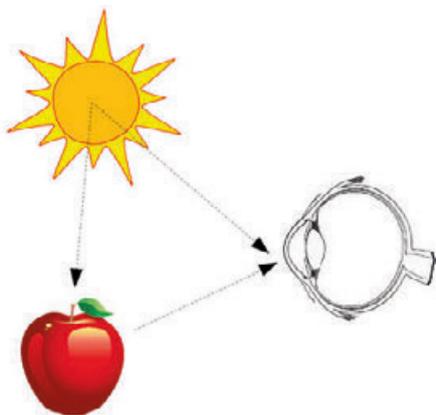


Figura 3
Representación esquemática de los tres elementos fundamentales en la visión del color.
Fuente: Rafael Huertas Roa.

Por tanto, cada color que vemos depende de las propiedades del objeto, pero también de la fuente de luz que lo está iluminando y del observador. Si, por ejemplo, el mismo objeto lo iluminamos con distintas fuentes de luz, su color cambiará, como ocurre en el caso de la luz día a diferentes horas, épocas del año o condiciones atmosféricas, tal y como se puede distinguir en la Figura 4.

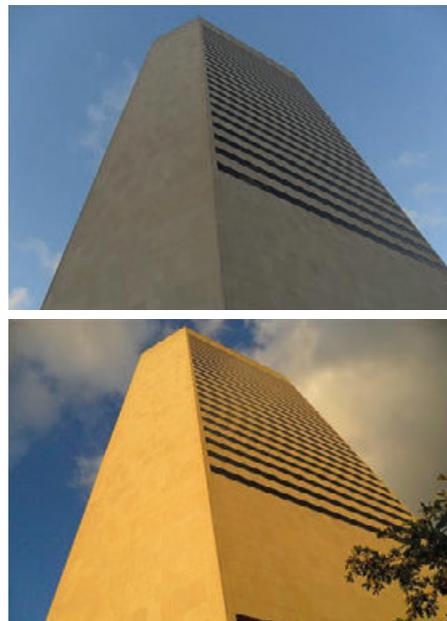


Figura 4
Ejemplo de un objeto iluminado por diferentes fuentes de luz.
Fuente: *Government Center Miami color balance comparison*, Daniel Christensen, Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0 (<https://goo.gl/KxOKu>) y GNU 1.2 (<https://goo.gl/osD8x2>).

En cuanto a la percepción del color, podemos clasificar los objetos como opacos y transparentes, aunque al final del capítulo veremos que, entre estos dos extremos, existe una gran variedad de casos.

¿Sabías que...?

¿De qué color es el caballo blanco de Santiago? ¿Cuántas veces hemos oído esta pregunta y cuántas veces hemos pensado que era fácil de responder? Pues, desengañémonos, la respuesta correcta no es blanco. Los objetos no tienen color. Solemos decir que un caballo es blanco porque bajo la luz diurna lo percibimos como blanco. Sin embargo, si ese mismo caballo estuviese iluminado por una fuente de luz roja, como la que emite un láser o un led, el caballo se vería rojo.

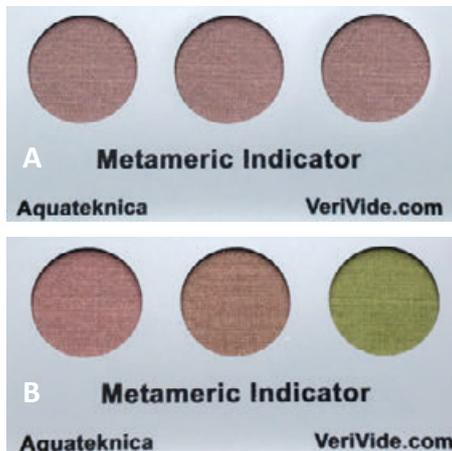
Esta curiosidad nos permitirá entender por qué las fuentes de luz que se utilizan en algunas carnicerías son de luz blanca, pero con un ligero tono rojizo.

De esta forma, la carne tendrá una apariencia más roja y nos parecerá más fresca.

De igual forma, ¿por qué crees que en las pescaderías se usa luz con una cierta tonalidad azulada?

Saber más

Como hemos comentado anteriormente, nuestro sistema visual no distingue la composición espectral de la luz que nos llega. Por ello, puede darse el caso de que, con distintas composiciones espectrales, nuestro sistema visual proporcione una misma respuesta. Siempre que las tres respuestas de los conos sean idénticas, percibiremos el mismo color. Se conoce como «metamerismo» el caso en el que estímulos con diferente composición espectral producen la misma percepción del color. Por ejemplo, nuestro sistema visual no distinguirá entre una luz blanca formada por la mezcla de tres luces monocromáticas (roja, verde y azul) y una luz blanca con un espectro continuo. El caso más común es el metamerismo de objetos, en el que dos objetos son percibidos del mismo color cuando son iluminados por una fuente determinada, pero serán percibidos de un color distinto si se modifica la fuente de luz que los ilumina. Por ejemplo, en la Figura 5A observamos tres objetos que, bajo una fuente de luz D65, tienen el mismo color. En cambio, en la Figura 5B, esos mismos tres objetos se ven diferentes cuando son iluminados por una fuente incandescente.



Figuras 5A y 5B
Ejemplo de muestras metámeras.
Fuente: Rafael Huertas Roa.

Saber más

Como el color percibido en los objetos depende de la fuente de iluminación, se ha definido un índice (entre 0 y 100) para las fuentes de luz que mide cómo se verán los objetos iluminados por dicha fuente. Este índice compara el color de los objetos iluminados por una fuente respecto al color que tendrían cuando son iluminados por luz día (iluminante D65). Este índice es el denominado «índice de rendimiento del color» (Ra). Cuanto mayor es el valor del índice, más parecido es el color de los objetos bajo la fuente y bajo luz día, y se dice que mayor es el rendimiento del color de la fuente.

W	24 W	Ball	
lm	1440 lm	Wattage	20W
T (Kelvin)	2700 K / warm light	Lumen	1133lm
R _a	≥ 80	Life time	10000H (10 Years)*
Light bulb icon	< 1 s	Amalgam	0% Liquid Mercury
Light bulb icon	< 40 s = 60%	Cap	E27
Light bulb icon	no	Dimmable	No
duración/life	10000 h (~ 2,7 h/day)	On/Off	> 30000 times
off ↔ on	30000	Voltage	220-240V (50-60Hz)
Hg	<2.5 mg	Hg	10.5 mg
V · Hz	220-240 V · 50-60 Hz	Kelvin	4000K (Coolwhite)
Operating T°	-10°C ~ +40°C	R _a	> 80
Light bulb icon	E27	Wattage Conversion	Light bulb icon = 5 x Light bulb icon 20W = 5 x 20W
		Lamp life Conversion	Light bulb icon = 10 x Light bulb icon 10.000H = 10 x 1000H

En la Figura 6 podemos ver el índice de rendimiento del color en las etiquetas de algunas lámparas comerciales. En estos dos ejemplos, podemos observar que el índice es mayor de 80, lo que suele ser suficiente para un uso doméstico. Para realizar algunas tareas, como maquillarse, dibujar, pintar o imprimir imágenes..., se necesitan (o se recomiendan) lámparas que tengan un índice cercano a 100. Para la próxima compra de una lámpara, puede resultar útil fijarse en este índice y, así, poder elegir mejor aquella que se necesite dependiendo del uso que se le vaya a dar.

Figura 6
Ejemplos de etiquetas de lámparas comerciales.
Fuente: Luis Gómez Robledo.

Saber más

Cuando queremos expresar el color de una fuente de luz, tradicionalmente, se utiliza la temperatura de color o la temperatura de color correlacionada de la fuente, medida en kelvin. Esa temperatura corresponde a la que tendría que tener un emisor, llamado «cuerpo negro», para que su emisión tuviera el mismo color que la fuente. La composición espectral —y, por tanto, el color de la radiación que emite el cuerpo negro— dependerá de la temperatura a la que este se encuentre. En las etiquetas de las lámparas, el color de la luz emitida por la lámpara viene expresado de esta forma (Figura 6).

Color de objetos opacos

El color de un objeto opaco se obtiene por la interacción entre la luz y la superficie del objeto que recibe la luz. Como resultado, el objeto reflejará parte de la luz que recibe. La claridad de un objeto (Figura 2A) dependerá de la cantidad de luz que refleje, es decir, de su reflectancia (capítulo 3). Además, la reflectancia espectral, es decir, la reflectancia en cada longitud de onda, originará los distintos tonos de color, como podemos observar en la Figura 7.

Así, un objeto que percibimos como rojo reflejará en mayor proporción las longitudes de onda

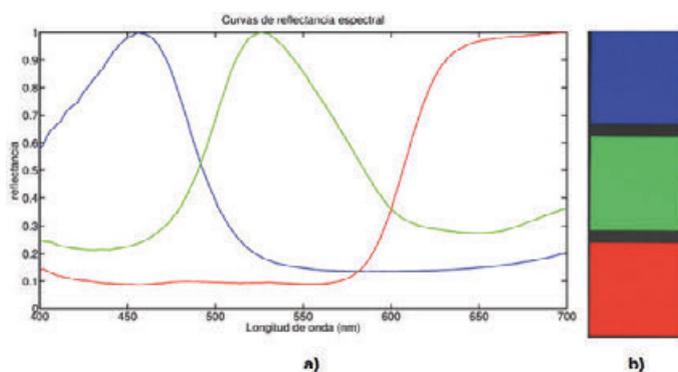


Figura 7

Reflectancias espectrales en a) de los tres objetos mostrados en b). El color de la curva espectral se corresponde con el color del objeto iluminado por una fuente de luz blanca. Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

largas que las cortas. Puede observarse que, normalmente, los objetos reflejan en todo el espectro, no solo en la longitud de onda del color que observamos, pero en distinta proporción. Por otro lado, la luz que no es reflejada será absorbida, por lo que parte de la energía de la luz incidente se transfiere al objeto.

Al objeto que refleja toda la luz que le llega en todas las longitudes de onda se lo conoce como «difusor perfecto», y lo veremos del mismo color que la fuente que lo ilumina (normalmente, blanco, pues las fuentes suelen ser de luz blanca), igual que si observásemos directamente la fuente. Los objetos blancos, como, por ejemplo, un folio, sin llegar a ser difusores perfectos, reflejan prácticamente el 100% de la luz recibida (Figura 8).



Figura 8

Foto de dos difusores perfectos de distinto tamaño. Fuente: Rafael Huertas Roa.

Experiencia 1

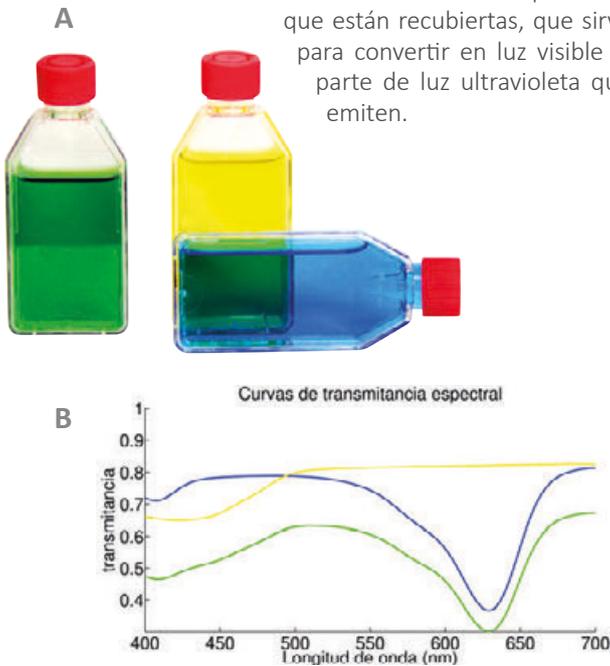
Vamos a realizar un experimento con globos y luz láser. Tenemos tres globos inflados: uno rojo, otro verde y otro blanco, e incidimos sobre ellos con un haz láser verde. ¿Explotarán? ¿Cuál lo hará antes? ¿Por qué? ¿Y si inciéramos con un láser rojo?

La luz que el globo no refleja es absorbida. Así, el globo rojo reflejará, fundamentalmente, las longitudes de onda rojas y naranjas, y absorberá el resto de longitudes de onda: violetas, azules y verdes. Si los iluminamos con un láser verde, el globo rojo absorberá casi toda la luz del láser y, por ello, será más probable que explote que si fuese blanco o verde.

Saber más

Los fenómenos de fluorescencia y fosforescencia que muestran algunos objetos consisten en la reemisión de luz. En el caso de la fluorescencia, el objeto absorbe luz en unas longitudes de onda (generalmente, en la parte ultravioleta del espectro) y la reemite en otras longitudes de onda mayores (usualmente, en la parte visible), sin apenas retardo temporal entre absorción y reemisión. Distintos objetos fluorescentes absorben y reemiten en diferentes rangos de longitudes de onda. En la fosforescencia, por el contrario, la reemisión se prolonga en el tiempo después de haberse producido la absorción. Por otra parte, en este caso, absorción y reemisión pueden tener lugar en las mismas longitudes de onda.

Cuando nos referimos a los tubos «fluorescentes», el nombre se debe al material de este tipo con el que están recubiertas, que sirve para convertir en luz visible la parte de luz ultravioleta que emiten.



Figuras 9A y 9B

Transmitancias espectrales (Figura 9B) de tres líquidos de diferentes colores (Figura 9A). Figura 9A. Mezcla sustractiva del amarillo y del azul. El color de la curva espectral se corresponde con el color del objeto iluminado por una fuente de luz blanca.

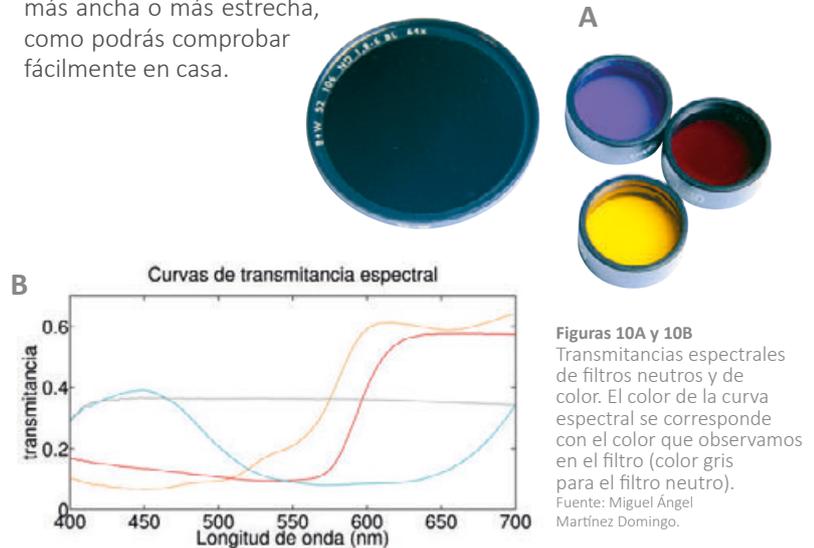
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

Color de objetos transparentes

En el caso de los objetos transparentes (como, por ejemplo, el agua y algunos otros líquidos), parte de la luz se refleja en la superficie de separación entre el objeto y el medio circundante, y el resto se transmitirá a través del objeto, donde la luz se absorberá y dispersará en mayor o menor medida dependiendo de cada longitud de onda.

Para los objetos transparentes, se define la transmitancia y la transmitancia espectral de forma análoga a la reflectancia. La transmitancia es el cociente entre la luz que atraviesa el objeto y la luz que incide. Cuanto más baja sea la transmitancia, más oscuro veremos el objeto. Por otra parte, cuando la transmitancia se define para cada longitud de onda, se conoce como «transmitancia espectral». El color que observamos en el objeto dependerá de qué longitudes de onda atraviesen el objeto con más intensidad (Figuras 9A y 9B).

Para los objetos transparentes, el color percibido será una mezcla del color del objeto (dependiendo de la fuente que lo ilumine) con el color del fondo donde se encuentre (pared, estantería, etcétera). Para estos objetos, el color también dependerá del espesor del objeto, ya que la absorción de la luz dentro del mismo dependerá del camino recorrido por la luz en su interior. Así, por ejemplo, un mismo líquido tendrá distinto color si lo observamos en una botella más ancha o más estrecha, como podrás comprobar fácilmente en casa.



Figuras 10A y 10B
Transmitancias espectrales de filtros neutros y de color. El color de la curva espectral se corresponde con el color que observamos en el filtro (color gris para el filtro neutro).
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

Un caso particular de objetos transparentes son los filtros. Los filtros tienen unas transmitancias espectrales determinadas, dependiendo de la aplicación para la que se utilicen. Los filtros que limitan todas las longitudes de onda por igual se conocen como «filtros neutros». Se dice que tienen distinta densidad óptica dependiendo de su transmitancia: cuanto menor sea la transmitancia, más densos son (la «densidad óptica» o «absorbancia» se define como el logaritmo decimal del inverso de la transmitancia). También existen filtros de distintos tonos, que, selectivamente, transmiten más unas longitudes de onda que otras (Figuras 10A y 10B).

Si hacemos pasar la luz proveniente de cualquier fuente por distintos filtros (por ejemplo, luz blanca), obtendremos luz de diferentes colores. Este fenómeno se conoce como «mezcla sustractiva de color», ya que cada filtro va restando luminosidad al color final. En la Figura 9A puede observarse la mezcla sustractiva del amarillo y del azul.

Los filtros utilizados para obtener nuevos colores se conocen como primarios. Los primarios que se utilizan normalmente en las mezclas sustractivas

son el cian, el amarillo y el magenta, ya que la gama de colores que puede obtenerse mediante la mezcla sustractiva de ellos es mayor. La mezcla de los tres colores primarios en la proporción adecuada como resultado el color negro (Figura 11). Este fenómeno es utilizado por las impresoras y, también, cuando dibujamos (con ceras o pinturas), ya que al pintar vamos superponiendo los colores. En estos casos, la luz va desde la fuente de luz hasta el papel, donde se refleja y vuelve, por lo que atraviesa cada filtro (tinta) dos veces.

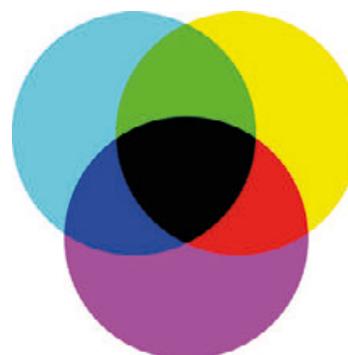
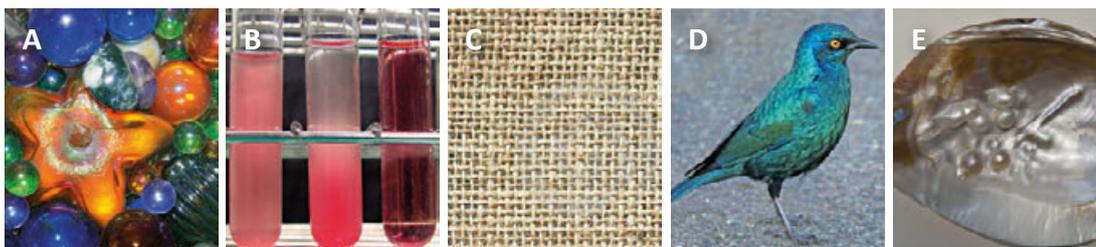


Figura 11
Mezclas sustractivas de los colores primarios cian, amarillo y magenta.
Fuente: Rafael Huertas Roa.

Características que influyen en el color

Entre objetos totalmente opacos y objetos completamente transparentes hay una gran variedad de casos con distintos grados de transparencia. Se conoce como «translúcidos» a aquellos objetos

que no son ni opacos ni transparentes. El fenómeno, que se conoce como **translucencia**, afecta considerablemente a la apariencia percibida del objeto.



Figuras 12A, 12B, 12C, 12D y 12E

Fotos de objetos con brillo, translucencia, textura, iridiscencia y opalescencia.

Fuente: Figura 12A. *Marbleousll*, Michael Summers, Flickr, CC-BY-NC-ND 2.0 (<https://goo.gl/cefU8>). Figura 12B. *Hemolysis*, Y tambe, Wikimedia commons, CC BY-SA 3.0 (<https://goo.gl/qxo2lK>) y GNU 1.2 (<https://goo.gl/YlhFwg>). Figura 12C. Rafael Huertas Roa. Figura 12D. *Cape Glossy-Starling (Lamprotornis nitens)*, Dick Daniels (<http://goo.gl/Q2wVrU>), Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0 (<https://goo.gl/qxo2lK>) y GNU 1.2 (<https://goo.gl/YlhFwg>). Figura 12E. *Mother of pearl with accrued pearls*, Hannes Grobe/AWI, Wikimedia Commons, CC BY 3.0 (<https://goo.gl/birw5k>).

Además de la opacidad de los objetos, existen también otras muchas características que influyen en el color que percibimos, como el **brillo** (entendido como lo contrario a «mate»), la translucencia, la **opalescencia**, la iridiscencia o la textura, como podemos ver en las Figuras 12A a 12E.

Por tanto, en la percepción del color de los objetos van a influir fundamentalmente las propiedades del objeto (reflectancia o transmitancia espectral), la fuente de luz con la que se iluminen (distribución espectral de potencia) y el observador (sensibilidad espectral de los conos). Pero otros muchos aspectos también influyen en la apariencia final del color observado.

Además de las propiedades comentadas (brillo, opalescencia, iridiscencia, textura...), influirá si el color es observado de forma aislada (color no relacionado) o rodeado de otros colores (color relacionado). E influirán también otros factores, como el fondo, el nivel de iluminación, aspectos de constancia del color, elementos cognitivos (si el observador conoce ese objeto al haberlo visto en otros entornos), etcétera, que se analizarán en el capítulo 10.

¿Sabías que...?

Un mismo color, pero con un diferente nivel de brillo, translucencia, textura, etcétera, será percibido de forma muy diferente. Por ejemplo, en el caso del brillo, tendemos a relacionarlo con las propiedades de la superficie y lo preferimos en ciertos objetos (como, por ejemplo, las carcasas de teléfonos móviles), pues nos dan la sensación de ser superficies más duraderas.

Saber más

¿De qué color es el cielo? Podemos calificar el cielo como un objeto transparente y, por tanto, decimos que vemos el color de la luz que lo atraviesa. Esto es lo que ocurre cuando miramos directamente (con la protección adecuada) al Sol. Cuando está en el cenit, vemos un color blanco, o «blanco amarillento», porque predomina el

amarillo, como corresponde a la distribución espectral de potencia de la luz solar. Si no hubiera atmósfera, salvo este cono de luz proveniente del Sol, veríamos de color negro el resto de la bóveda celeste.

La atmósfera terrestre está constituida por moléculas de N, O, CO₂ y otros gases, así como por partículas sólidas y líquidas (polvo, polen, gotas de agua, etcétera). La luz proveniente del Sol, al atravesar la atmósfera terrestre, interacciona con estas moléculas y partículas, produciéndose un fenómeno conocido como «difusión» o «esparcimiento», que consiste en la absorción de la luz por esas moléculas y partículas, y su reemisión en todas las direcciones.

Cuando el tamaño relativo de las partículas es pequeño con respecto a la longitud de onda de la luz (λ), como ocurre en un día despejado, la luz de longitudes de onda cortas (violeta y azul) se dispersa mucho más, lo que se conoce como «dispersión de Rayleigh». Este esparcimiento es proporcional a λ^{-4} . Si consideramos este fenómeno y nuestra mayor sensibilidad para el azul que para el violeta, fuera de la trayectoria recta de propagación de la luz del Sol, el color que observaremos será el azul.

Por tanto, la luz directa que viene del Sol, a medida que va atravesando la atmósfera, irá perdiendo componente azul, mientras que la componente roja permanecerá. Esta es la causa del color rojizo del Sol en el ocaso o al amanecer, ya que en ese momento la luz del Sol atraviesa un mayor espesor de la atmósfera hasta llegar a nuestros ojos y el efecto es mucho más acentuado.

Cuando el tamaño relativo de las partículas y moléculas, respecto a λ , es mayor (como ocurre con las gotas de agua en un día nublado, o de las nubes), todas las longitudes de onda se dispersan por igual (por lo que no cambia el color de la luz esparcida), lo que se conoce como «dispersión de Mie». Entonces, dependiendo de la concentración de gotas de agua que haya en la atmósfera o en la nube, se producirá más o menos esparcimiento y el color irá desde el blanco hasta el gris oscuro casi negro cuando la luz que incide es blanca. En el atardecer o amanecer se adquirirán tonos rojizos, ya que así es la luz que llega.

Experiencia 2

Vamos a simular nuestra propia atmósfera. Para ello, necesitamos una cubeta que llenaremos de agua (aunque, si dispusiésemos de un acuario, sería perfecto). Simularemos las pequeñas partículas que producen la dispersión de Rayleigh añadiendo leche desnatada al agua (habrá que ir añadiéndola, muy poco a poco, con un cuentagotas, y después remover muy bien). Las moléculas de la leche esparcirán la luz de forma similar

a como lo hacen las moléculas de la atmósfera. Después, lo iluminaremos con un foco de luz blanca (una lámpara incandescente no es lo más adecuado en este caso por su pequeña emisión en los azules) y observaremos desde distintas posiciones. Si miramos la cubeta en dirección perpendicular al foco, observaremos la luz más azulada. Y donde la cubeta sea más ancha, percibiremos la luz más rojiza. También podemos simular un mayor espesor de la atmósfera haciendo que la concentración de moléculas sea mayor, es decir, añadiendo más leche.

Color de fuentes de luz

En capítulos anteriores hemos estudiado, analizado y caracterizado las diferentes fuentes de luz según su distribución espectral de potencia. Dependiendo de esta distribución, podemos distinguir entre fuentes de luz casi monocromáticas y fuentes con emisión en todo el espectro visible.

Las fuentes de luz que utilizamos para iluminar objetos, normalmente, son de este último tipo, para intentar observar los objetos con un color parecido al que vemos cuando están iluminados por la luz día. Si observamos directamente estas fuentes de luz, incluyendo la luz día, veremos un color cercano al blanco, con tonos azulados, amarillentos o rojizos, dependiendo de en qué parte del espectro tengan más emisión. Si miramos directamente una fuente de luz, la señal de color estará formada por la luz directa de la fuente, que alcanzará los conos de la retina.

Asimismo, podemos superponer, en el espacio y/o en el tiempo, la luz proveniente de distintas fuentes, especialmente en el caso de fuentes de luz no blanca. El resultado será la observación de un color nuevo, resultado de la mezcla (denominada «aditiva», porque con cada fuente que añadimos obtenemos un color más luminoso).

Las fuentes de luz que mezclamos se conocen como colores primarios. Tradicionalmente, los colores primarios de las mezclas aditivas son el rojo,

el verde y el azul, ya que permiten obtener mayor cantidad de colores como mezcla de ellos tres. Si mezclamos los tres colores primarios en la proporción adecuada, obtenemos el color blanco (Figura 13). Este fenómeno es el que se utiliza para generar los colores en un monitor o pantalla (de televisión, ordenador, teléfono móvil, etcétera), o en cañones de proyección.

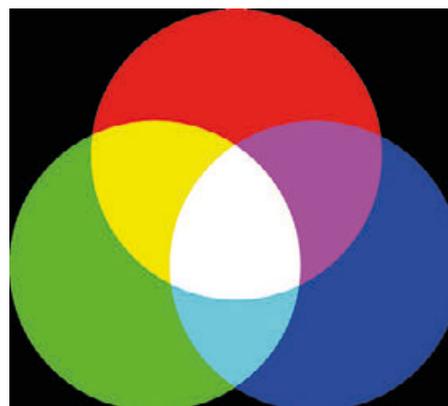


Figura 13
Mezclas aditivas espaciales de los colores primarios rojo, verde y azul.
Fuente: Rafael Huertas Roa.

Experiencia 3

Mira con un microscopio (o con una simple lupa) la pantalla de un teléfono móvil. Se puede observar

cómo está formada por pequeños píxeles, cada uno de los cuales emite luz roja, verde o azul. La combinación de la cantidad adecuada de rojo, verde y azul da lugar a todos los colores que vemos en la pantalla. ¿Por qué crees que un fondo blanco es el que más energía consume?

Experiencia 4

Mediante linternas y utilizando filtros que pueden construirse con papel celofán de diferentes colores, podemos crear mezclas aditivas espaciales como las mostradas en la Figura 13. También podemos crear mezclas aditivas temporales mediante un disco pintado con los colores primarios. El área de cada color será la proporción de primario que utilizamos en la mezcla. Haciendo girar el disco a gran velocidad, observaremos un nuevo color resultado de la mezcla aditiva temporal (Figura 14).



Figura 14

Mezcla aditiva temporal de seis primarios en la misma proporción. El resultado es el color blanco. Un disco con este diseño se conoce como «disco de Newton». Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo (<https://goo.gl/pl1rxj>).

Saber más

Según hemos comentado anteriormente, necesitamos tres números para poder especificar unívocamente un color. Los valores triestímulo son una de las formas más universales de especificar el color de un objeto, ya sea opaco o transparente, o de una fuente de luz. Están definidos por las siguientes expresiones:

$$X = k \int_{vis} R(\lambda)P(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \quad X = k \int_{vis} R(\lambda)P(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda$$

$$Y = k \int_{vis} R(\lambda)P(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \quad Y = k \int_{vis} R(\lambda)P(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda$$

$$Z = k \int_{vis} R(\lambda)P(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \quad Z = k \int_{vis} R(\lambda)P(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda$$

$$k = 100 / \int_{vis} P(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \quad k = 100 / \int_{vis} P(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda$$

donde k es una constante de normalización, $R(\lambda)$ es la reflectancia o transmitancia espectral del objeto, $P(\lambda)$ es la distribución espectral de potencia de la fuente y $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ y $\bar{z}(\lambda)$ son las llamadas «funciones de mezcla», determinadas por la sensibilidad espectral de los conos del observador. El producto espectral de $R(\lambda)$ y $P(\lambda)$ se denomina «señal de color». Podemos comprobar cómo, en la definición, están recogidos los tres elementos comentados en la Figura 3.

En el caso de las fuentes de luz, para el cálculo de los valores triestímulo, la reflectancia o transmitancia espectral $R(\lambda)$ se elimina de las ecuaciones, por lo que la señal de color estará formada únicamente por la distribución espectral de potencia de la fuente $P(\lambda)$.

Los valores triestímulo XYZ utilizados para la especificación de un color representan la cantidad de cada uno de los tres colores primarios necesaria para obtenerlos mediante una mezcla aditiva. Distintos sistemas de valores triestímulo tienen diferentes primarios. Los más conocidos son los sistemas CIE RGB y CIE XYZ.

ENLACES WEB

What color is it?,
por Andrew T. Young
(en inglés):
► <http://goo.gl/IBIE1M>



Color matching (en inglés):
► <http://goo.gl/JVIOIS>



*Frequently asked questions
about color*, por
Charles Poynton (en inglés):
► <http://goo.gl/By3HEe>



¿De qué hablamos cuando
hablamos de espacio de
color y de un perfil de color?
► <http://goo.gl/ehkzT>



Mezclas aditiva y sustractiva
simuladas en Adobe
Photoshop, por Aitor
Larumbe Zabala:
► <https://goo.gl/LuNh7s>



Iridescent clouds (en inglés):
► <http://goo.gl/YEQWmM>



IRIS software © 2002
Les Cowley (en inglés):
► <http://goo.gl/evJswk>



Diffraction and interference
(en inglés):
► <http://goo.gl/csWp1T>



Tutorial *Gestión de color*,
por Manuart:
► <http://goo.gl/X2raud>



*The Sci Guys: Science at
home (SE2, EP14: Newton's
disc)* (en inglés):
► <https://goo.gl/8k9wQQ>



*La radiación del cuerpo
negro*:
► <http://goo.gl/VR9La>



¿Por qué el cielo es azul?
Dispersión de Rayleigh:
► <http://goo.gl/rCZxta>



BIBLIOGRAFÍA

- Berns, R. S. (2000): *Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology*. Wiley.
- Fairchild, M. D. (2005): *Color Appearance Models*. Wiley-IS&T Series in Imaging Science and Technology (Chichester).
- Ohta, N. y Robertson, A. (2005): *Colorimetry. Fundamentals and Applications*. Wiley.



Capítulo 9

Problemas visuales

*José Antonio García García
M.º Angustias Pérez Fernández*

Introducción

Como hemos podido ver en capítulos anteriores, nuestro sistema visual es muy complejo, pues son muchos los elementos que participan en él. En primer lugar, el ojo como sistema óptico debe formar la imagen del objeto que observamos sobre la retina, incluso cuando cambia la distancia a la que está el objeto. El cristalino es el órgano encargado de mantener la imagen nítida cuando se modifica la distancia del objeto observado, y lo hace por medio de un proceso denominado «acomodación». Además, las imágenes de un mismo objeto formadas en las retinas de ambos ojos deben ser similares para que el cerebro pueda fusionarlas y obtener así una visión estereoscópica. Por otra parte, los ojos están en continuo movimiento, lo que nos permite centrarnos sobre determinados puntos del objeto para percibir sus detalles. Y es importante destacar que estos movimientos deben ser coordinados; la falta de coordinación hace imposible una visión binocular correcta.

Si todos estos procesos funcionan adecuadamente, tendremos una buena visión. Sin embargo, si alguno no se desarrolla de manera correcta, el resultado será una mala visión, con la posible aparición de una sintomatología que, a veces, incapacita para trabajos que necesiten visión de lejos o de cerca.

Los problemas visuales se pueden clasificar desde distintos puntos de vista. Una de las clasificaciones más habituales se realiza atendiendo al proceso responsable de la anomalía. Así, si lo que no funciona correctamente es el ojo como sistema óptico y, por tanto, no forma una imagen nítida del objeto sobre la retina, se habla de «anomalías refractivas». Si lo que no funciona adecuadamente es el proceso de acomodación, hablamos de «anomalías acomodativas». Y, de forma análoga, si el problema se encuentra en los movimientos oculares o en la coordinación entre ambos ojos, hablamos de «anomalías oculomotoras» o «anomalías binoculares», respectivamente.

En este capítulo comentaremos brevemente los distintos problemas visuales, tanto los refractivos como los acomodativos, oculomotores y binoculares. Los primeros se incluyen en los currículos de las enseñanzas medias, y suelen ser más conocidos y estar más vigilados. En cambio, los segundos suelen ser más desconocidos y, de hecho, no se contemplan en las revisiones visuales para escolares, con las graves consecuencias que esto puede suponer para quien los padece. Asimismo, se hará una breve descripción de los problemas de procesamiento visual de la información.

Problemas refractivos

Los problemas refractivos se producen cuando la retina no forma correctamente la imagen del objeto observado. El objeto se verá desenfocado o con falta de nitidez.

Según esto, el ojo emétrope es aquel que consigue el enfoque en retina para cualquier objeto y a cualquier distancia dada (Figura 1). Los rayos luminosos, que penetran en el ojo a través de la pupila, forman la imagen del objeto observado sobre la retina. Esto depende en gran medida de la longitud del **eje axial** o antero posterior del ojo. Si el eje axial es grande para la potencia del sistema

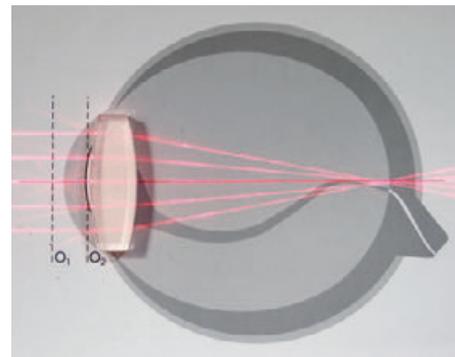


Figura 1
Ojo emétrope.
Fuente: José Antonio
García García.

óptico, formado principalmente por córnea y cristalino, la imagen se formará delante de la retina. En cambio, si el eje axial presenta poca longitud para la potencia del sistema óptico, la imagen se formará detrás de la retina.

Por otra parte, el ojo amétrope es aquel que no consigue una imagen nítida de un objeto de lejos y/o de cerca, o que necesita hacer uso de la acomodación para enfocar objetos lejanos. En el ojo amétrope, la imagen de los objetos no focaliza en la retina. Si se producen estas circunstancias, decimos que la persona es amétrope o que presenta un defecto refractivo, que puede ser miopía, hipermetropía o astigmatismo.

El ojo miope presenta una potencia excesiva con respecto a su eje axial y, por tanto, la imagen se forma delante de la retina (Figura 2). Los objetos lejanos no se verán con nitidez, manteniéndose la visión de cerca en función del punto remoto que presente según su **ametropía**. Por esta razón, existe la creencia de que un ojo miope es un ojo grande, cuando realmente lo que define su estado refractivo es la relación entre el poder refractivo del ojo y su eje axial.

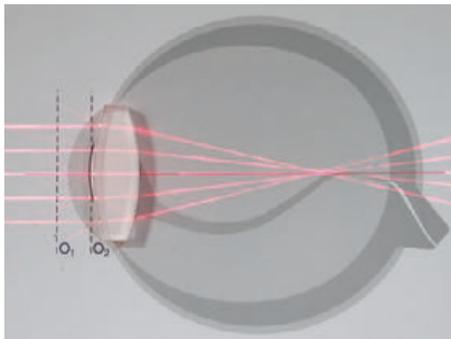


Figura 2
Ojo miope.
Fuente: José Antonio
García García.

El ojo hipermétrope es poco potente con respecto a su eje axial, y la imagen se forma detrás de la retina (Figura 3). A veces, los niños hipermétropes se aproximan en exceso a lo que están leyendo o viendo de cerca para magnificar la imagen. El hipermétrope leve puede ver nítido de lejos y de cerca haciendo uso de la acomodación, que solo debería utilizarse para enfocar objetos en visión cercana, lo que le produce cierto cansancio o malestar.

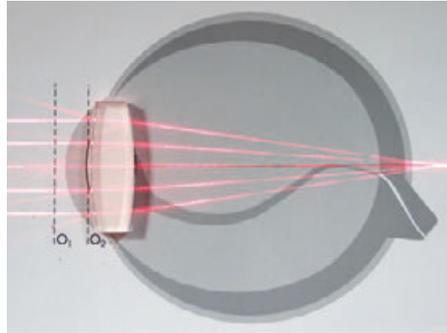


Figura 3
Ojo hipermétrope.
Fuente: José Antonio
García García.

Cuando la córnea (primera superficie refractiva del ojo) no presenta una forma esférica, nos encontramos con un astigmatismo (Figura 4).

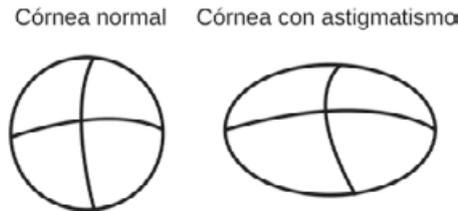


Figura 4
Simulación de una córnea esférica y con astigmatismo.
Fuente: M.ª Angustias Pérez Fernández.

En el astigmatismo, al haber dos radios corneales diferentes, habrá también dos focos imagen (Figura 5). Uno de los focos puede coincidir con la retina y el otro, estar por delante (astigmatismo miópico) o por detrás de ella (astigmatismo hipermetrópico). En ambos casos nos encontramos con un astigmatismo puro. También se puede dar el caso de que ambos focos estén fuera de la retina.

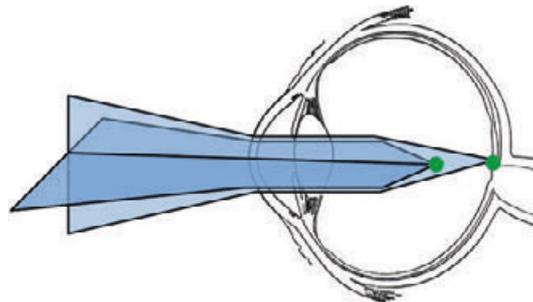
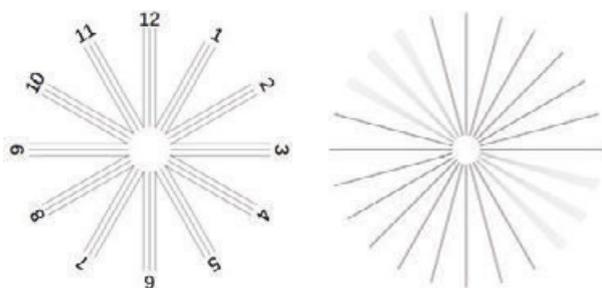


Figura 5
Ojo con astigmatismo.
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

¿Sabías que...?

Es creencia popular que el Greco pintaba la figura humana muy estilizada porque padecía astigmatismo, pero esto no es correcto, ya que la figura y su representación a través de la pintura tendrían que ser percibidas por el pintor con las mismas dimensiones. Parece ser, más bien, por una razón estética o religiosa, ya que representar figuras estilizadas suele ser una forma gráfica de transmitir una mayor espiritualidad.

Uno de los métodos para poner de manifiesto el astigmatismo es por medio del círculo horario (Figura 6A). Sin astigmatismo se verán iguales todas las líneas del círculo horario. El astigmata verá mejor unas líneas que otras debido a que presenta dos superficies refractivas diferentes (Figura 6B).



Figuras 6A y 6B
Figura 6A. Círculo horario.
Figura 6B. Simulación de la visión de una persona con astigmatismo.
Fuente: M.^a Angustias Pérez Fernández.

El propio peso del párpado origina que el radio de curvatura no sea igual en todas las direcciones, dando lugar al astigmatismo fisiológico, que está entre 0.25 y 0.50 dioptrías. Lo presenta un alto porcentaje de la población, pero no se considera significativo y no se suele compensar.

Por otra parte, si un sujeto no presenta el mismo estado refractivo en ambos ojos, se dice que tiene una **«anisometropía»**. Esta condición, a veces, dificulta la fusión de las imágenes y puede dar lugar a una **ambliopía** u **ojo vago** (falta de agudeza visual que no mejora con refracción).

La presbicia o vista cansada no se considera un error refractivo. Aparece alrededor de los 40 años como consecuencia de la pérdida de elasticidad

del cristalino, que le permitía modificar su potencia y conseguir enfocar objetos cercanos, por lo que estos aparecerán poco nítidos. Es algo progresivo y, alrededor de los 60 años, la persona necesitará una adición de +3.00 dioptrías para poder leer.

Los errores refractivos se compensan con lentes oftálmicas o con lentes de contacto que hacen que el foco imagen caiga sobre la retina. La miopía se compensa con lentes negativas o lentes divergentes que restan potencia al sistema (Figura 7).

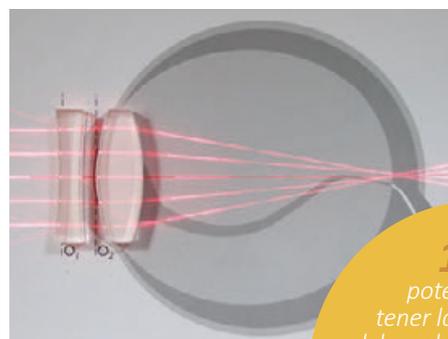


Figura 7
Ojo miope compensado.
Fuente: Miguel Ángel Martínez Domingo.

1 ¿Qué potencia debe tener la lente que se debe colocar a un miope cuyo punto remoto está a 1 m a la izquierda del ojo? Recuérdese lo visto en el capítulo 4 y, en concreto, en la ecuación 7.

En cuanto a la hipermetropía, se compensa con lentes positivas o lentes convergentes que dan potencia al sistema (Figura 8).

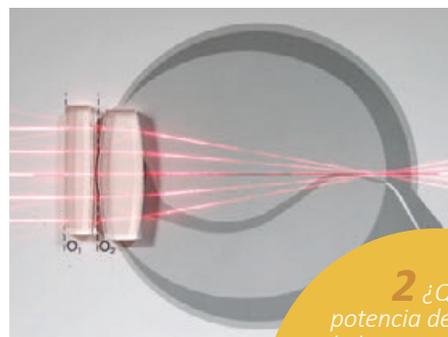


Figura 8
Ojo hipermetrope compensado.
Fuente: José Antonio García García.

2 ¿Qué potencia debe tener la lente que se debe colocar a un hipermetrope cuyo punto remoto está a 1 m a la derecha del ojo? Recuérdese lo visto en el capítulo 4 y, en concreto, en la ecuación 7.

Y, por último, el astigmatismo se compensa con lentes cilíndricas (Figura 9).

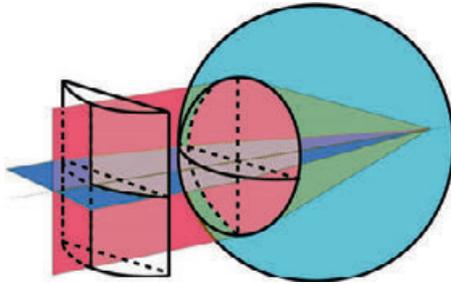


Figura 9
Ojo con astigmatismo compensado.
Fuente: José Antonio García García.

En definitiva, con la lente que colocamos delante del ojo, conseguimos que la potencia total del sistema constituido por la lente y el ojo sea tal que un objeto lejano forme su imagen en la retina. Ahora bien, tal y como vimos en el capítulo 4, la potencia total de un sistema compuesto por dos ojos depende de la potencia de cada uno de

ellos, pero también de su distancia de separación. Por esta razón, cuando utilizamos gafas y lentes de contacto para compensar la miopía o la hipermetropía, podemos observar que la potencia de ambas no es la misma. Se puede comprobar lo indicado simplemente acercando o retirando ligeramente las gafas mientras observamos un objeto lejano.

¿Sabías que...?

En el siglo XIV se comenzaron a compensar los errores refractivos por medio de lentes oftálmicas. En aquella época se hacía a través del método de ensayo error. Posteriormente, el procedimiento para medir el error refractivo se perfeccionó, cuantificándolo para encontrar la lente adecuada para cada persona.

3 Si a un miope de -3.00 D le pusieramos en sus gafas una compensación de -4.00 D , ¿qué ocurriría?

Problemas visuales que pueden interferir en el aprendizaje en la etapa escolar

Si bien padecer un determinado problema visual es perjudicial para nuestra vida diaria, aún lo es más en el caso de niños en edad escolar, ya que si el niño tiene una visión no confortable, por ejemplo, puede hacer que abandone sus tareas escolares, con la repercusión que esto puede tener en su vida futura. Por otra parte, conocer y tratar estos problemas en edades tempranas va a implicar que las soluciones sean mucho más eficaces por la plasticidad que a esas edades tiene el sistema visual. Por todo ello, en adelante nos centraremos en este tipo de disfunciones.

El aprendizaje se produce por medio de una serie de procesos complejos e interrelacionados, donde la visión juega un papel importante. En la edad escolar, la atención y la respuesta a las necesidades escolares dependen, en gran medida, de la visión. Pero una visión eficiente no depende únicamente del estado refractivo del ojo (miopía,

hipermetropía o astigmatismo). El sistema visual es complejo, y existen otros aspectos de la visión que afectan a las habilidades que el niño necesita para el completo desarrollo de sus actividades escolares y, en general, de la vida diaria.

El sistema visual se compone de tres áreas, cuyo funcionamiento no adecuado puede afectar al rendimiento académico y que, por tanto, deben ser evaluadas. Estas áreas son la agudeza visual, la eficiencia visual y el procesamiento de la información.

La agudeza visual, o capacidad para discernir los detalles de un objeto, está relacionada con el estado refractivo (Tabla 1) y, en general, no suele representar un problema, ya que la mayoría de los defectos de refracción se detectan y compensan en la edad escolar. La excepción son las hipermetropías leves no detectadas, en las que el niño mantiene una buena agudeza visual y, por

esta razón, pasan desapercibidas. Sin embargo, provocan una importante sintomatología y suelen causar graves complicaciones al estudiante. Los niños que las padecen, a veces, son considerados malos estudiantes, con desinterés por la lectura e, incluso, inquietos y nerviosos. Estas hipermetropías se catalogan como normales para la edad y no se consideran, sin tener en cuenta que están afectando al niño en una edad muy comprometida para su aprendizaje.

Tabla 1
Problemas refractivos.

Problemas refractivos: agudeza visual	
	Miopía
	Hipermetropía
	Astigmatismo

La eficiencia visual hace referencia a habilidades tales como la acomodación, la binocularidad y la **oculomotricidad** (Tabla 2).

Tabla 2
Problemas de
eficiencia visual.

Problemas de eficiencia visual	
Acomodativos	Insuficiencia acomodativa
	Exceso acomodativo
	Inflexibilidad de acomodación
Binoculares	Insuficiencia de convergencia
	Exceso de convergencia
	Insuficiencia de divergencia
	Exceso de divergencia
	Endoforia básica
	Exoforia básica
	Disfunción de la vergencia fusional
Inflexibilidad de vergencias	
Oculomotores	Sacádicos
	Fijaciones
	Seguimientos

La función acomodativa, como hemos visto en capítulos anteriores, es el proceso que permite al ojo enfocar objetos independientemente de la distancia a la que se encuentren. El órgano responsable de realizar esta tarea es el cristalino, que, modificando el radio de curvatura, consigue

cambiar su potencia para conseguir el enfoque a distintas distancias.

Si el sistema visual, por medio de la acomodación, no consigue el enfoque oportuno, la tarea puede resultar difícil de realizar. Las anomalías acomodativas impiden que el niño pueda mantener la mirada en el trabajo de cerca durante un tiempo prolongado de manera eficaz, llegando a producir malestar y abandono de la tarea. El cansancio puede hacer que se evidencie más aún este déficit. A veces, el problema se presenta cuando se cambia de distancia de fijación, es decir, al cambiar la mirada de cerca a lejos o de lejos a cerca. Estos cambios deben ser inmediatos, sin que la persona perciba borrosidad en ningún momento. Cuando los cambios suponen unos instantes de borrosidad o, incluso, no se consigue ver nítido sin hacer un esfuerzo consciente cerrando o frotándose los ojos, nos encontramos ante una inflexibilidad de acomodación. Este problema haría que un niño en el aula, cuando primero mire la pizarra y, a continuación, mire su libro o cuaderno, tenga una verdadera dificultad para ver nítido y necesite unos instantes para conseguirlo. En sentido contrario ocurriría algo similar y la tarea resultaría costosa. La visión binocular es la coordinación e integración de la información percibida por ambos ojos. Aunque la información procedente de un ojo y del otro presenta diferencias, debido a la separación entre ambos, el cerebro integra las dos imágenes que recibe en una única, proporcionando información adicional, como la percepción en profundidad, como vimos en la Figura 12 del capítulo 7.



Figura 10
Integración de la
imagen de ambos ojos.
Fuente: Gabriel Piccolo Morales.

Podemos obtener un ejemplo de esta integración entre la información proporcionada por un ojo y el otro realizando el siguiente experimento:

a) enrolla un folio y colócalo en forma de catalejo delante de un ojo; b) extiende la mano que no sostiene el folio y mira a través de este improvisado catalejo. La sensación es que en la mano hay un agujero (Figura 10).

Tener dos ojos que funcionan de manera coordinada es una cualidad del sistema visual que aporta grandes beneficios a la función visual. Si queremos llenar un vaso de agua con una jarra, la tarea resulta más imprecisa si la realizamos con un ojo tapado (Figura 11A), y es muy posible que el agua caiga fuera del vaso. Sin embargo, si realizamos la misma operación con los dos ojos (Figura 11B), obtendremos más información visual, controlaremos mejor las distancias y será más probable que el agua caiga dentro del vaso.

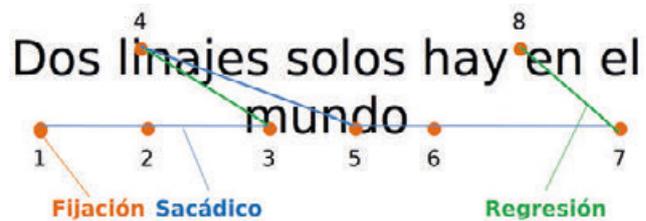


Figuras 11A y 11B
 Figura 11A. Habilidades en condiciones de monocularidad.
 Figura 11B. Habilidades en binocularidad.
 Fuente: Gabriel Piccolo Morales.

Las anomalías binoculares son aquellas que impiden que ambos ojos trabajen como un sistema único, lo que genera desórdenes y malestar. El sistema oculomotor se encarga del movimiento de los ojos para mantener en la fóvea el objeto que requiere nuestra atención. Los movimientos oculomotores intervienen en los primeros niveles de comprensión de la lectura y se utilizan para desplazar la mirada de un punto a otro con precisión. Unos movimientos oculomotores no adecuados pueden dar lugar a un lector lento e ineficaz que no comprenda adecuadamente el texto. Cuando

aparece una disfunción oculomotora, se ven afectados los tres aspectos que componen el sistema oculomotor: los movimientos sacádicos, los seguimientos y las fijaciones.

Los sacádicos son movimientos rápidos encaminados a dirigir la mirada de un punto de fijación a otro. El sacádico ideal es un movimiento simple que hace el desplazamiento con precisión. Si el primer sacádico es impreciso, tiene que haber un segundo sacádico de ajuste. En la lectura, esto supondría una pérdida de tiempo y de eficiencia lectora. Existen unos sacádicos de regresión cuando no se ha comprendido convenientemente lo leído. Los buenos lectores realizan sacádicos de gran amplitud y, por tanto, requieren, durante la lectura, un menor número de sacádicos y de regresiones. Los seguimientos posibilitan la visión clara y continua de un objeto en movimiento, asegurando así la fijación en la fóvea del objeto. Este tipo de movimientos no tienen relevancia en el proceso lector. La fijación consiste en mantener la imagen estable en ambas fóveas cuando miramos un objeto. Durante la lectura, entre un sacádico y otro existe una fijación, que será de mayor o menor duración dependiendo de la habilidad lectora de la persona. Los lectores eficientes utilizan un menor número de fijaciones y de menor duración (Figura 12).



La aparición de síntomas es el principal indicador de que existe una disfunción en algún aspecto de eficiencia visual. En general, los síntomas que podemos hallar son los relacionados con la visión de cerca. Los más habituales son cefaleas, dolor de ojos, **astenopia**, visión borrosa, **diplopía**, rechazo a la lectura, tensión ocular, falta de comprensión lectora, pérdida del renglón, cambio de unas palabras por otras, somnolencia, dificultad para terminar los trabajos escolares, periodos cortos de atención, etcétera.

Figura 12
 Ejemplo de movimientos oculares durante la lectura de una frase extraída de la obra del Quijote.
 Fuente: M.ª Angustias Pérez Fernández.

Saber más

La doctora Lázaro Suárez, en su tesis doctoral indicada en la bibliografía, expone detalladamente cada una de las disfunciones visuales que pueden afectar al rendimiento académico y su incidencia en una población infantil.

Las disfunciones relacionadas con la eficiencia visual (Tabla 2) suelen pasar desapercibidas en las revisiones escolares, encaminadas normalmente a detectar falta de agudeza visual (miopía, hipermetropía y astigmatismo). Por esta razón, es de suma importancia que, durante la etapa escolar (principalmente, entre los 5 y los 12 años), se realicen revisiones optométricas que incluyan encuestas de sintomatología a niños y a padres. Esto se hace especialmente significativo en niños que presenten un bajo rendimiento académico, con una inteligencia normal y sin una causa aparente que justifique dicho retraso. La realización adecuada de revisiones evitaría que la presencia de estas disfunciones y la sintomatología asociada lleven al alumno a condiciones de bajo rendimiento académico e, incluso, fracaso escolar.

En caso de algún tipo de disfunción, una **terapia visual** puede restablecer la normalidad por medio de sencillos ejercicios con prismas, lentes, esteoreogramas, programas de terapia computarizada, etcétera, con el fin de normalizar los parámetros visuales alterados, eliminar la sintomatología y, en definitiva, que la realización del trabajo de cerca o de lejos resulte confortable, fácil y eficaz.

Estas disfunciones son las que tradicionalmente se ha ocupado de resolver la terapia visual, olvidándose de las relativas al procesamiento visual. Pero, en optometría, también existen planes de terapia visual para el tratamiento de los problemas de procesamiento visual de la información, como parte que son de la visión.

El procesamiento visual de la información está integrado por un conjunto de habilidades cognitivas, necesarias para procesar y organizar la información recibida del exterior e integrarla con

habilidades sensoriales y funciones cognitivas superiores. Escribir letras, números o interiorizar la resolución de un problema requiere habilidades de procesamiento visual. Esta tarea precisa un reconocimiento, análisis y manipulación de la información. Los aspectos o habilidades de procesamiento visual a evaluar son la orientación visoespacial, el análisis visual y la integración visomotriz (Tabla 3).

Problemas de procesamiento de la información visual		
Orientación visoespacial	Lateralidad	
	Direccionalidad	
Análisis visual	Percepción de la forma	Discriminación visual
		Fondo-figura
		Cierre visual
	Atención visual	
Memoria visual		
Visualización		
Integración visomotriz	Seguimientos	

Tabla 3
Problemas de procesamiento de la información visual.

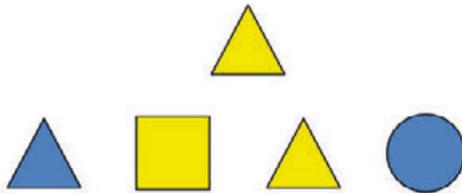
La «orientación visoespacial hace referencia a la habilidad para comprender conceptos direccionales, con la finalidad de organizar el espacio visual que nos rodea. Nos permite entender conceptos tales como derecha-izquierda, arriba-abajo, delante-detrás y la relación del propio cuerpo con objetos del espacio visual. En este contexto se contemplan aspectos tales como la «lateralidad» y la «direccionalidad».

- La lateralidad es la toma de conciencia del lado derecho y del lado izquierdo del cuerpo. Algunos niños presentan dificultades para decir cuál es su mano derecha o izquierda y, en cambio, no presentan la misma dificultad con conceptos tales como arriba y abajo.
- La direccionalidad se entiende como la capacidad para comprender e identificar la posición de los objetos en el espacio visual externo, incluyendo la orientación específica de los símbolos del lenguaje escrito, como «b» y «d» o «p» y «q». La persona es consciente de su posición en el espacio, así como de la relación de los objetos del espacio consigo mismo.

El análisis visual incluye un grupo de capacidades para el reconocimiento, el recuerdo y la manipulación de la información visual, y se pueden distinguir las siguientes categorías: percepción de la forma, atención visual, memoria visual y visualización.

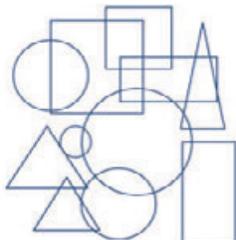
- Para la percepción de la forma, la imagen entrante tiene que ser organizada y comparada con una representación interna de un objeto similar. La información visual se puede analizar observando similitudes y diferencias con otros objetos, por ejemplo, entre letras de rasgos parecidos. La evaluación clínica de las habilidades de percepción implica el análisis de los siguientes aspectos: discriminación visual, fondo-figura y cierre visual.
- La discriminación visual es la capacidad para analizar las distintas características de un objeto (tamaño, color, forma, orientación y posición). Si a un niño se le presentan distintas figuras y se le pide que encuentre un cuadrado amarillo, para no cometer errores, el niño deberá analizar distintas características del objeto y no solo el color (Figura 13).

Figura 13
Discriminación visual.
Fuente: M.ª Angustias Pérez Fernández.



- La habilidad fondo-figura precisa prestar atención a las características específicas de la forma, mientras se es consciente de la relación de esta con el medio. Si se presentan distintas formas geométricas y se le pide al niño que seleccione y cuente el número de

Figura 14
Fondo-figura.
Fuente: M.ª Angustias Pérez Fernández.



círculos que aparecen, este tendrá que obviar los cuadrados, triángulos y otras formas geométricas, y centrarse en contar, solamente, los círculos presentes (Figura 14).

- El cierre visual nos permite tener conocimiento de las pistas de todo el conjunto visual, sin necesidad de que todos los detalles estén presentes. Hace posible que se tenga la percepción final o de conjunto de una imagen que se presenta de manera incompleta. Por ejemplo, si se presenta una imagen oculta detrás de unos bloques, el niño debe averiguar de qué se trata eliminando el menor número de bloques posible (Figura 15).

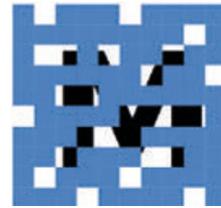


Figura 15
Cierre visual.
Fuente: M.ª Angustias Pérez Fernández.

- Atención visual es la capacidad para centrarse conscientemente en una tarea, lo que es esencial para el procesamiento de la información visual. Habrá que prestar atención a cierta información e ignorar otra que no es necesaria para la correcta realización de la tarea encomendada.
- La memoria visual permite recordar visualmente la información recibida. Como prueba, se le puede presentar al niño una figura geométrica durante unos segundos y pedirle que después la dibuje, sin tenerla presente.
- La visualización es la capacidad de recordar y manipular la información visual, lo que nos permite ver un objeto desde distintos puntos de

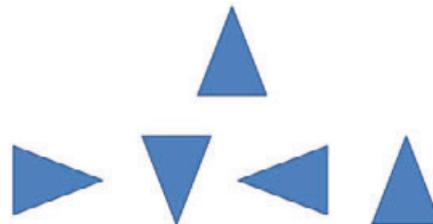


Figura 16
Visualización.
Fuente: M.ª Angustias Pérez Fernández.

vista. Por ejemplo, se puede pedir al niño que elija, entre varias figuras, la que se corresponde con una imagen dada, girada de derecha a izquierda o de arriba abajo (Figura 16).

La integración visomotriz permite al niño reconocer formas y reproducirlas. La coordinación ojo-mano es indispensable para las tareas de copia y escritura (Figura 17).

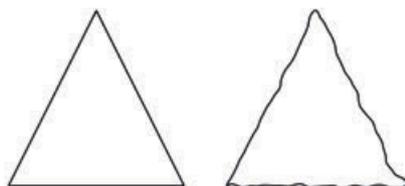


Figura 17

Integración visomotriz.

Fuente: M.ª Angustias Pérez Fernández.

La sintomatología más frecuente asociada a los problemas de procesamiento de la información visual consiste en casos de cambio de signos ortográficos, errores de inversión en la lectura o escritura, transposición de letras o números, dificultad para recordar lo leído, lectura y escritura pobres, confusión derecha-izquierda, retraso en el aprendizaje del alfabeto, dificultad para realizar operaciones matemáticas básicas, dificultad en el deletreo, dificultad al clasificar objetos a partir de sus atributos visuales, dificultad para recordar secuencias, pobre reconocimiento automático de letras, números o palabras, etcétera.

Cuando existe discrepancia entre el potencial de aprendizaje (test de inteligencia) y los resultados académicos, será necesario establecer un diagnóstico. El diagnóstico se realiza por medio de un test de percepción visual. Si se detectan disfunciones visuales, el adecuado tratamiento de las mismas mejorará de manera evidente el rendimiento y la autoestima del escolar. En el procesamiento de la información visual, la terapia debe ir encaminada a aquella área de procesamiento que presente déficit, y no al conjunto. Además, para tratar estos problemas, será necesario que no existan errores refractivos sin compensar ni déficit de eficiencia visual sin tratar.

En general, se puede decir que la terapia visual es un conjunto de técnicas no invasivas destinadas a eliminar sintomatología, normalizar los parámetros visuales alterados y conseguir una visión cómoda y eficaz. Se trata de un proceso activo, a diferencia de lo que ocurre en el tratamiento con lentes o prismas en gafas, en el que el paciente tiene que colaborar y trabajar con el optometrista para conseguir los objetivos marcados.

Finalmente, es importante destacar que la optometría no trata los problemas de aprendizaje, sino aquellas habilidades visuales que se encuentren alteradas y sean susceptibles de mejorar, para que no interfieran en el aprendizaje de niños en edad escolar.

BIBLIOGRAFÍA

- Garzia, R. P.; Borsting, E. J.; Nicholson, S. B., et al. (2008): *Optometric Clinical Practice Guideline: Care of the Patient with Learning Related Vision Problems*. American Optometric Association.
- Hoffman, L. G. (1980): «Incidence of Vision Difficulties in Children with Learning Disabilities». *Journal of American Optometry Association*.
- Lázaro, M.ª del M. (2002): «Incidencia de las anomalías visuales en niños en edad escolar» (tesis doctoral). Universidad de Granada.
- Lázaro, M.ª del M.; García, J. A., y Perales, F. J. (2013): «Anomalías de la visión y rendimiento escolar en Educación Primaria. Un estudio piloto en la población granadina». *Revista interuniversitaria de formación del profesorado*.
- Nancy, A. (2006): *Test of Visual Perceptual Skills*. Academic Therapy Publications.
- Pujol, J. (1993): *Mejorar el rendimiento visual para evitar el fracaso escolar*. Informativo Campaña de Protección Ocular.
- Scheiman M. y Rouse M. (2006): *Optometric Management of Learning-Related Vision Problem*. Mosby Elsevier.



Capítulo 10

Imágenes y percepción visual

Juan Luis Nieves Gómez

Introducción

Llegados a este punto, y teniendo ya claro el papel que desempeña la luz en sus implicaciones en la óptica visual, en la formación de imágenes en instrumentos ópticos, en su fenomenología en lo que respecta a su interacción con la materia o en las más modernas tecnologías fotónicas, ¿por qué hablar de percepción visual en este último capítulo?

La imagen que forma cualquier dispositivo de captura de imágenes no difiere, en su formación, de la que se crea en la retina de un observador. Tanto en un caso como en el otro, una vez que la luz atraviesa el objetivo de la cámara (o los medios oculares, en el caso del ojo), estimulará, bien los sensores de dicha cámara, bien los fotorreceptores (conos y bastones) de la retina. Hoy en día, cualquier sistema de captura de imágenes trata de asemejarse en lo posible a nuestro sistema visual. Y es que, aunque cada vez disponemos de mejores cámaras digitales o, si hacemos referencia a las de los teléfonos móviles del mercado, sean de precios bajos o más elevados, con aplicaciones específicas que nos permiten realizar fotos nocturnas o en condiciones de baja

luminosidad, con diferentes modos de disparo, con programas para el retoque artístico de las imágenes, etcétera, aún estamos lejos de conseguir que dichas cámaras, o cualquier otro sistema de visión artificial más sofisticado, se aproxime a las «prestaciones» del sistema visual humano.

Partiendo de una misma señal de entrada (luz reflejada en los objetos o proveniente de fuentes luminosas), la diferencia principal entre la imagen generada por una cámara y la captada por un observador es que la primera no pasa de ser una mera «sensación», mientras que la segunda trasciende a aquella generando lo que denominamos una «percepción visual». Esta percepción visual nos permite percibir y diferenciar formas, colores, texturas y movimientos, y, además, disponer de una representación tridimensional completa del mundo que nos rodea. A continuación veremos algunos ejemplos de esta capacidad del sistema visual humano, que, siendo curiosa en algunos casos, como las ilusiones ópticas, en la actualidad es estudiada por científicos de campos tan diferentes como la óptica, la inteligencia artificial o la psicología.

¿Por qué a veces vemos lo que no queremos ver?

La percepción visual de escenas como la de la Figura 1 no es difícil, incluso cuando se tratase de

una fotografía. Nos resulta fácil interpretar la escena, compuesta por un cilindro, de caras suaves y coloreadas de azul, y un tablero que contiene cuadros claros y oscuros; e, incluso, no resulta complicado imaginar que esos objetos están siendo iluminados por una fuente luminosa situada en la esquina superior derecha (este detalle nos lo proporciona la sombra que arroja el cilindro sobre el tablero). Incluso sin poder estar «dentro» de la escena para tocar las esquinas, bordes, texturas, comprobar dónde está situada la fuente de luz, etcétera, la percepción visual es completa y no ofrece duda alguna.

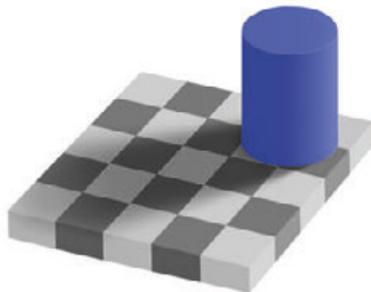


Figura 1

Representación de una escena de la que podemos tener una percepción visual completa sobre su geometría, iluminación y color. Fuente: Juan Luis Nieves Gómez y Luis Gómez Robledo. Imagen adaptada de la conocida como la ilusión óptica del tablero de ajedrez de Edward H. Adelson (<http://goo.gl/3rmt>).

Pero hay que aclarar que la imagen de este objeto que tenemos en nuestra retina es una distribución de luz plana y, por definición, ambigua. La Figura 2 ilustra el denominado «problema de la proyección inversa», que consiste en que una imagen en la retina puede estar originada por múltiples objetos incluidos dentro de un mismo cono visual. Por tanto, volviendo al caso mostrado en la Figura 1, si sustituimos el objeto por una fotografía plana que simule lo que se recoge en nuestra retina, aún somos capaces de intuir lo que allí se representa: un cilindro arrojando sombra sobre una especie de tablero de ajedrez. Incluso también podríamos saber desde dónde se está iluminando la escena, ya que basta con analizar su sombra.

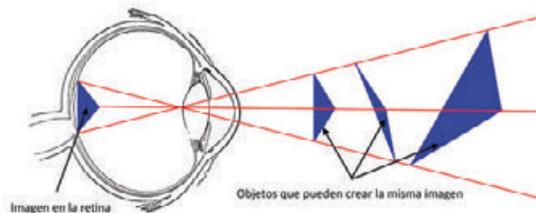


Figura 2
Esquema que ilustra el denominado «problema de la proyección inversa» en la retina.
Fuente: Luis Gómez Robledo.

Estos ejemplos ilustran dos cuestiones sobre las que fijar nuestra atención cuando hablamos de la percepción de imágenes por el sistema visual humano. Por un lado, no debemos confundir «sensación» y «percepción», dado que la sensación está asociada a la recepción de estímulos mediante los órganos sensoriales (transformación de un estímulo físico en una señal eléctrica) y la percepción

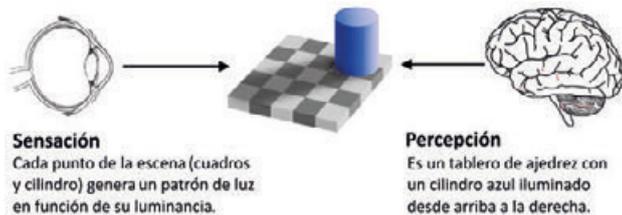


Figura 3
Diferenciación entre los conceptos de «sensación» y «percepción» visuales.
Fuente: Luis Gómez Robledo y Juan Luis Nieves Gómez.

es el proceso resultante de la interpretación que hace nuestro cerebro de las señales enviadas por dichos órganos sensoriales (Figura 3).

A su vez, en el proceso de percepción visual podemos diferenciar varias etapas en función de los mecanismos involucrados: 1) reflexión de la luz por los objetos; 2 y 3) imagen en la retina, en el ojo derecho y en el izquierdo; 4) proceso de **transducción** o conversión de la señal luminosa, primero en química y después en eléctrica; 5) transmisión al cerebro; 6) procesado en el **córtex visual**; 7) percepción visual final.

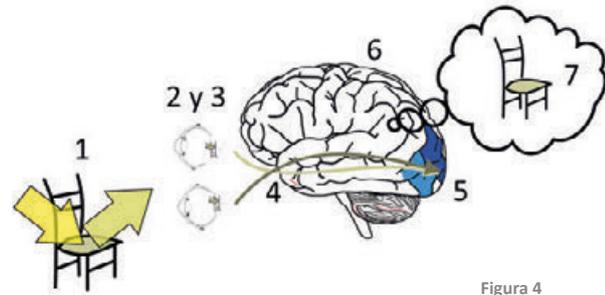


Figura 4
Esquema que ilustra las diferentes etapas de la percepción visual.
Fuente: Luis Gómez Robledo.

Saber más

Según el principio de univarianza o de Naka-Rushon, las señales generadas en los fotorreceptores (etapas 2 y 3 de la percepción visual en la Figura 4) no están «etiquetadas» conforme a la composición espectral de la luz que les llega; es decir, que el impulso nervioso generado en la etapa 4 de la percepción visual no lleva información de la composición espectral de la luz que los generó. Cuando una molécula de un pigmento visual absorbe un cuanto de energía electromagnética, el efecto que se produce en él es el mismo, independientemente de la frecuencia individual del cuanto; lo único que varía es la tasa a la que absorbe los cuantos. Por tanto, un cambio en la longitud de onda de la luz incidente hará variar las respuestas relativas de los fotorreceptores y, mediante la comparación de estas, el sistema visual humano extrae la información cromática en etapas de procesamiento posreceptivas.

Por otro lado, hay que tener presente que nuestro cerebro siempre hará todo lo posible para obtener una percepción visual y una interpretación estable de la escena que está observando, incluso considerando las limitaciones inherentes a la señal de entrada (como hemos dicho, una distribución de luz plana en cada ojo).

Decimos que la percepción visual es el resultado de una «inferencia», y ello supone que nuestra percepción visual raramente será ambigua en nuestra vida cotidiana, dado que nuestro cerebro necesita siempre establecer conclusiones claras sobre el entorno que nos rodea para que nos

podamos manejar en el mismo sin problemas. Tanto el cubo de la Figura 5 (que se puede percibir hacia dentro o hacia fuera) como el cilindro de la Figura 1 evocan en nuestro cerebro nítidas percepciones visuales sobre la disposición de las escenas.

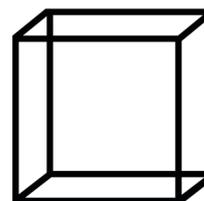


Figura 5
Ilustración de la ilusión del cubo de Necker.
Fuente: Luis Gómez Robledo.

Representación visual del mundo que nos rodea y organización perceptual

La representación visual del mundo que nos rodea, a veces, también puede hacer que veamos lo que no queremos ver. Veámoslo con algo más de detalle adentrándonos en lo que en lenguaje coloquial se denomina «ilusión óptica» y que, según el *Diccionario de la lengua española*, se define como el «concepto, imagen o representación sin verdadera realidad, sugeridos por la imaginación o causados por engaño de los sentidos».

Con respecto al sentido de la vista en particular, y en conexión con el sistema visual humano y la percepción visual, las ilusiones ópticas son, por tanto, indicativas de algo que no tiene verdadera realidad o que está causado por el engaño. Figuras, en principio, tan evidentes y sencillas de percibir como los círculos de la Figura 6 pueden dejar en evidencia nuestra percepción visual si el entorno en el que las situamos cambia. Si nos fijamos un poco en dichos círculos, veremos que, al pintar parte de ellos en verde, tendemos a percibir también un cuadrado verde superpuesto (o delante) de los cuatro conjuntos de círculos. Si realmente no existe un «cuadrado verde» con todos sus lados completos, ¿por qué tendemos entonces a percibir dicho cuadrado como si estuviera situado en un plano delante de los cuatro patrones de círculos? Ejemplos como este echaron por tierra las

denominadas teorías estructuralistas, que, a finales del siglo XIX, explicaban la percepción como el simple resultado de la combinación de sensaciones. De acuerdo con dichas teorías, sería imposible explicar la percepción del cuadrado verde si su contorno está incompleto.

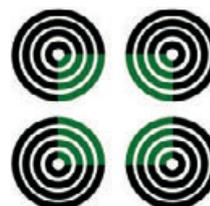


Figura 6
Ilusión óptica del cuadrado incompleto o de cómo el sistema visual humano prefiere cerrar y llenar figuras abiertas.
Fuente: Luis Gómez Robledo.

Esto ilustra la importancia del procesamiento cerebral de la información visual para que podamos distinguir cualquier objeto del entorno. Parece que el sistema visual trata siempre de encontrar patrones, grupos de figuras y formas regulares que nos resulten familiares, de modo que siempre veamos o intuyamos ver dichas estructuras aun cuando no están realmente presentes. La teoría de la Gestalt, introducida por Max Wertheimer y sus colaboradores, impulsó esta forma de abordar la percepción. Su tesis más conocida es la que afirma que «el todo puede diferir de la suma de sus partes».

Por tanto, para poder percibir un objeto en una escena, es necesario distinguirlo del contexto que lo rodea y diferenciarlo de otros objetos presentes en la misma. Sin embargo, considerando el problema de la proyección inversa anteriormente comentado, si la información en la imagen retiniana es ambigua, ¿cómo se agrupan, entonces, estímulos visuales, muchas veces inconexos, para dar lugar a percepciones claras de objetos extensos más complejos, como, por ejemplo, superficies, volúmenes, etcétera? La ley de la Gestalt, o los principios de organización perceptiva, trata de resolver estas cuestiones y, de manera resumida, se formula como sigue:

- a) Proximidad. Los elementos más próximos tienden a agruparse entre sí formando unidades perceptuales diferentes. En el ejemplo de la Figura 7 vemos cómo, a pesar de que las figuras están formadas por el mismo patrón de cuatro círculos agrupados horizontalmente, si variamos la distancia entre las filas de círculos, la percepción global de la posible figura cambia.

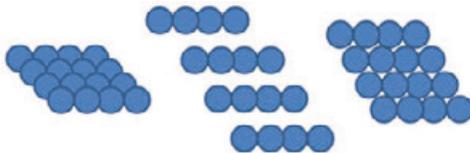


Figura 7
Principio de proximidad.
Fuente: Juan Luis Nieves Gómez.

- b) Similitud. Los elementos más semejantes entre sí tenderán a agruparse. La semejanza puede ser de forma, color, tamaño, orientación, etcétera. Por otra parte, la conjunción de varias dimensiones llevará a un agrupamiento más o menos potente. La adición de color a algunos círculos de la Figura 7, como vemos en la Figura 8, muestra claramente la diferente percepción en la agrupación de los círculos y las diferencias en relación con el ejemplo anterior.

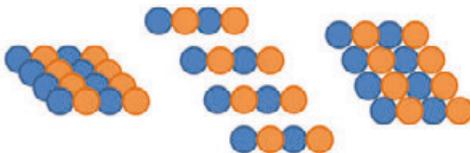


Figura 8
Principio de similitud.
Fuente: Juan Luis Nieves Gómez.

- c) Clausura. Las formas cerradas tienden a percibirse con preferencia sobre las formas abiertas. En este caso, la figura del cuadrado aparece en las tres agrupaciones mostradas (Figura 9), aunque, dependiendo de la distancia entre los elementos en alguna de ellas, nos será más fácil asumir que la figura representada pueda estar formando un cuadrado (y no cuatro conjuntos separados de elementos).

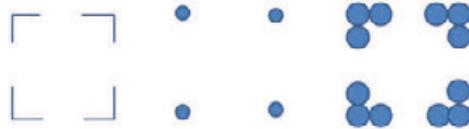


Figura 9
Principio de clausura.
Fuente: Juan Luis Nieves Gómez.

- d) Buena continuación. Se tiende a percibir cambios suaves en la organización perceptual de objetos, con preferencia sobre cambios pronunciados. En la Figura 10 que se muestra a continuación, la figura central muestra la posible segregación de objetos de la figura más a la izquierda, mostrando con líneas amarilla y naranja la agrupación perceptual que se obtiene más fácilmente, frente a otras posibles interpretaciones, como las de la figura más a la derecha, que son difíciles de imaginar.



Figura 10
Principio de la buena continuación.
Fuente: Juan Luis Nieves Gómez.

- e) Destino común. Los elementos que presentan una misma pauta de movimiento se percibirán como una misma unidad perceptiva. El ejemplo más claro de este principio lo encontramos cuando observamos una bandada de pájaros volando en el cielo, que percibimos como un todo con un movimiento coherente (Figura 11).



Figura 11
Principio del destino común.
Fuente: Juan Luis Nieves Gómez.

Ahora que sabemos algo más acerca de la organización perceptual, quizá nos parezca mucho más claro el diseño de algunos logotipos fácilmente identificables por todo el mundo. O, también, un ejemplo de ello es la imagen de los anillos olímpicos, ¿tenemos claro ahora por qué percibimos claramente un conjunto de anillos entrelazados en lugar de cinco aros? ¿O por qué al autor del logotipo de la organización WWF (World Wide Fund for Nature) le bastó con dibujar «a medias» un oso panda, con unas simples manchas, para representarlo? Los fundamentos de los pasatiempos en los que debemos buscar caras o figuras familiares también tienen su explicación en las leyes de la Gestalt.

La mayoría de las teorías de la percepción visual han defendido que la segregación de la figura y el fondo constituyen un paso previo al proceso de reconocimiento del objeto. La segregación de objetos consiste básicamente en la percepción de una figura que destaca sobre un fondo y se considera como el tipo de organización perceptiva más elemental. Este tipo de segregación fue estudiada por Rubin a principios del siglo XX con figuras reversibles, como la Figura 12, en la que se puede percibir la imagen de una copa o dos caras. En esta imagen, los contornos van definiendo regiones distintas, lo que permite al observador diferenciar las caras o la copa. Los dos rostros están delimitados por un contorno, y cualquiera de ellos puede actuar de figura o de fondo, en función de si el observador designa el contorno a la copa o a las caras. Pero lo que resulta imposible es percibir la copa y las caras como figura y como fondo a la vez.

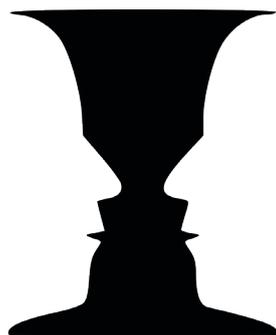


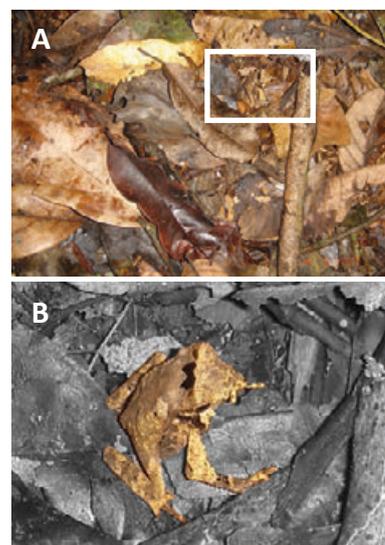
Figura 12

En la ilusión de la doble figura, ¿vemos una copa o dos rostros enfrentados?

Fuente: *Multistability*, Alan De Smet, at English Wikipedia, Wikimedia Commons.

La figura y el fondo en una imagen se diferencian, fundamentalmente, en los siguientes aspectos: a) la figura tiene carácter de objeto y el fondo, no; b) la figura tiene forma y el fondo no la tiene, de modo que la forma de la figura procede del contorno que la delimita; y c) la figura está generalmente localizada delante del fondo y suele resultar más fácil discriminar figuras entre sí que fondos.

El ejemplo que se muestra en las Figuras 13A y 13B demuestra la dificultad inherente al proceso de segregación figura-fondo, pero también cómo el aprendizaje y la memoria pueden ayudar al sistema visual humano a solventar dicha dificultad. La Figura 13A muestra una escena con hojas secas, sin aparente orden, por lo que el problema aquí es que no es posible realizar una segregación figura-fondo dado que todos los elementos son similares en color y forma. Si nos esforzamos un poco, quizá podamos intuir en el recuadro blanco un pequeño animal. Finalmente, si añadimos a la figura la diferenciación por color, entonces ya sí que resultará evidente la forma de una rana. Lo curioso es que una vez que disponemos de la información sobre qué es figura y qué es fondo, cuando volvemos nuestra atención a la Figura 13A, ya nos resulta familiar la escena y no tendremos tanta dificultad para distinguir en ella la imagen de la rana. El proceso de memoria añade ahora



Figuras 13A y 13B

Figura 13A. Escena en la que se muestra cómo el proceso de segregación figura-fondo puede ser realmente complicado.

Fuente: *Camouflage*, Lior Golgher, Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0 (<https://goo.gl/KxOKu>).

Figura 13B. El proceso de segregación figura-fondo puede ser mucho más sencillo cuando añadimos pistas adicionales en la escena. Ahora, la diferencia de color nos permite identificar claramente la rana en el espacio.

Fuente: *Camouflage*, Frog highlight, Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0 (<https://goo.gl/KxOKu>).

una pista adicional en el proceso de segregación figura-fondo. Si volvemos a observar la Figura 13A dentro de un par de días, o incluso semanas, casi de manera automática, podremos ver la rana sin necesidad de volver a contemplar la Figura 13B.



¿Sabías que...?

«Pareidolia» es un término, que proviene del griego *eidolon* ('figura' o 'imagen') y el prefijo *para* ('junto a' o 'adjunta'), que se refiere a la percepción de un estímulo vago y aleatorio, habitualmente una imagen, que es percibido erróneamente como una forma reconocible (Figuras 14A y 14B).

B

Figuras 14A y 14B

Ejemplos de pareidolia.

Fuente: Figura 14A. *Hidden face 1*, Pzst Ulla, English Wikipedia, Wikimedia Commons, CC-BY-SA 3.0 (<https://goo.gl/KxOKu>) y GNU (<http://goo.gl/WnaU>).

Figura 14B. *Pareidolia 3*, Brett Jackson (<http://goo.gl/H10GKH>), Wikimedia Commons, CC-BY-SA 3.0 (<https://goo.gl/KxOKu>) y GNU (<http://goo.gl/WnaU>).

Experiencias ilustrativas de la organización perceptual

Otro ejemplo que muestra la importancia de la búsqueda de estructuras visuales organizadas es lo que se denomina «colores relacionados»; es decir, estímulos de color observados en relación con otros del entorno (por oposición a los estímulos de color «no relacionados» o «aislados»). Así, por ejemplo, en las Figuras 15A, 15B y 15C,

¿es el mismo plátano el que aparece en todas las fotografías?

Si simplemente comparamos la Figura 15A con la Figura 15C, la respuesta a la pregunta anteriormente planteada sería «no», sin lugar a dudas, ya que da la impresión de que el plátano se ha sustituido por uno verde aún no maduro. Pero si



Figuras 15A, 15B y 15C

Ejemplos de colores relacionados. Figura 15A. La escena original. Figura 15B. La misma escena, pero con una iluminación global diferente que se ha cambiado por una más azulada. Figura 15C. La escena original, pero cambiando únicamente los plátanos por los de la imagen azulada.

Fuente: Luis Gómez Robledo y Juan Luis Nieves Gómez.

comparamos la Figura 15A con la Figura 15B, la respuesta de un posible observador será «sí», que es el mismo plátano, y probablemente argumentará que lo único que ha variado es que estamos observando la escena a través de un vidrio azulado, o que la luz que ilumina la escena proviene de una fuente luminosa que emite luz de un color azulado. Lo sorprendente de este ejemplo —y que demuestra una vez más la importancia de la organización perceptual en el proceso de la percepción visual— es que son las imágenes de los plátanos de las Figuras 15B y 15C las que son exactamente iguales. Para comprobarlo, se puede hacer un pequeño agujero en un papel (o recortar un agujero con la forma de un plátano) y colocarlo encima de cada uno de los plátanos de la escena, de modo que el agujero solo deje ver una pequeña área del plátano, tapando todo lo demás. Se comprobará cómo el primer plátano es amarillo y los otros dos son exactamente iguales, de un verde azulado.

¿Qué es, entonces, lo que nos hace decidir que las Figuras 15A y 15B son las que parecen ser realmente la misma? La respuesta está en las suposiciones que el sistema visual humano realiza sobre cuál es la organización perceptual de la escena que está observando; es decir, no solo en lo referido a cuántos objetos hay, si son iguales o diferentes, de tal o cual color cada uno, cuál es la figura y cuál es el fondo, sino también respecto a cuál es la iluminación presente en la escena en cada momento. Tanto la Figura 15A como la Figura 15C nos parecen iluminadas por una fuente de luz «blanca», mientras que la Figura 15B parece estar iluminada por otra fuente de luz diferente, más azulada (o que estemos observando la escena a través de un vidrio azulado, como decíamos antes). Incluso podemos intuir que la escena se está iluminando desde la derecha, dada la posición de los reflejos especulares en la manzana, los pimientos y la naranja, o la presencia de las sombras en algunas partes de los objetos. Todo ello son pistas visuales (en inglés *visual cues*) que son usadas por el sistema visual para descartar la «componente iluminación» y quedarse únicamente con la información visual asociada a los objetos.

Esto nos lleva de nuevo a la Figura 1, a la denominada «ilusión del tablero de ajedrez» (Edward H. Adelson). Sin considerar ahora la estructura geométrica de la escena ya comentada al principio, nos resultará extraño que algunos de los cuadrados que aparecen como negros/grises y blancos en realidad son iguales. La organización perceptual de esta escena es la que nos hace percibir los cuadrados conectados por el segmento blanco o, más claro, como diferentes (Figura 16). Por la sombra del cilindro sobre el tablero de ajedrez, podemos deducir la posición de la fuente luminosa y el hecho de que, si esos cuadrados presentan diferente luminosidad, es porque uno de ellos está en una zona sombreada y el otro, fuera de ella. El efecto se ve reforzado porque uno de los cuadrados comparados (A) está rodeado por otros cuadrados más oscuros, mientras que el otro cuadrado comparado (B) lo está por cuadros más claros. Podemos disfrutar de una versión animada de esta ilusión en <http://www.shapirolab.net> o en <http://goo.gl/Y5O3UL>, por ejemplo, pero también se puede preparar una versión en papel al imprimir en color (o incluso en blanco y negro) la escena que aquí vemos —u otra similar que encontremos en internet, con la búsqueda «*checker shadow illusion*»— y recortar uno de los cuadrados grises. Si vamos colocando alternativamente ese cuadrado en las posiciones conectadas en la imagen por el segmento blanco, (A) y (B), veremos que percibimos exactamente lo mismo, lo que indica que los cuadrados son iguales, pero que, dependiendo del contexto donde los observemos, tendremos una percepción visual u otra.

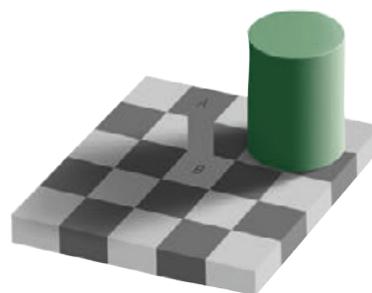
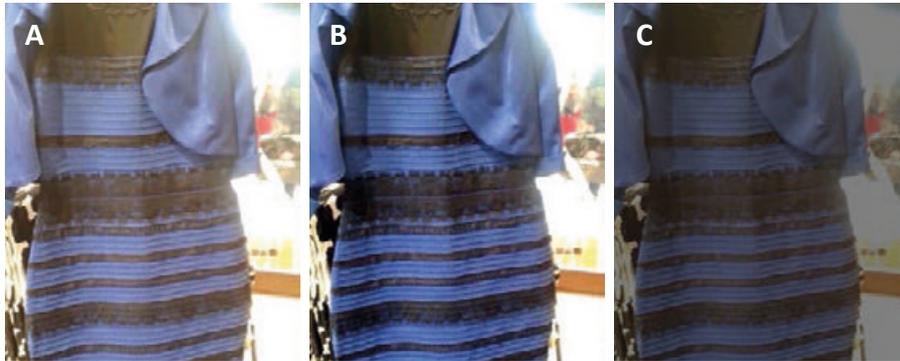


Figura 16
Ilusión del tablero de ajedrez en la que los cuadrados que se señalan, A y B, se perciben con diferente luminosidad, cuando en realidad son iguales. Fuente: Edward H. Adelson (<http://goo.gl/3rmt>).



Figuras 17A, 17B y 17C

Figura 17B. La fotografía central es la imagen original del vestido que ha circulado por las redes sociales.

Fuente: Twitter.

Figuras 17A y 17C. En los laterales se muestran dos versiones del mismo obtenidas modificando la luminosidad de la imagen.

Fuente: Imágenes obtenidas mediante la aplicación de intensidad de colores, luminosidad y filtros, mediante Photoshop, a la fotografía original por parte de Smart Lighting (<http://goo.gl/16EXFJ>).

A este respecto, también es interesante observar la ilusión óptica mostrada en la Figura 17, a raíz de la observación del vestido que se muestra, el cual suscitó un gran revuelo en las redes sociales. El vestido fue usado para una boda escocesa y su usuaria difundió la foto a través de su cuenta de Tumblr (<http://goo.gl/7ebe3J>), preguntando de qué color lo veía cada persona. Unas personas contestaban que veían el vestido formado por franjas azules y marrones, mientras que otras decían verlo con franjas azules y negras. Fueron muchas las explicaciones que en los medios de comunicación se dieron al respecto, algunas incluso achacando el fenómeno a «los diferentes bastoncitos que tenemos en la retina» (cuando los bastones no son responsables de la visión del color, pues esta función corresponde a los conos).

Es cierto que la percepción del color puede depender del observador, siendo el concepto de «color percibido» algo que depende de dicho observador. Pero la explicación fundamental debemos buscarla de nuevo en cómo el sistema visual de cada persona estima su propia organización perceptual de la escena del vestido. La Figura 17C es una versión del vestido en la que se ha modificado la luminosidad de la escena y en la que la organización perceptual parece ahora algo más concisa; el hecho de que en la imagen que circula por internet aparezcan clarososcuros, reflejos, etcétera, invita a nuestro sistema visual a realizar suposiciones sobre la manera en la que la escena está iluminada y, por tanto, del color del objeto una vez descontado el efecto de la iluminación (en este sentido, recordemos el ejemplo del tablero

de ajedrez). Algunos observadores buscan, siempre de manera inconsciente y en la zona más luminosa del fondo que rodea al vestido, la pista o *visual cue* sobre la que situar el tipo de iluminación en la escena, mientras que otros obvian el fondo y se centran en el propio vestido para buscar dicha pista.

En la Figura 18 podemos observar una versión ilustrada de la escena del vestido analizado, donde se han creado dos versiones de la misma introduciendo fondos más claros y más oscuros, pero dejando intacto el propio vestido. Si ahora preguntáramos a diferentes personas sobre la misma cuestión, comprobaríamos cómo la mayoría, por no decir todos, tendrían claro que en la imagen de la izquierda el vestido aparece más claro y en la imagen de la derecha más oscuro, debido a que ahora el fondo ha cobrado un papel relevante y determinante para la organización perceptual de la escena, dando las adecuadas pistas visuales para que no exista duda acerca de la estructura de la misma.

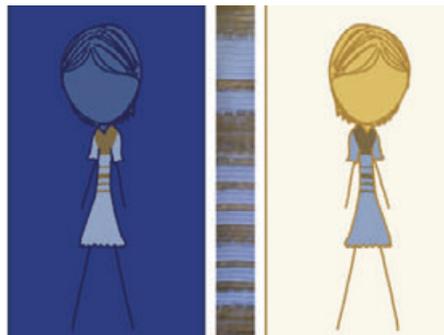


Figura 18

Ilustraciones de versiones alternativas del vestido que muestran el efecto de cambio de percepción según el contexto.

Fuente: xkcd (<http://xkcd.com/1492>), CC BY-NC 2.5 (<http://goo.gl/mm5mLc>).

Percepción de caras

El reconocimiento del rostro constituye otro importante aspecto de la percepción visual, dada la naturaleza concreta y las peculiaridades asociadas al rostro humano. Por una parte, la relación entre los elementos propios y los característicos que componen la cara (ojos, boca, nariz, orejas y pelo) da lugar a la formación de una configuración en la que se percibe el estímulo «como un todo» que presenta características propias e independientes de las de sus componentes por separado. Por otra parte, las caras son estímulos importantes tanto biológica como socialmente, pues aportan información sobre características relevantes de las personas con las que se interactúa (como su edad, sexo, expresión, estado de ánimo, etcétera). El reconocimiento de caras es una de las tareas, aparentemente, más fáciles y naturales de llevar a cabo por cualquier persona, ya que podemos realizarla sin esfuerzo alguno y desde pequeños, pero también es una tarea sumamente compleja para el sistema visual humano. También, a veces, nos cuesta recordar alguna cara y de ahí la pregunta «¿esta persona me suena de algo?».

Veamos un ejemplo sobre cómo el sistema visual humano procesa la información de las caras de una manera muy peculiar a partir de la fotografía del chico de las siguientes imágenes. Las caras

de las Figuras 19A y 19B se identifican como un mismo rostro, de la misma persona, esté o no de recha. Al observador no le resulta complicado seguir pensando que ambas representan lo mismo. Algo similar ocurre con esta otra versión de la fotografía, la mostrada en la Figura 20A. Aunque notamos que algo raro se percibe, que hace que seamos conscientes de que el rostro de la fotografía original (reproducido de nuevo en la Figura 20B) ha sido modificado de alguna manera, no lo identificamos como nada relevante. Sin embargo, si le damos la vuelta a esta imagen, comprobaremos cómo realmente los cambios introducidos en la foto inicial sí que han sido significativos, ¿por qué entonces no lo parecían tanto cuando estaba bocabajo? La respuesta hay que buscarla precisamente en la manera en que el sistema visual humano procesa la información de las caras.

Esta ilusión fue descubierta accidentalmente por el profesor de psicología Peter Thompson, en 1980, y suele denominarse «efecto Margaret Thatcher», ya que fue una fotografía de la ex primera ministra del Reino Unido la que se utilizó en origen para demostrar este efecto (se puede observar el efecto con su rostro en <https://goo.gl/Os9Ebr>. Más recursos sobre este fenómeno, en inglés, en <https://goo.gl/WTNJ>).



Figuras 19A y 19B

Dos imágenes iguales de una persona, del derecho y del revés.
Fuente: Iain MTeffect (modelo: Iain Hartley), Alex Dodge. Wikipedia, Wikimedia Commons.



Figuras 20A y 20B

En la Figura 20B, de nuevo, mostramos la fotografía inicial pero ¿y a la izquierda? (al girar la imagen se experimentará el efecto Thatcher en la Figura 20A).

Fuente: Iain MTeffect (modelo: Iain Hartley), Alex Dodge. Wikipedia, Wikimedia Commons.

El efecto Thatcher demuestra que somos especialmente sensibles a la información contenida en las caras dispuestas verticalmente, lo que hace que sea más fácil detectar las distorsiones en la imagen de un rostro. Se interpreta que este aumento de la sensibilidad a las imágenes en posición vertical se debe a la forma en que el sistema visual humano procesa la información de los rostros por módulos cognitivos. Por un lado, observamos el «objeto cara» como un todo que se compara con mapas mentales ya conocidos. Por otro lado, el observador utiliza las partes que conforman el rostro vistas individualmente (fundamentalmente, los ojos, la nariz y la boca) en una inspección local de cada una de ellas para, posteriormente, completar la percepción de la cara en su conexión con el mapa mental anterior. Cuando la cara se encuentra dada la vuelta, no existen registros mentales con los cuales compararla y, al depender la percepción únicamente de los rasgos individuales, el cerebro no distingue con claridad ninguna rareza.

Percepción visual, tamaño y distancia

Existe una clara conexión entre nuestra percepción del tamaño y nuestra percepción de la profundidad y/o distancia aparente. Aunque la percepción del tamaño no siempre es totalmente precisa, se ve favorecida por la buena percepción de profundidad que posee el sistema visual humano cuando pone en juego la binocularidad. La percepción del tamaño aparente de los objetos se rige por el denominado «principio de la constancia de tamaño», que establece que nuestra percepción del tamaño de un objeto permanece relativamente constante, incluso cuando vemos un objeto desde diferentes distancias, a pesar de los cambios de tamaño de su imagen conjugada en retina. Este principio tiene su fundamento en la existencia de un mecanismo de «escalado tamaño-distancia», que, tomando como referencia la distancia del objeto (Gregory, 1966), permite la estimación del tamaño percibido de dicho objeto según la relación $S = k(D \cdot R)$, donde S es el tamaño percibido del objeto, k es una constante, R es el tamaño de la imagen retiniana y D es la distancia percibida del objeto. La fotografía de la Figura 21

ilustra claramente el efecto de la percepción del tamaño según sea la distancia percibida (más información, en inglés, en <http://goo.gl/5NQ93l>).



Figura 21
Fotografía que ilustra los efectos de la distancia en la percepción visual de una escena.
Fuente: *Leaning tower of Pisa, Europe 2007*, Vin7474, Wikimedia Commons.

Veamos cómo poner de manifiesto este principio también con el esquema de la Figura 22, que ilustra la experiencia descrita por primera vez por Emmert en 1881. Si se mira el centro del círculo

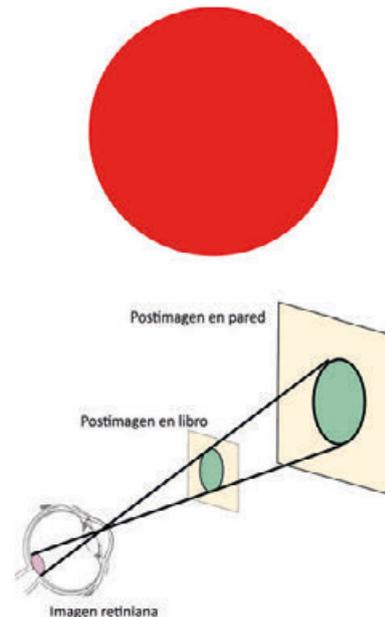


Figura 22
Experiencia de Emmert.
Fuente: Luis Gómez Robledo.

durante unos 60 segundos y, después, se fija la mirada en un espacio en blanco junto a dicho círculo, comprobaremos que se percibe una «postimagen» (cuyo color aparente dependerá del color del círculo que se haya usado en la experiencia). Antes de que se desvanezca esa postimagen, si se mira a una pared uniforme situada a una distancia

más lejana, se percibirá la postimagen anterior, pero, ahora, mucho más grande. Se puede repetir el experimento y comprobar cómo el tamaño de la postimagen dependerá de dónde se fije la mirada en cada momento, a pesar de que el tamaño de la imagen retiniana generada por el círculo observado es siempre el mismo.

¿Y si los objetos o la imagen retiniana se mueven?

La visión de movimiento es una de las características fundamentales de las que hace uso, de manera continuada, el sistema visual humano. Cuando paseamos por la calle, disfrutamos del paisaje al mirar por la ventana de un tren o asistimos a un partido de baloncesto, las imágenes que nuestro ojo registra en retina cambian continuamente. Para describir la percepción del movimiento, es fundamental aclarar primero cuándo o bajo qué circunstancias percibimos movimiento. Y la respuesta a esta pregunta, que parece muy obvia, en realidad no es sencilla, aunque estemos inclinados a responder que percibiremos movimiento cuando algo se mueva en nuestro campo visual (un peatón que se cruza en la calle, una pelota en movimiento en el campo de fútbol, etcétera). Y, efectivamente, es así en el caso del «movimiento real», pero también tendríamos que hablar de movimiento si la escena o los objetos que la componen están estáticos y es la imagen retiniana la que se mueve (lo que se produce siempre que giramos la cabeza o seguimos con la mirada fija un objeto que se mueve delante de nosotros). Por tanto, existen otras posibles percepciones de movimiento que, sin embargo, no están ligadas a objetos que se mueven. Tal es el caso del «movimiento aparente», el «movimiento inducido» y los «postefectos de adaptación al movimiento», como vamos a ver a continuación.

- Hablamos de «movimiento aparente» cuando, por ejemplo, percibimos movimiento en la alternancia de estímulos luminosos presentados con una frecuencia determinada. Este es el fundamento de muchos de los letreros luminosos que parecen moverse y que adornan las calles comerciales de muchas ciudades.
- El ejemplo más evidente de movimiento inducido lo encontramos, por ejemplo, si observamos la Luna en una noche en la que el viento provoca que las nubes se desplacen delante del satélite. En este caso, el movimiento de las nubes provocará que percibamos la Luna, que cubre un área mucho menor que las nubes en nuestro campo visual, como si se moviera en sentido contrario al movimiento real de estas.
- Los postefectos de adaptación al movimiento ocurren cuando observamos de manera prolongada (1 o 2 minutos suelen ser suficientes) el movimiento de un objeto e, inmediatamente después, fijamos la mirada en una escena estática. Estos efectos pueden ser bastante espectaculares, como lo demuestra la «espiral en movimiento» que se puede encontrar en el banco de ilusiones ópticas (<http://goo.gl/WTNJ>), aunque se recomienda tener cuidado con este tipo de ilusiones de movimiento, dado que pueden provocar mareos e, incluso, no ser convenientes para personas propensas a sufrir ataques de epilepsia.

ENLACES WEB

Concurso mundial anual de ilusiones ópticas (en inglés):

► <http://goo.gl/mcEwup>



Charla en TED de Oliver Sacks sobre alucinaciones visuales (en inglés):

► <http://goo.gl/B4GUGO>



Base de datos de ilusiones ópticas (en inglés):

► <http://goo.gl/WTNJ>



Microdocumental de Hubel y Wiesel (premios nobel) sobre el córtex visual:

► <http://goo.gl/RvpXBJ>



Curso de percepción visual online:

► <https://goo.gl/ooSo7b>



Serie de documentales de percepción visual de National Geographic:

► <http://goo.gl/NUgl3h>



Ejemplo de la ilusión de la doble figura:

► <https://goo.gl/6HVJtO>



Vídeos que muestran el fenómeno de la ceguera atencional:

• *The monkey business illusion*

► <http://goo.gl/yLkvLI>



• *Whodunnit?*

► <https://goo.gl/vGIBJy>



Blogs sobre ilusiones ópticas y vidas de «ilusionistas»:

► <http://goo.gl/Qmv9tr>



► <http://goo.gl/3pcQu>



BIBLIOGRAFÍA

- Aznar Casanova, J. A.: *Psicología de la percepción visual* (<http://goo.gl/wULW31>). *Psicología básica*, Facultad de Psicología, Universitat de Barcelona.
- Goldstein, E. B. (2010): *Sensation and perception*. Wadsworth, Cengage Learning.
- Gregory, R. L. (1997): *Eye and Brain: The Psychology of Seeing*. Princeton University Press.
- Migallón, I.: *Psicocode: psicología y desarrollo personal* (<http://goo.gl/Vv5eS>).
- Romero, J.; García, J. A., y García y Beltrán, A. (1996): *Curso introductorio a la óptica fisiológica*. Comares.
- Thompson, P. (1980): «Margaret Thatcher: a new illusion». *Perception* (volumen 9).

III. Justificación de la estructura de la obra y relación con los bloques de contenidos curriculares de la ESO y el Bachillerato

Correspondencia entre los contenidos relacionados con la luz y aquellos establecidos por la LOMCE para la Educación Secundaria (RD 1105/2014), y relación con la Unidad Didáctica.

Capítulo	Materia	Bloque de contenidos	Contenidos	Criterios de evaluación	Estándares de aprendizaje evaluables
8	Educación Plástica, Visual y Audiovisual. ESO, primer ciclo	Bloque 1. Expresión plástica	Expresión plástica	5. Experimentar con los colores primarios y secundarios. 6. Identificar y diferenciar las propiedades del color luz y el color pigmento.	5.1. Experimenta con los colores primarios y secundarios estudiando la síntesis aditiva y sustractiva, y los colores complementarios. 6.1. Realiza modificaciones del color y sus propiedades empleando técnicas propias del color pigmento y del color luz, y aplicando las TIC, para expresar sensaciones en composiciones sencillas.
1, 3, 8	Física. Bachillerato, 2.º *	Bloque 4. Ondas	Dispersión. El color	8. Emplear las leyes de Snell para explicar los fenómenos de reflexión y refracción. 9. Relacionar los índices de refracción de dos materiales con el caso concreto de reflexión total. 14. Establecer las propiedades de la radiación electromagnética como consecuencia de la unificación de la electricidad, el magnetismo y la óptica en una única teoría. 15. Comprender las características y propiedades de las ondas electromagnéticas, como su longitud de onda, polarización o energía, en fenómenos de la vida cotidiana. 16. Identificar el color de los cuerpos como la interacción de la luz con los mismos. 17. Reconocer los fenómenos ondulatorios estudiados en fenómenos relacionados con la luz.	8.1. Experimenta y justifica, aplicando la ley de Snell, el comportamiento de la luz al cambiar de medio, conocidos los índices de refracción. 9.1. Obtiene el coeficiente de refracción de un medio a partir del ángulo formado por la onda reflejada y refractada. 9.2. Considera el fenómeno de reflexión total como el principio físico subyacente a la propagación de la luz en las fibras ópticas y su relevancia en las telecomunicaciones. 16.1. Justifica el color de un objeto en función de la luz absorbida y reflejada.

3, 4, 7, 9		Bloque 5. Óptica Geométrica	Sistemas ópticos: lentes y espejos. El ojo humano. Defectos visuales. Aplicaciones tecnológicas: instrumentos ópticos y la fibra óptica	<ol style="list-style-type: none"> 1. Formular e interpretar las leyes de la óptica geométrica. 2. Valorar los diagramas de rayos luminosos y las ecuaciones asociadas como medios que permiten predecir las características de las imágenes formadas en sistemas ópticos. 3. Conocer el funcionamiento óptico del ojo humano y sus defectos, y comprender el efecto de las lentes en la corrección de dichos efectos. 4. Aplicar las leyes de las lentes delgadas y los espejos planos al estudio de los instrumentos ópticos. 	<ol style="list-style-type: none"> 1.1. Explica procesos cotidianos a través de las leyes de la óptica geométrica. 2.1. Demuestra experimental y gráficamente la propagación rectilínea de la luz mediante un juego de prismas que conduzcan un haz de luz desde el emisor hasta una pantalla. 2.2. Obtiene el tamaño, la posición y la naturaleza de la imagen de un objeto producida por un espejo plano y una lente delgada realizando el trazado de rayos y aplicando las ecuaciones correspondientes. 3.1. Justifica los principales defectos ópticos del ojo humano: miopía, hipermetropía, presbicia y astigmatismo, empleando, para ello, un diagrama de rayos. 4.1. Establece el tipo y la disposición de los elementos empleados en los principales instrumentos ópticos, tales como la lupa, el microscopio, el telescopio y la cámara fotográfica, realizando el correspondiente trazado de rayos. 4.2. Analiza las aplicaciones de la lupa, el microscopio, el telescopio y la cámara fotográfica considerando las variaciones que experimenta la imagen con respecto al objeto.
2		Bloque 6. Física del siglo xx	Introducción a la teoría especial de la relatividad. El láser	<ol style="list-style-type: none"> 1. Valorar la motivación que llevó a Michelson y Morley a realizar su experimento, y discutir las implicaciones que de él se derivaron. 2. Aplicar las transformaciones de Lorentz al cálculo de la dilatación temporal y la contracción espacial que sufre un sistema cuando se desplaza a velocidades cercanas a las de la luz respecto a otro dado. 11. Describir las características fundamentales de la radiación láser, los principales tipos de 	<ol style="list-style-type: none"> 1.2. Reproduce esquemáticamente el experimento de Michelson y Morley, así como los cálculos asociados sobre la velocidad de la luz, analizando las consecuencias que se derivaron. 2.1. Calcula la dilatación del tiempo que experimenta un observador cuando se desplaza a velocidades cercanas a la de la luz con respecto a un sistema de referencia dado, aplicando las transformaciones de Lorentz.

				láseres existentes, su funcionamiento básico y sus principales aplicaciones.	2.2. Determina la contracción que experimenta un objeto cuando se encuentra en un sistema que se desplaza a velocidades cercanas a la de la luz con respecto a un sistema de referencia dado, aplicando las transformaciones de Lorentz. 11.2. Asocia el láser con la naturaleza cuántica de la materia y de la luz, justificando su funcionamiento de manera sencilla y reconociendo su papel en la sociedad actual.
4, 8	Cultura Audiovisual. Bachillerato, 1.º	Bloque 2. La imagen fija y su capacidad expresiva	Sistemas de captación de imágenes. La cámara fotográfica	4. Analizar la composición del color a través del sistema RGB. 5. Analizar el uso del color en la imagen fija: saturación, matiz, inversión, etc.	4.1. Analiza el sistema RGB de construcción del color.
8	Dibujo Artístico. Bachillerato, 1.º	Bloque 5. El color	El color	1. Conocer y aplicar los fundamentos teóricos sobre el color y las relaciones cromáticas, tanto en la expresión gráfico-plástica como en el análisis de diversas manifestaciones artísticas.	1.1. Aplica el color siguiendo las dimensiones de este (valor-luminosidad, saturación-intensidad y cromático-tono) en la representación de composiciones y formas naturales y artificiales. 1.2. Demuestra el conocimiento con explicaciones orales, escritas y gráficas de los fundamentos teóricos del color en composiciones y estudios cromáticos. 1.3. Aplica de manera expresiva el color en la obra plástica personal. 1.4. Analiza el uso del color observando las producciones artísticas de referencia en todas sus manifestaciones. 1.5. Representa los matices cromáticos, a partir de la observación del natural, mediante la mezcla de colores primarios.
4, 7, 10	Imagen y sonido. Bachillerato, 2.º	Bloque 4. Captación de imágenes fotográficas y de vídeo	Captación de imágenes fotográficas y de vídeo	1. Grabar piezas audiovisuales aplicando técnicas de captación de imágenes fotográficas y de vídeo, y reforzando su expresividad mediante los recursos y medios técnicos del lenguaje audiovisual.	1.1. Compara el proceso de captación de imágenes del ojo humano y de la percepción visual con la aplicación transferida a los sistemas de captación y reproducción visual.

4, 7	Fundamentos del Arte II. Bachillerato, 2.º	Bloque 3. Las vanguardias	Nacimiento de la fotografía. Los colores primarios. Teoría aditiva y sustractiva del color. Colores complementarios	<ol style="list-style-type: none"> 1. Relacionar los descubrimientos en la composición del color con su aplicación en la técnica pictórica. 2. Diferenciar las teorías de color aditiva y sustractiva. 	<ol style="list-style-type: none"> 1.1. Relaciona el descubrimiento de la descomposición de la imagen en colores primarios y su relación con la técnica impresionista. 2.1. Diferencia la construcción de colores con la luz de la creación con los pigmentos.
------	--	---------------------------	---	--	--

* (Introducción a la materia). El concepto de onda no se estudia en cursos anteriores y necesita, por tanto, un enfoque secuencial. En primer lugar, se trata desde un punto de vista descriptivo y, a continuación, desde un punto de vista funcional. Como casos prácticos concretos, se tratan el sonido y, de forma más amplia, la luz como onda electromagnética. La secuenciación elegida (primero los campos eléctrico y magnético, y, después, la luz) permite introducir la gran unificación de la física del siglo XIX y justificar la denominación de ondas electromagnéticas. La óptica geométrica se restringe al marco de la aproximación paraxial. Las ecuaciones de los sistemas ópticos se presentan desde un punto de vista operativo, con objeto de proporcionar al alumno una herramienta de análisis de sistemas ópticos complejos.

IV. Glosario

acomodación: proceso que permite al ojo formar, en la retina, imágenes nítidas de objetos situados a diferentes distancias, modificando la potencia del cristalino (caps. 4, 7, 9).

agudeza visual: capacidad para discernir los detalles de un objeto (caps. 7, 9).

ambliopía u **ojo vago:** disminución funcional de la agudeza visual que no mejora con la compensación (cap. 9).

anisometropía: diferencia en el error refractivo de un ojo y otro (cap. 9).

astenopia: cansancio, fatiga ocular (cap. 9).

brillo: el lustre o brillo es una propiedad física que describe la manera en que la luz interactúa con una superficie material y se refleja en ella. Depende de varios factores, como el índice de refracción del material, el pulido de la superficie, etc. Nótese que en español se utiliza la palabra «brillo» con distintas acepciones, que son las correspondientes en inglés a *gloss* (la que hemos definido aquí) y *brightness* (caps. 3, 8).

calcita: mineral de tipo carbonato, de composición química CaCO_3 (caps. 5, 8).

capas ganglionares, bipolares, horizontales y amacrinas: son capas de neuronas de la retina, conectadas entre sí, responsables de recibir las respuestas de los fotorreceptores, y de procesarlas y canalizarlas hacia el cerebro a través del nervio óptico. Durante esta transmisión, comienza el proceso de analizar activamente la imagen que se forma en la retina, resaltando cierta información e ignorando otra, y tomando decisiones sobre cuál es importante (cap. 7).

coeficientes de reflexión y transmisión de Fresnel: coeficientes relativos entre la amplitud de la onda luminosa reflejada y transmitida, y la amplitud de la onda luminosa incidente en una superficie, respectivamente (caps. 1, 3, 5, 6).

Comisión Internacional de Iluminación (CIE): la CIE, acrónimo de su nombre en francés (Commission Internationale de l'Éclairage), es una organización independiente sin ánimo de lucro que sirve a los países miembros y se dedica a la cooperación a nivel mundial en el intercambio de información sobre todos los asuntos relacionados con la ciencia, el arte de la luz y la iluminación, el color y la visión, la fotobiología y la tecnología de la imagen. Desde su creación en 1913, la CIE se ha convertido en una organización profesional considerada la mayor autoridad en la materia y, como tal, es reconocida por la ISO como un organismo internacional de normalización (cap. 2).

congruencia de la luz o **coherencia de la luz:** característica de una fuente de luz relacionada con la capacidad de mantener una constancia en la fase de la onda electromagnética que produce. Se relaciona con el grado de monocromaticidad de la fuente y, también, con su extensión espacial (caps. 2, 6).

córtex visual: área de la corteza cerebral responsable del procesamiento de la información visual que está situada en el lóbulo occipital (parte posterior de la cabeza). Es uno de los cuatro mayores lóbulos en los que se puede dividir la estructura de la corteza cerebral, y se compone, a su vez, de la llamada área 17 de Brodmann (córtex visual primario), las áreas de Brodmann 18 y 19, y el córtex extraestria (cap. 10).

crisales fotónicos: son materiales que presentan una variación periódica de su índice de refracción en el espacio, en una, dos o tres dimensiones. Fueron estudiados y caracterizados por los profesores Eli Yablonovitch y Sajeev John en 1987 para su aplicación específica en la creación de materiales que no transmiten determinadas bandas espectrales de la luz (cap. 6).

defecto de refracción o **ametropía:** es aquella situación en la que la imagen de un objeto no se forma en la retina y, por tanto, se ve desenfocada. Los defectos de refracción son la miopía, la hipermetropía y el astigmatismo (caps. 4, 9).

dioptría: el error refractivo se mide en dioptrías y representa la inversa de la distancia en metros al punto próximo de un sujeto amétrope desde su ojo (caps. 4, 9).

dioptrio: superficie de separación de medios con distinto índice de refracción (caps. 3, 4).

diplopía: visión doble (cap. 9).

disfunción de la vergencia fusional: cuando las capacidades, tanto de convergencia (objetos cercanos) como de divergencia (objetos lejanos), están disminuidas (cap. 9).

dominio paraxial: aquel en el que los ángulos se pueden considerar aproximadamente iguales a sus senos y tangentes (cap. 4).

efecto fotoeléctrico externo: emisión de electrones por un material producida por la absorción de radiación óptica (luz) (cap. 2).

efecto fotoeléctrico interno: excitación de un electrón desde la banda de valencia hasta la de conducción dentro de un material por la absorción de radiación óptica (luz) (cap. 2).

eje axial: eje anteroposterior del ojo (cap. 9).

endoforia básica: la persona presenta una capacidad de convergencia elevada que no se ve compensada con la divergencia necesaria (cap. 9).

espectroscopia: análisis del espectro de emisión o absorción de una determinada fuente emisora con el fin de determinar su composición química u otras características que modifican dicha emisión (cap. 6).

estereoscopio lenticular: sistema óptico de formación de imagen estereoscópica que incorpora dos lentes para visualizar las imágenes correspondientes en cada ojo, a diferencia de los diseños anteriores a Brewster, que empleaban un par de espejos (cap. 5).

exoforia básica: la persona presenta una capacidad de divergencia elevada que no se ve compensada con la convergencia necesaria (cap. 9).

fóvea: del latín *fovĕa*, ‘depresión’, parte central de la mácula lútea responsable de la visión de detalles (caps. 7, 9).

frecuencia de modulación: frecuencia con la que se hace variar temporalmente la potencia radiante de un haz de luz (cap. 2).

gen recesivo: en genética, se distingue entre alelos dominantes y recesivos. El gen recesivo se aplica al miembro de un par alélico imposibilitado para manifestarse cuando el alelo dominante está presente (cap. 7).

herapatita: sulfato de iodoquinina. Según Edwin H. Land, fue descubierta en 1852 por William Bird Herapath (cap. 5).

holografía: del griego *holos*, ‘todo’, y *grafe*, ‘escritura’, técnica para producir reconstrucciones tridimensionales de objetos mediante el registro y la posterior recuperación de haces de luz de una fuente de referencia y del haz que proviene del objeto. Desarrollada a partir de las investigaciones de Dennis Gabor en 1950, no pudo realizarse experimentalmente de forma efectiva hasta la aparición del láser en 1960 (caps. 6, 7).

iluminación crítica: sistema de iluminación del que están dotados algunos tipos de proyectores, como, por ejemplo, los de cine (cap. 4).

iluminantes patrones: distribuciones espectrales de flujo radiante definidas por la CIE. En la actualidad, hay dos tipos: el iluminante A y el iluminante D65 (cap. 2).

imágenes de Purkinje: cuatro imágenes que se forman como consecuencia de la reflexión de la luz en las cuatro superficies refractoras del ojo (caras anterior y posterior de la córnea, y caras anterior y

posterior del cristalino). La cantidad de luz reflejada en cada una de esas superficies nos da información de algunos parámetros ópticos del ojo, como el radio de curvatura de la cara anterior de la córnea (cap. 7).

inflexibilidad de vergencias: dificultad para hacer los cambios cerca-lejos o lejos-cerca, apareciendo visión doble, durante unos segundos, al realizarlos (cap. 9).

interferometría: conjunto de técnicas de medida basadas en el análisis de patrones de interferencia o en el uso de dispositivos específicos, denominados interferómetros, para producir interferencia. (caps. 1, 6).

iridiscencia: fenómeno óptico por el cual la luz reflejada adquiere un tono diferente en función del ángulo de observación e iluminación (goniocromatismo). Este fenómeno se basa en las interferencias de los haces obtenidos en las reflexiones múltiples de la luz en las superficies del material (caps. 6, 8).

lentes difraccionales: sistemas formadores de imagen en los cuales los haces de luz se modifican por difracción. Un ejemplo típico son las lupas planas, inspiradas por el diseño de placas zonales de surcos concéntricos introducido por Jean Augustin Fresnel (cap. 6).

mácula o mácula lútea: del latín *macula*, 'mancha', y *lutea*, 'amarilla', es una zona ovalada muy cerca del centro de la retina, de un diámetro de aproximadamente 5,5 mm, donde tenemos la mejor visión, ya que, entre otras características, posee muy poco grosor, carece prácticamente de bastones y la densidad de conos por unidad de superficie es la mayor de toda la retina, alcanzando un valor de 140.000 conos/mm². Su color es debido a pigmentos xantofílicos como la luteína y la zeaxantina (cap. 7).

medios de gradiente de índice: son medios no homogéneos con respecto a su índice de refracción. En estos medios, el índice de refracción no es constante, ya que varía gradualmente de punto a punto. Se suele usar el acrónimo GRIN (del inglés *gradient-index*) para denominar a estos medios (cap. 1).

oculomotricidad: movimientos de los ojos, sacádicos, fijaciones y seguimientos (cap. 9).

opalescencia: aspecto de algunos materiales donde se mezclan dos tonos, uno por la luz transmitida y otro de la luz difundida, dando como resultado una apariencia lechosa con irisaciones. Cuanta mayor es la difusión (más partículas y/o más grandes), menos transparente es el material. El fenómeno recibe este nombre por aparecer en el ópalo, un tipo de mineral (cap. 8).

patrón difraccional: distribución de la intensidad de la luz que varía en el espacio producida por la difracción de la luz (cap. 6).

patrón de interferencias o patrón interferencial: distribución de la intensidad de la luz que varía en el espacio como consecuencia de la superposición de dos o más ondas debida a los fenómenos de interferencia (cap. 6).

polarímetros: sistemas ópticos para la determinación del estado de polarización de la luz (cap. 5).

polímero alcohol polivinilo: conocido como PVA, polímero sintético soluble en agua, de fórmula química general $[\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})]_n$ (cap. 5).

potencia (del ojo): la potencia de una lente es una magnitud física que indica la capacidad de esta para hacer converger o diverger los haces de luz que la atraviesan. El ojo actúa como un sistema óptico; por esta razón, hablamos de la «potencia del ojo» (cap. 7).

propagación colineal: propagación de dos ondas paralelas entre sí y superpuestas (cap. 5).

radiación (ionizante): radiaciones electromagnéticas de fotones de alta energía, como la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma (cap. 1).

rejillas conductoras: estructura de alambres metálicos paralelos entre sí (cap. 5).

semiconductor: material sólido de conductividad eléctrica intermedia entre los conductores (alta conductividad) y los aislantes (conductividad casi nula) (caps. 1, 2).

sensibilidad espectral o **responsividad espectral**: curva que describe la respuesta de un sistema a una luz de distinta longitud de onda que incide sobre él. Al variar la longitud de onda de esa luz monocromática sobre el espectro visible, y manteniendo fija su potencia, se consigue determinar la responsividad espectral. En el caso del sistema visual humano, se habla de las responsividades espectrales de sus cuatro tipos de fotorreceptores: los bastones y los conos L, M y S. En el caso de una cámara de fotos digital, podemos hablar de las responsividades espectrales de los tres canales: R, G y B (caps. 2, 7).

sistema catadióptrico: sistema óptico formado por la asociación de superficies refractantes y reflejantes (cap. 4).

sistema de iluminación Köhler: sistema de iluminación del que están dotados los proyectores de vistas fijos (cap. 4).

sistema de revolución centrado: sistema óptico cuyas superficies tienen sus centros de curvatura alineados (cap. 4).

sistema óptico: conjunto de superficies que separan medios de índices de refracción distintos (caps. 3, 4, 7, 9).

sistemas de computación cuántica: sistemas de computación basados en el uso de qubits (sistemas de dos estados cuánticos) (cap. 1).

superficie dieléctrica: superficie plana de un material dieléctrico (es decir, de un material aislante eléctrico) que tiene una alta transparencia a la luz (cap. 5).

terapia visual: conjunto de técnicas encaminadas a hacer desaparecer la sintomatología y la visión, más confortable y eficiente (cap. 9).

tomografía: del griego *tomos*, 'sección', y *grafe*, 'escritura', técnica de análisis basada en producir diferentes cortes de un objeto, usualmente mediante un haz de radiación que penetra en el mismo a diferentes profundidades. Se utiliza para múltiples aplicaciones en ciencias biomédicas, estudio de materiales y de la atmósfera (cap. 6).

transducción: hace referencia a la conversión de un tipo de energía en otra de diferente naturaleza. En el caso de la visión y la percepción visual, este término se utiliza para describir la conversión de la energía luminosa a fotoquímica y eléctrica que se produce cuando la luz estimula los fotorreceptores en la retina (cap. 10).

translucencia: propiedad de un material relativa a la transmisión difusa de la luz que no permite ver con claridad lo que está detrás de la muestra y no está en contacto con ella. Estos materiales no son ni opacos ni transparentes (cap. 8).

transistores de capa delgada: conocidos como TFT, tipo especial de transistor electrónico que se fabrica depositando finas películas de un semiconductor activo, así como una capa de material dieléctrico y contactos metálicos sobre un sustrato típicamente de vidrio (cap. 5).

turmalina: mineral del grupo de los ciclosilicatos considerado una piedra semipreciosa (cap. 5).

V. Equipo

Javier Romero Mora

Javier Romero Mora es catedrático de Óptica de la Universidad de Granada, donde se doctoró en Ciencias Físicas en 1984. Su docencia se ha centrado en la impartición de asignaturas en las licenciaturas de Ciencias Físicas y Químicas, en Ingeniería de Telecomunicaciones, en la diplomatura de Óptica y Optometría, y, actualmente, en los grados de Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación y de Óptica y Optometría. Asimismo, ha ejercido como docente en cursos de doctorado y en másteres; en especial, en el máster Erasmus-Mundus CIMET (Color in Informatics and Media Technology). Los cursos impartidos se han centrado, principalmente, en los aspectos básicos de la óptica y la fotónica, así como en el procesado óptico de imágenes y la colorimetría. En su currículum como investigador, se encuentran más de 100 artículos publicados en revistas especializadas en el campo de la colorimetría, la visión del color y la adquisición y el procesado óptico y digital de imágenes a color y multispectrales. También ha trabajado en el campo de la didáctica de la óptica y su divulgación, realizando numerosas actividades dirigidas a profesores y alumnos de secundaria. En la actualidad, es presidente de la International Colour Association.



Joaquín Campos Acosta

Joaquín Campos Acosta, natural de Málaga, se licenció en Ciencias, en la rama de Físicas, en la Universidad de Granada. Realizó la tesis doctoral en el Instituto de Óptica Daza de Valdés del CSIC, y la defendió en la Universidad de Granada. Ha desarrollado su carrera en el CSIC, indagando sobre temas relacionados de una u otra forma con medidas de radiación óptica. Su trayectoria como investigador ha destacado por la combinación de estudios de carácter fundamental y dos tipos: el aplicada. Además de haber publicado los resultados de sus investigaciones en revistas científicas y congresos, asiste con asiduidad como profesor a cursos de formación y especialización, doctorados y másteres. Participa en comisiones técnicas nacionales e internacionales (CIE) y en la organización de congresos. Ha desempeñado cargos de gestión de la investigación en el CSIC y en sociedades científicas.



M.^a Sagrario Millán y García Varela

Doctora en Ciencias Físicas y catedrática en la Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech. Imparte cursos de Óptica y Procesado de Imagen en el Grado de Óptica y Optometría, en el master in Photonics y en el Máster en Optometría y Ciencias de la Visión. Profesora de los programas de doctorado en Ingeniería Óptica e Ingeniería Biomédica, ha sido presidenta del Comité de Técnicas de la Imagen de la Sociedad Española de Óptica y representante del Comité Territorial Español en la International Commission for Optics. También es miembro de la Optical Society of America y *fellow member* de SPIE y de la European Optical Society. M.^a Sagrario también es autora del libro de texto *Óptica geométrica* (Ariel, 2004).



Enrique F. Hita Villaverde

Enrique F. Hita Villaverde es catedrático de Óptica en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada, donde ha sido decano durante nueve años y defensor universitario durante siete. Ha ejercido como presidente de la Sociedad Española de Óptica y del Comité de Color de la misma. Pertenece a diversas asociaciones internacionales del campo de la óptica. En la actualidad, es el responsable del grupo de investigación Grupo de Óptica de Granada (FQM 151). Ha participado en más de 40 proyectos de investigación subvencionados por diferentes entidades oficiales, así como en varios de innovación docente. Además, ha publicado más de 150 trabajos de investigación en revistas especializadas y ha presentado alrededor de 200 comunicaciones en congresos y reuniones científicas.



M.^a Josefa Yzuel Giménez

M.^a Josefa Yzuel Giménez es profesora emérita de la Universitat Autònoma de Barcelona. Ha sido también profesora agregada de Óptica y Estructura de la Materia en la Universidad de Zaragoza, catedrática de Óptica en la Universidad de Granada y, desde 1983, trabaja en el Departamento de Física de la Universitat Autònoma de Barcelona. Ha publicado más de 250 artículos en el campo de la óptica y ha dirigido 20 tesis doctorales. Ha recibido el doctorado honoris causa de la Universidad Miguel Hernández de Elche (enero 2012), la Encomienda de la Orden Civil de Alfonso X el Sabio en el 2013 y la Medalla de Física 2014, el más alto reconocimiento de la Real Sociedad Española de Física y la Fundación BBVA. En el 2009 fue presidenta de SPIE (The International Society for Optics and Photonics). En la actualidad, es vicepresidenta de la International Commission for Optics (ICO) Bureau y, desde el 2015, preside el Comité Español para la celebración del Año Internacional de la Luz.



Ignacio Moreno Soriano

Ignacio Moreno es catedrático de Óptica en la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH). Es experto en el campo de los moduladores ópticos de cristal líquido y sus aplicaciones, y es coautor de más de 120 artículos publicados en revistas internacionales. Es *fellw member* de SPIE (The International Society for Optics and Photonics) y *senior member* de OSA (The Optical Society of America). En el 2012 obtuvo el premio EOS2012 de la EOS (European Optical Society). Del 2005 al 2014 fue editor de la revista *Óptica Pura y Aplicada (OPA)* y desde el 2014 es vicepresidente de SEDOPTICA, la Sociedad Española de Óptica. Actualmente es *associate editor* de la revista internacional *Optical Engineering* y coordinador del programa de doctorado en Tecnologías Industriales y de Telecomunicación de la UMH.



Eva M.^a Valero Benito

Eva M.^a Valero es doctora, desde el año 2000, en Ciencias Físicas por la Universidad de Granada. Desde el 2001 hasta la actualidad, es profesora en el Departamento de Óptica de dicha universidad. Ha ido ocupando diferentes puestos hasta ostentar su actual cargo



como profesora titular, que obtuvo en el 2007. Ejerce como docente en varias asignaturas de los grados en Física y en Óptica y Optometría. Es miembro del grupo de investigación Grupo de Óptica de Granada (FQM 151) y del Laboratorio de Imágenes en Color (Color Imaging Lab), desde su creación. Sus campos de investigación fueron, en un principio, la visión espacial del color y la psicofísica, y, más recientemente, se ha centrado en el ámbito de las imágenes multispectrales y el procesado de imágenes en color.

Miguel Ángel Martínez

Miguel Ángel es ingeniero de Telecomunicaciones especializado en Imagen y Sonido por la Universidad de Málaga desde el 2007. Terminó el máster bianual Erasmus-Mundus CIMET (Color in Informatics and Media Technology) en el 2012. Desde el 2013 es estudiante del programa de doctorado en Física y Ciencias del Espacio en la Universidad de Granada, donde es miembro del Color Imaging Lab del Departamento de Óptica. Su investigación se centra en el diseño y desarrollo de sistemas digitales de captura y procesado de imágenes multispectrales y de alto rango dinámico. Participa en proyectos de investigación internacionales con universidades y empresas de países como Finlandia, los Países Bajos, Italia, Alemania y Japón, siendo este último su destino de estancia de doctorado. Colabora con tareas docentes en el máster CIMET y en el Grado en Óptica y Optometría.



Javier Hernández Andrés

Javier Hernández Andrés es doctor en Ciencias Físicas y profesor en el Departamento de Óptica de la Universidad de Granada, donde desempeña, desde hace veinte años, actividades docentes, investigadoras y de divulgación científica. Su trayectoria científica se centra en el campo de la ciencia y tecnología del color, y, en particular, en el ámbito de las imágenes espectrales (estimación espectral, sistemas de imagen multispectrales, HDR, etc.). Autor de 50 artículos en revistas internacionales y más de 80 comunicaciones en congresos, es inventor de dos patentes. Su experiencia docente se centra en las áreas de la óptica, la visión, la óptica de Fourier y las ciencias y tecnologías multispectrales. Fue *topical editor* de la revista *Journal of the Optical Society of America A* del 2007 al 2013, y desde el 2008 pertenece al comité editorial de la revista *European Journal of Physics*. Asimismo, desde hace unos años utiliza su afición a la magia con fines divulgativos.



Luis Gómez Robledo

Luis Gómez Robledo es doctor en Ciencias Físicas por la Universidad de Granada desde el año 2011. Desde el 2012 hasta la actualidad, es profesor del Departamento de Óptica de dicha universidad. Licenciado en Física y graduado en Óptica y Optometría, imparte clases en varias asignaturas del Grado en Óptica y del máster Color in Science and Industry (COSI). Es miembro del Laboratorio de Colorimetría Básica y Aplicada, cuya investigación se centra en el color de los alimentos y en la percepción de diferencias de color. Con un gran interés por la divulgación, ha sido animador científico durante dos años en el Parque de las Ciencias de Andalucía y ha participado en diversas actividades de divulgación de la física desde el 2002.



Rafael Huertas Roa

Rafael Huertas Roa nació en La Peza (Granada) en 1974. Es licenciado en Ciencias Físicas desde 1997 y diplomado en Óptica y Optometría en 1998 por la Universidad de Granada (UGR). Es doctor en Ciencias Físicas por la UGR desde el 2004. Desde ese mismo año hasta el 2011 fue profesor ayudante, profesor ayudante doctor y profesor doctor. Desde el 2011 hasta la actualidad, es profesor titular en el Departamento de Óptica de la UGR. Ha impartido asignaturas en la Diplomatura en Óptica y Optometría, la Licenciatura de Ciencias Físicas, el Grado en Óptica y Optometría, y el Grado en Física de la UGR, así como en el máster FISYMAT y en el máster europeo Erasmus Mundus CIMET. Sus principales líneas de investigación son la colorimetría básica y aplicada (en particular, en la textura y el color), las fórmulas de diferencias de color, las emociones de color, etc. Ha participado en 12 proyectos de investigación y actualmente es el investigador principal en uno de ellos. Es miembro de los comités técnicos 1-86, 1-93 y 1-55 de la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE).



José Antonio García García

Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad de Granada (UGR) en 1991 y profesor titular (acreditado como catedrático) en el Departamento de Óptica de la UGR desde 1994. Ha realizado una amplia labor como investigador en las líneas de la colorimetría básica y aplicada y de la visión del color. Actualmente, se centra en la enseñanza y divulgación de la óptica y los problemas visuales en niños y en sus repercusiones en el rendimiento académico. Su amplia labor docente comprende desde las enseñanzas medias hasta la universidad, donde ha impartido asignaturas en licenciaturas, grados, másteres y doctorados, así como en enseñanzas no regladas. Coordinador del Grupo para la Difusión y Divulgación de la Óptica (GDDO), participa en muchas actividades de tipo divulgativo (Semana de la Ciencia, Noche de los Investigadores, Ciencia y Sociedad, Campus Científico de Verano, etc.). Fue coordinador de la exposición temporal *Lo que el ojo no ve*, en el Parque de las Ciencias de Andalucía. Actualmente, es coordinador del Grado en Óptica y Optometría de la UGR.



M.^a Angustias Pérez Fernández

M.^a Angustias Pérez Fernández es diplomada en Profesorado de Educación General Básica por la Universidad de Granada desde el año 1977, diplomada en Óptica por la misma universidad desde 1992 y, también, en Óptica y Optometría desde 1996. En el 2009 obtuvo el título del Máster en Optometría por la Universidad de Granada. Profesora titular de Escuela Universitaria desde el 2003, ha impartido clases teóricas y prácticas en la Diplomatura en Óptica y Optometría, en el Grado en Óptica y Optometría, y en el Máster Universitario en Óptica y Optometría Avanzadas. Las asignaturas que imparte son: Optometría (de distintos cursos), Salud Visual y Desarrollo, y Rehabilitación Visual. Su experiencia profesional ha estado centrada en la optometría pediátrica y la terapia visual, con especial interés por las disfunciones visuales que interfieren en el rendimiento académico y que pueden llevar al niño al fracaso escolar.



Juan Luis Nieves Gómez

Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad de Granada (UGR) desde 1996 y profesor titular (acreditado como catedrático) del Departamento de Óptica de la UGR desde el 2001. Su actividad investigadora se centra en los campos del análisis y la síntesis cromáticas para el reconocimiento automático del color, el análisis espectral de escenas naturales y el estudio de la respuesta de los mecanismos de visión del color en tareas de detección espacial y de descuento del iluminante. Ha participado en programas de doctorado, másteres oficiales, cursos y otras actividades de divulgación relacionadas con la óptica, la imagen en color y la visión, y es miembro de diversos comités científicos, así como organizador de congresos, tanto nacionales como internacionales. En la actualidad, es coordinador en la UGR del máster europeo Color in Science and Industry (COSI) y del máster Erasmus-Mundus CIMET (Color in Informatics and Media Technology).



F. Javier Perales Palacios

Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad de Granada y catedrático de Didáctica de las Ciencias Experimentales de la misma universidad, donde ejerce como docente de grado y posgrado en la Facultad de Ciencias de la Educación, tras haber enseñado antes en otras universidades españolas y extranjeras. Responsable del grupo Didáctica de las Ciencias Experimentales y de la Sostenibilidad, sus principales líneas de investigación se han centrado en la didáctica de la física y en la educación ambiental. Sobre dichas temáticas, ha dirigido 18 tesis a estudiantes españoles y extranjeros, ha llevado a cabo 111 aportaciones a congresos y 180 publicaciones en formato libro y artículo de revista, y ha participado en 18 proyectos de investigación de carácter nacional e internacional. Fue el primer presidente de la Asociación Española de Profesores e Investigadores en Didáctica de las Ciencias Experimentales (APICE) y, desde entonces, ha desempeñado otros cargos de responsabilidad en la gestión universitaria y en la evaluación de la investigación.





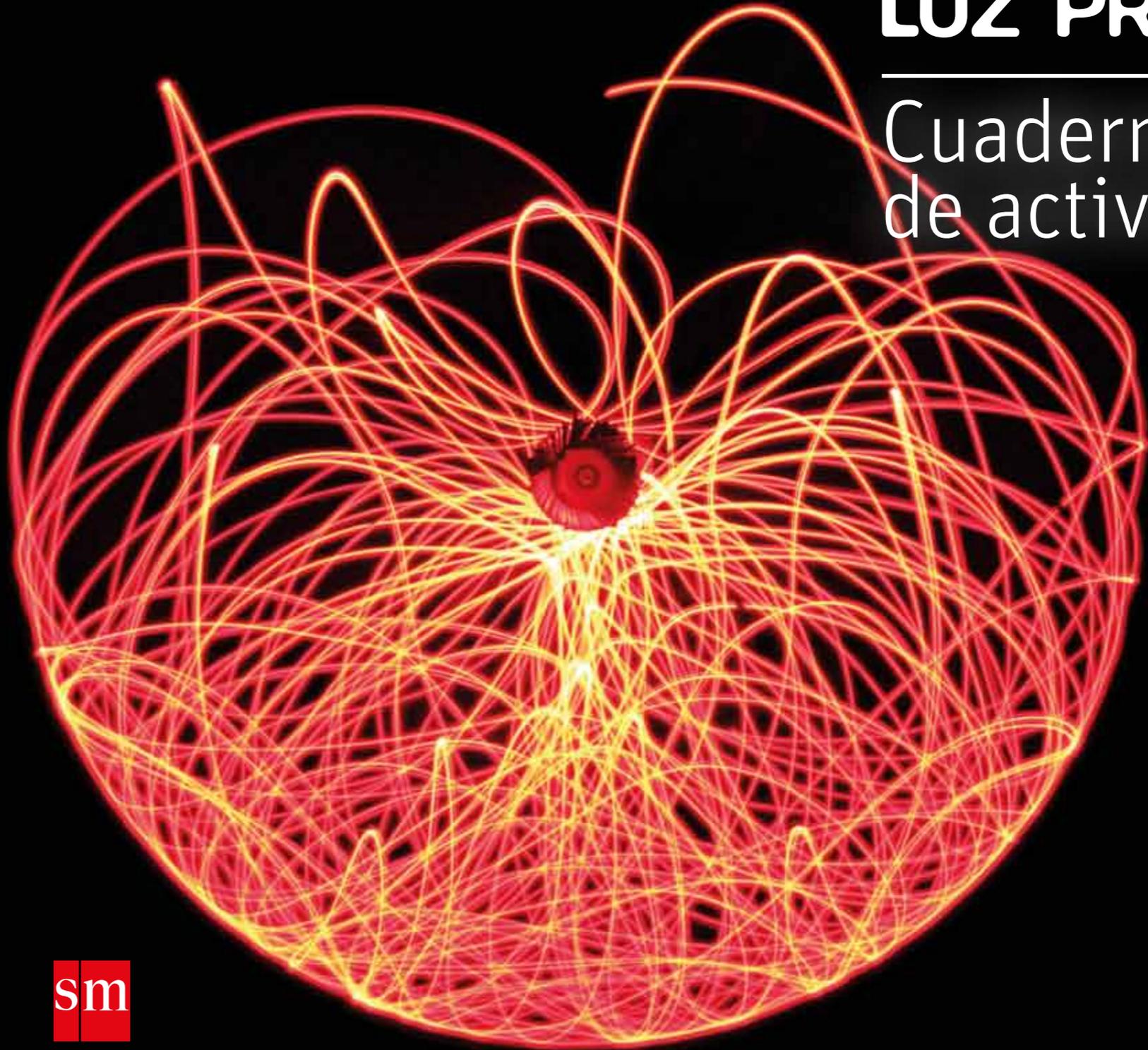
FECYT  **FUNDACIÓN ESPAÑOLA
PARA LA CIENCIA
Y LA TECNOLOGÍA**
www.fecyt.es



**INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015**

CIENCIA CON LUZ PROPIA

Cuaderno
de actividades

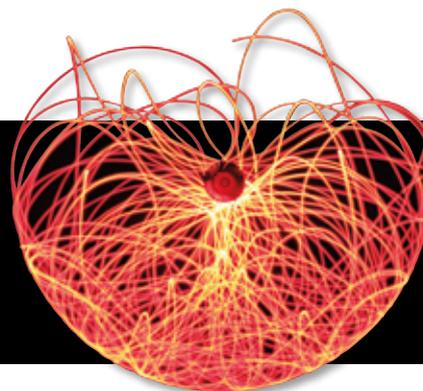


Cuaderno y soluciones en www.smconectados.com
(asociado a los libros de Física de Bachillerato)



CIENCIA CON LUZ PROPIA

Cuaderno de actividades



La Luz y su detección

Viendo la luz.....	2
Infrarrojo: lo que el ojo no ve	4

Óptica geométrica y física

Rayos y más rayos	6
Luz polarizada por todas partes.....	8
Interferencia y difracción	10
De la luz a la relatividad	12
Luz y color	14

La historia de la iluminación

Del Sol al LED.....	16
---------------------	----

Luz, vida y Tierra

Vista y cerebro	18
Láseres y visión	20
Percepción visual.....	22
Efecto invernadero, ¿el malo de la peli?	24
La “luz”, una linterna para buscar vida	26
Fotosíntesis	28

Locos por la ciencia

Huygens, Newton... y la naturaleza de la luz.....	30
---	----

Este cuaderno, junto con las soluciones de las actividades, está accesible, previo registro gratuito, a todos los docentes en www.smconectados.com, como un recurso asociado a Bachillerato (material de apoyo y refuerzo).

Viendo la luz

“Hay mucha luz aquí”; “que no le dé la luz a la planta”; “piso interior con mucha luz”,... Estas, y otras muchas que seguro conoces, son frases que se escuchan muy a menudo. Parece que la luz es algo que todos conocen y que todos ven. ¿Seguro? Te proponemos unos sencillos experimentos para que veas la luz desde un punto de vista nuevo y reflexiones sobre qué es y cómo influye en nuestras vidas.



¿Por qué vemos estos rayos de sol entre las nubes, si no se dirigen directamente a nuestros ojos?

¿Por qué vemos la luz?

Empecemos con un experimento sencillo y con una pregunta. Llena un vaso de agua, añade unas gotas de leche e ilumínalo con un puntero láser (el más barato que encuentres en un bazar) en una habitación a oscuras. En el agua verás el haz del láser propagándose y atravesando el vaso de un lado al otro.



Pero ¿por qué eres capaz de verlo en esas condiciones? Mira estas dos respuestas y razona cuál puede ser la verdadera:

- Porque tus ojos emiten algo (una especie de rayo de “visión”) que de algún modo puede tocar el haz de luz láser y te permite verlo.
- Porque las partículas de leche desvían hacia tus ojos parte de la luz que lleva el haz láser.

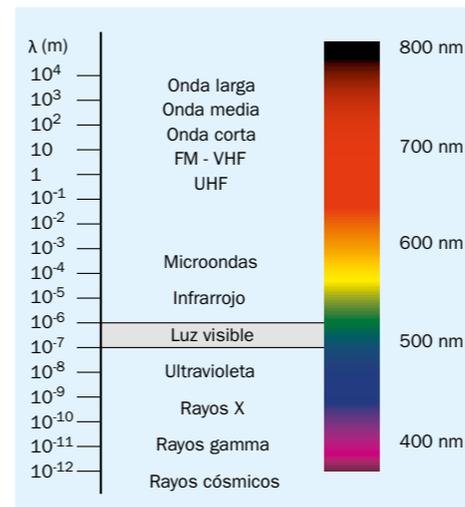
Naturalmente, la respuesta correcta es la b): la luz se emite, se propaga, se refleja, se refracta, se esparce, se absorbe, se difracta, interfiere e interactúa con la materia, pero solo se detecta lo que llega al detector, que en este caso es el ojo. No existen los “rayos de visión” que emiten los ojos como los de Superman. Identificar esa cadena “de dónde sale la luz”, “por dónde pasa”, “a dónde llega” es algo muy importante para poder estudiar los fenómenos luminosos.

- Prueba a mezclar el agua con un poco de jabón lavavajillas. Agita después el agua con una cuchara y observa si varía tu percepción del haz láser que atraviesa el vaso, conforme pasa el tiempo. ¿Qué ha ocurrido?
- Ahora cambia el vaso de agua por el humo que sale de un palito de incienso. ¿Qué es lo que observas?
- Tras los experimentos anteriores, ¿podrías decir en qué condiciones se observa mejor la luz del láser y por qué?

Una situación parecida ocurre cuando la luz del sol se filtra entre las nubes y vemos lo que describiríamos como rayos de luz provenientes del sol, aunque no se dirijan directamente a nuestros ojos.

IMPORTANTE: sé muy cuidadoso al usar un puntero láser, su luz es muy peligrosa para los ojos.

Pero... ¿por qué vemos luces de colores distintos?



La luz como onda electromagnética

La luz visible es una pequeña parte de las ondas electromagnéticas. Todas tienen la misma naturaleza física, y se diferencian entre sí por propiedades como la longitud de onda, λ , la frecuencia, ν , o la energía por fotón, E , ligadas por las siguientes relaciones:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad E = h\nu$$

Donde $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ es la velocidad de la luz y $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ es la constante de Planck. La longitud de onda, la frecuencia y la energía por fotón son importantes, porque de ellas depende lo que podemos “ver” con cada tipo de radiación electromagnética: tamaños de los objetos, velocidad de los procesos y energías de los mismos. A la izquierda tienes un esquema del “espectro electromagnético” que resume los diferentes tipos de luz.

Onda EM	λ (nm)	ν (MHz)	$E_{\text{fotón}}$ (J)
FM (radio)	•	90 MHz	•
Teléfono móvil	•	900 MHz	•
Horno de microondas	•	2450 MHz	•
Láser rojo He-Ne	532 nm	•	•
Lámpara de luz negra (UV)	570 nm	•	•
Rayos X	1 nm	•	•

Copia y completa la tabla de la derecha para que puedas comparar las características de algunos casos concretos de ondas situadas en diferentes partes del espectro electromagnético.

El cielo azul

El Sol es la principal fuente de luz en nuestro planeta que nos llega de forma directa y también indirectamente. Por ejemplo, la luz azul del cielo es luz solar dispersada por las partículas de la atmósfera. Por ello esa luz solar que no venía directamente hacia nosotros acaba llegando a nuestros ojos, como ocurría con el haz láser en el experimento de la página anterior (fíjate que, de noche, cuando no hay sol, el cielo es negro, no emite luz). Este fenómeno se denomina esparcimiento de la luz y es más efectivo para la luz de longitud de onda más corta (azul). El mismo fenómeno explica los tonos rojizos de los atardeceres.



Puedes reproducir este efecto en tu casa. En una habitación con poca luz, ilumina con una linterna un recipiente transparente con agua y ve añadiendo gotas de leche al agua.

- Observa la luz que atraviesa el agua de frente. ¿Qué tono tiene la luz? ¿Cambia conforme vas añadiendo leche?
- Ahora observa la luz mirando desde arriba. ¿Qué ocurre ahora con el color de la luz?
- Da una explicación a las observaciones anteriores. OJO: el efecto es débil y puede costarte un poco conseguir verlo.

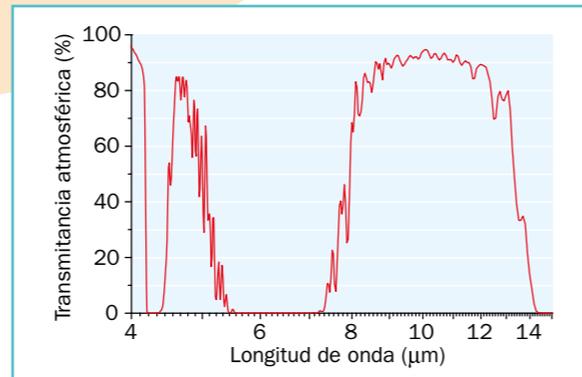
Infrarrojo:
lo que el ojo
no ve

La radiación infrarroja (IR), al igual que la luz visible, es un tipo de radiación electromagnética. Lo único que las diferencia son los valores de las longitudes de onda asociadas, que en el caso del infrarrojo abarcan el rango aproximado 760 nm – 1 mm. La radiación infrarroja tiene multitud de aplicaciones en muy diversos campos, desde medioambientales hasta militares (pasando por el cinematográfico Depredador). Todos los cuerpos (el Sol, el cuerpo humano, la atmósfera, la superficie de la Tierra...) emiten radiación infrarroja, algo que familiarmente se conoce como “calor”.



¿Cómo vemos el infrarrojo?

De la medida de la radiación infrarroja emitida por un cuerpo se puede obtener información muy interesante sobre el mismo. La teledetección IR consiste en determinar qué tipo de información física podemos obtener. Aunque el rango de longitudes de onda correspondientes al infrarrojo es muy amplio, el más interesante para estos estudios se extiende desde 1 a 20 μm . En muchas ocasiones, la radiación que se quiere detectar viaja a través de la atmósfera, donde hay presentes gases que son capaces de absorber y emitir radiación IR a determinadas longitudes de onda. La figura representa el porcentaje de energía que podría atravesar 1 km de una atmósfera estándar (transmitancia atmosférica). Se puede observar que hay regiones espectrales donde la transmitancia es muy alta. Estas regiones se llaman **ventanas atmosféricas**, y son para las que se diseñan la mayoría de los sensores de medición IR (para las longitudes de onda en las que la atmósfera absorbe casi toda la energía, no tiene mucho sentido medir dicha radiación).



Las cámaras IR comerciales trabajan principalmente en dos ventanas espectrales: la región 3-5 μm (“infrarrojo medio” MIR) y la región 8-12 μm (“infrarrojo térmico” TIR). Las cámaras MIR suelen utilizarse para detectar fenómenos de alta temperatura, mientras que las cámaras TIR se usan en condiciones de temperatura ambiente (visión nocturna).

Las matrices de detectores de las cámaras suelen fabricarse con aleaciones de semiconductores como InSb, SPb o SePb (cámaras MIR) y una aleación de mercurio, cadmio y telurio llamada MCT para las cámaras TIR. Estos detectores varían sus propiedades de conducción eléctrica al recibir radiación IR, son de tipo cuántico y muy eficientes. Su principal problema es que necesitan ser refrigerados. Actualmente se ha desarrollado el mercado de los microbolómetros tanto para MIR como para TIR. Estos dispositivos aumentan su temperatura al absorber la radiación, y su capacidad de detección, aunque peor que la de los detectores cuánticos, es competitiva, y tienen la ventaja de no necesitar refrigeración.

- Qué tipo de cámaras utilizarías preferentemente en la detección de personas? ¿En qué rango del espectro miden?
- Sitúa en la tabla periódica los elementos que se utilizan en las cámaras IR y busca cuáles son las características que definen un semiconductor.

¿Puede el IR ayudar a apagar el fuego?

Que el humo no nos impida ver

Cuando se quema un combustible se genera una nube de gases y partículas a alta temperatura, que emite radiación visible, y que conocemos con el nombre de llama. Sin embargo, una llama no emite solo radiación visible.

El principal producto de este tipo de combustión es el dióxido de carbono. Esta molécula, a alta temperatura, es capaz de emitir radiación IR en un estrecho rango de longitudes de onda en torno a las 4,5 μm . Para estas longitudes de onda, la atmósfera es prácticamente transparente. Por esta razón, la presencia de las llamas de un incendio se detecta muy bien utilizando una cámara IR. Una aplicación directa sería, entonces, utilizar cámaras IR en la detección de incendios forestales.

Las llamas que se generan en un incendio forestal también emiten radiación visible. Sin embargo, utilizar esta región del espectro electromagnético para detectarlas es mucho más problemático. ¿Por qué? En un incendio se generan, además de gases calientes, muchas partículas que permanecen en suspensión, el humo. La luz visible emitida por la llama interactúa con este humo modificando su dirección de propagación (un fenómeno conocido como *difusión* o *scattering* en su terminología anglosajona). Esto impide que se pueda ver la luz visible emitida por la llama, viendo en cambio el efecto de la difusión de la luz solar debido al humo, y también hace imposible la localización del frente de llamas, o la altura de las mismas.

Sin embargo, el fenómeno de la difusión depende, entre otros parámetros, de la longitud de onda de la radiación que interactúa con las partículas. La radiación IR emitida por el CO_2 caliente se difunde muy débilmente por el humo. Es por ello que si detectamos la emisión IR del CO_2 podremos “ver” a través del humo, y localizar perfectamente dónde está el frente del incendio.

Observa las fotografías de la izquierda: la primera corresponde a luz visible y la segunda es una foto de la emisión infrarroja del incendio. En ella se pueden apreciar los focos del incendio que permanecían ocultos por el humo.

Observa las fotografías de la izquierda: la primera corresponde a luz visible y la segunda es una foto de la emisión infrarroja del incendio. En ella se pueden apreciar los focos del incendio que permanecían ocultos por el humo.

- Discute otras posibles aplicaciones de detección IR utilizando cámaras.
- Busca el título de, al menos, tres películas en las que se utilice detección infrarroja.



- La serpiente de cascabel puede “ver” los infrarrojos sin necesidad de dispositivos electrónicos. Busca información sobre cómo lo logra y explica por qué le es útil.

Rayos y más rayos

La luz se propaga en línea recta, pero cuando pasa de un medio a otro aparece la refracción, y empiezan los cambios de dirección. Más curioso todavía es el caso de los espejismos, en los que el cambio es gradual y los rayos se curvan.



Un agujero, una lupa

Una lupa es un instrumento para ver más grandes objetos muy pequeños. ¿Y si no tenemos una lupa a mano? En realidad lo más fácil sería acercarnos al objeto, así lo veríamos más grande sin necesidad de ningún instrumento. Pero llega un momento en que no podemos acercarnos más, a unos 25 cm (depende de la persona y de su edad) el ojo empieza a ver borroso. El problema es que a partir de ese punto el ojo no puede enfocar la imagen.



¡Pues si las lentes del ojo (la córnea y el cristalino) no nos permiten acercarnos tanto, lo que hay que hacer es... no usarlas! Pon un trozo de papel de aluminio sobre una base de madera o un cuaderno y pínchalo con un alfiler pero sin atravesarlo del todo. Así conseguirás un agujero muy pequeño (un *pinhole*). Pon ahora el papel de aluminio muy cerca del ojo y del objeto a observar y mira a través del orificio un papel que tenga, por ejemplo, la letra muy pequeña. Eso sí, necesitarás mucha luz.

- a) Con el orificio del papel de aluminio delante del ojo, ¿puedes ver las letras nítidamente cuando las tienes a unos 5 cm? Si a esa distancia te quitas el invento, ¿qué tal ves las letras?
- b) Prueba a acercar y alejar el papel con el orificio delante del ojo. ¿Ves más o menos siempre igual?

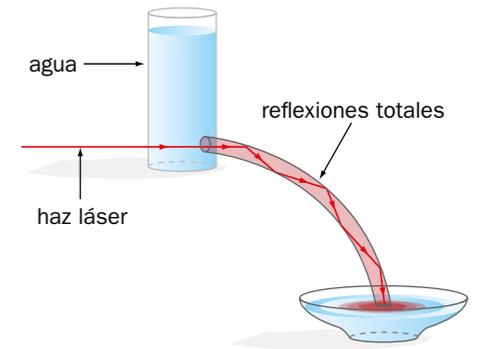
Lo que has hecho es una cámara de orificio (una cámara estenopeica). Al mirar a través de un orificio muy pequeño es como si solo usaras el centro del ojo, y eso es más o menos como no usar sus lentes, por lo que no necesitas enfocar. Consigues una nitidez similar a casi cualquier distancia. ¿El precio que pagas?: necesitas mucha más luz. Cuando miras a través del agujero, el orificio de entrada al ojo pasa de tener un diámetro de varios milímetros (pupila normal) a tener uno de solo unas décimas o centésimas de milímetro. Así que lo que ganas por un lado lo pierdes por otro. Tampoco consigues muchos aumentos, pero a veces este truco te puede resultar útil.

Aprende a construir un microscopio casero en www.e-sm.net/fecytluz06

Y ahora, un reto: ¿podremos doblar la luz?

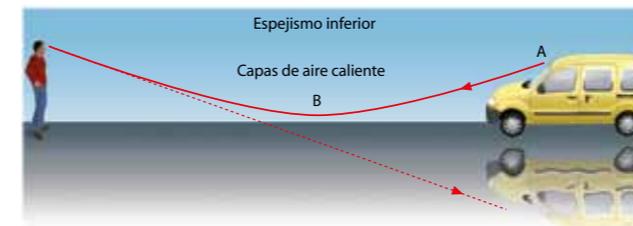
Fibra óptica de agua

Al pasar de un medio de índice de refracción alto a uno más bajo, la luz tiende a doblarse hacia la superficie de separación, y llega un momento en el que no hay haz transmitido. Se ha producido lo que se denomina "reflexión total" (imagen inferior). Esto pasa, por ejemplo, en el sistema agua-aire a partir de los 49°. La reflexión total se utiliza para hacer las fibras ópticas que se emplean en las telecomunicaciones modernas: la luz queda atrapada en ellas y no puede escaparse por las paredes. Aunque las fibras ópticas suelen ser de vidrio o plástico, nosotros vamos a hacer una con agua.



- a) Haz un orificio circular de 4 o 5 mm en el lateral de una botella de plástico transparente y llénala de agua mientras tapes el orificio con un dedo.
- b) Quita el dedo e ilumina desde detrás el chorro de agua que se produce utilizando un puntero láser. ¿Hacia dónde va la luz del láser? ¿Sigue saliendo hacia delante sin cambiar de altura o acaba en el recipiente donde se recoge el agua?

El experimento que te proponemos se conoce como "experimento de Tyndall-Colladon". Un sistema similar se usa en los espectáculos de fuentes con luces.



¡Un dulce espejismo!

La luz que llega a nuestros ojos viene de delante de nosotros. ¡Pero eso no quiere decir que lo que vemos realmente esté siempre delante! Esto pasa en los espejismos del desierto o del asfalto en verano: en el dibujo, la luz que viene del automóvil se dobla gradualmente en el aire caliente y la vemos reflejada cerca del suelo. Es como si hubiera un continuo de reflexiones totales.

Podemos lograr algo similar, "doblar" un rayo de luz, simplemente con agua y azúcar. En un recipiente transparente vierte 200 mL de agua. Por otro lado, mezcla 200 g de azúcar en otros 200 mL de agua y con ayuda de un embudo introdúcelo con cuidado en la parte baja del recipiente que contenía el agua pura. De ese modo conseguimos que el agua con azúcar, que tiene mayor densidad que el agua pura, tienda a quedarse en el fondo del recipiente. Ahora ilumina lateralmente el conjunto con la luz de un puntero láser y verás que en la zona de cambio agua pura-agua con azúcar, ¡el haz se curva!

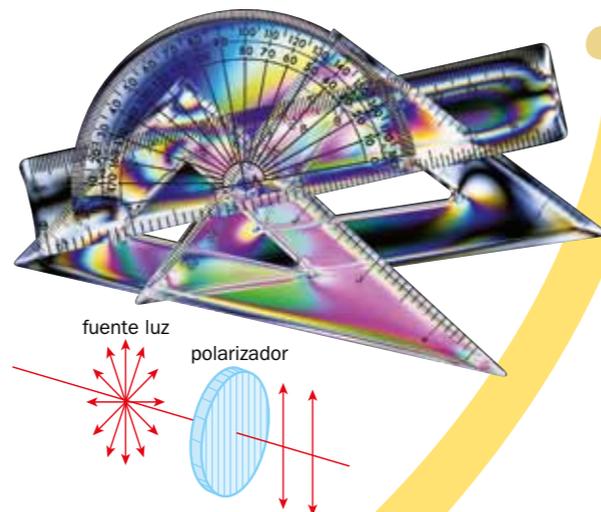
IMPORTANTE: sé muy cuidadoso al usar un puntero láser.

NO ES UN JUGUETE: su luz, tanto la directa como la reflejada, es muy peligrosa para los ojos.

- a) ¿Este espejismo es cómo el del desierto?
- b) Busca en internet espejismos en las zonas polares y explícalos con la ayuda de este modelo.

Luz polarizada por todas partes

Una propiedad poco conocida de la luz es su polarización. Aparece porque las perturbaciones eléctrica y magnética que forman la luz vibran en direcciones perpendiculares a la de propagación. Fíjate en la figura, al atravesar la luz un polarizador lineal, este solo deja pasar las vibraciones paralelas a su eje de transmisión, mientras que absorbe las perpendiculares al mismo. ¿A que parece misterioso?, ¿verdad? ¡Estamos rodeados por luz polarizada!



Hazte un polariscopio

Parece sencillo: dos polarizadores, una fuente de luz y objetos transparentes, sólidos o líquidos, para colocarlos entre los polarizadores.

Pero ¿dónde hay polarizadores? Se pueden comprar, pero es más fácil adquirir unas gafas polarizadas baratas en una óptica o tienda de deportes. Si partimos las gafas por la mitad, tendremos dos polarizadores, y con una fuente de luz tendremos un polariscopio. Pero ¡alto! ¡No rompas aún las gafas! Puedes usar como fuente de luz una pantalla LCD de televisión o de ordenador, porque, además de dar luz, ya incluye un polarizador.



Pon una imagen blanca en la pantalla, ponte las gafas y gira la cabeza (o la pantalla) hasta que la imagen se oscurezca.

- Mete un transportador transparente entre la pantalla y tus gafas. ¿Qué ves?
- Pega unos trozos de cinta adhesiva transparente sobre una lámina también transparente, de modo que en algunos sitios se superpongan dos, tres, cuatro o más trozos. ¿Los colores que observas dependen del número de capas superpuestas? ¿Dependen del ángulo entre las capas?
- Prueba a meter todo tipo de objetos transparentes entre los dos polarizadores y prueba con varios ángulos entre las gafas y la pantalla. Tenedores o perchas de plástico, tapas de CD o DVD, placas de mica, etc.
- ¿Por qué venden gafas polarizadas en las tiendas de pesca?

Los colores que aparecen en estas experiencias se deben a que muchos materiales transparentes tienen una estructura direccional que hace que interactúen con la luz polarizada. Por ejemplo, una escuadra de plástico, se forma inyectando en un molde plástico caliente, y al enfriarse las largas cadenas de átomos del plástico se orientan. Con el polariscopio puedes ver el punto de inyección del plástico o las diferentes corrientes de plástico fundido. La cinta adhesiva se forma por estiramiento, y todas sus moléculas tienen la misma orientación.

Hay pantallas que no dan oscuridad completa. Prueba con todas las pantallas que tengas a tu alcance: portátil, móvil, tableta, etc. En todos los casos verás efectos interesantes al poner objetos transparentes entre ellas y las gafas polarizadas.

¿Y aquí no hay matemáticas?

Ley de Malus

Los polarizadores lineales de las gafas polarizadas tienen un eje de absorción, de modo que si superpones dos con sus ejes paralelos dejan pasar casi toda la luz, mientras que si los pones perpendiculares se obtiene una oscuridad casi total. ¿Qué ocurre en ángulos intermedios? A eso responde la Ley de Malus que nos da la potencia de luz transmitida en función del ángulo θ entre los ejes de los polarizadores.

$$P(\theta) = P_0 \cos^2 \theta$$

- ¿Qué porcentaje de luz se transmite cuando los polarizadores están a 90° ? ¿Y si están a 45° ?
- Supongamos ahora que entremedias de dos polarizadores colocados a 90° (oscuridad) introducimos otro polarizador a 45° . ¿Se observará luz a la salida del sistema?



El cielo es azul, ¿pero es que además está polarizado?



Para obtener luz polarizada necesitamos algún tipo de asimetría. La luz se puede polarizar al reflejarse en una superficie como la del agua, o al atravesar un polarizador como ocurre en los cristales de las gafas polarizadas (ahí la asimetría está en la absorción del material de los cristales). El esparcimiento de la luz que produce el color azul del cielo, ¿podría también polarizar la luz?

- Cuando el cielo esté despejado, ponte de lado al sol (apunta al sol con una de tus orejas) y con tus gafas polarizadas mira a una zona de cielo azul que tengas enfrente. Prueba a inclinar la cabeza a un lado y a otro. ¿Qué observas? ¿Cambia el efecto si miras a una zona más cercana al sol?
- Ese mismo efecto se puede conseguir con un recipiente de agua. Añade un poco de leche al agua e ilumínalo por un lado. Comprobarás que la luz que sale por los laterales del vaso está bastante polarizada (la cantidad de luz que observas cambia mucho si la miras con tus gafas polarizadas y ladeas tu cabeza a derecha e izquierda).

En este caso la asimetría aparece porque en el punto donde se produce el esparcimiento la luz incide por un lado, mientras que observamos en otra dirección. El efecto es máximo cuando hay 90° entre la dirección de iluminación y la de observación. Por ejemplo, este efecto lo usan las abejas para orientarse con el sol.

¿Podrás andar ahora por la calle sin buscar los efectos de polarización en todo lo que te rodea?

- Busca charcos por medio de la polarización, compara el color de las ventanas y del parabrisas de los coches, los reflejos en los escaparates...

Ni se te ocurra **MIRAR DIRECTAMENTE** al sol, ni con gafas ni sin ellas.



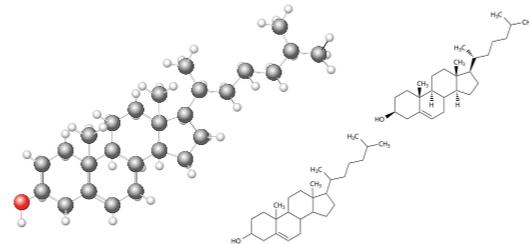
Interferencia y difracción

Los fenómenos de interferencia y difracción son consecuencia de la naturaleza ondulatoria de la luz y de la radiación electromagnética en general. ¿Sabes que con métodos que usan la interferencia de ondas electromagnéticas podemos estudiar multitud de fenómenos y propiedades químicas, biológicas,...



Desnudando átomos, moléculas y demás

Si hacemos incidir luz sobre un medio en el que haya alguna regularidad periódica cuyas dimensiones características sean similares a la longitud de onda de la luz visible (380-750 nm), se produce un fenómeno de dispersión que separa los distintos colores de la luz y produce una especie de bonito arcoíris. ¡Seguro que lo has visto en los discos DVD o en el cielo los días de lluvia! Por increíble que pueda parecer, utilizando una idea similar, los científicos han podido desvelar la estructura de las moléculas de miles y miles de compuestos, que no podemos ver.

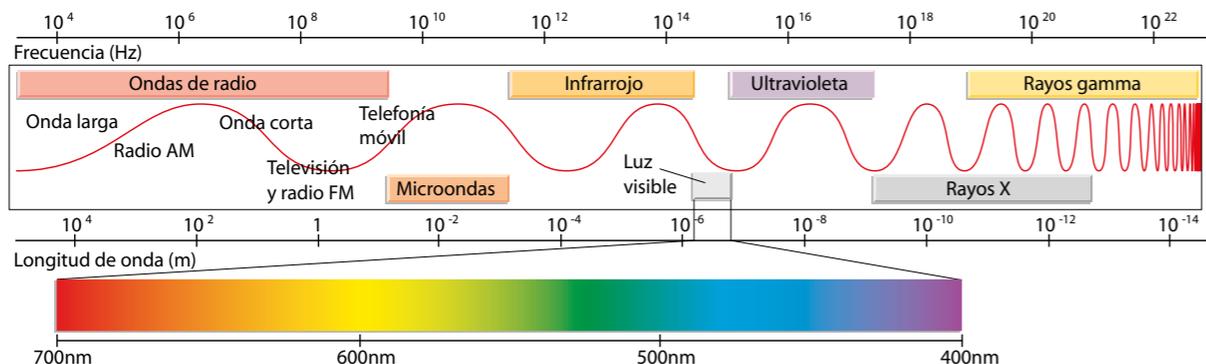


Estructura del colesterol.

Muchos de ellos juegan un papel esencial en los procesos biológicos, como la molécula de colesterol que puedes ver en la figura. Dado que las dimensiones típicas de las moléculas son mucho menores que las longitudes de onda de la luz visible, es necesario usar rayos X, que tienen una longitud de onda parecida al tamaño de las moléculas.

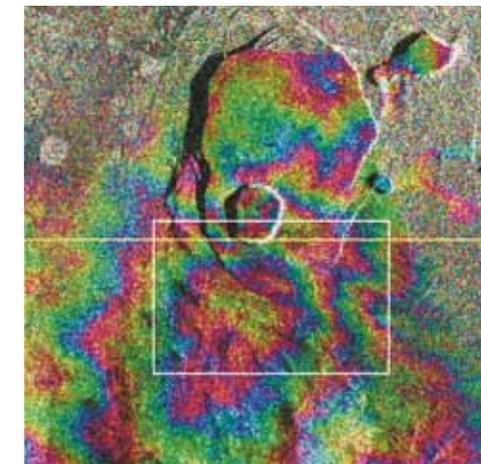
En la tabla de la izquierda tienes el tamaño típico de algunas estructuras importantes. Completa la tabla señalando el tipo de radiación electromagnética que corresponde a esos tamaños y su frecuencia.

Sistema	Tamaño	Radiación electromagnética	
		Tipo	Frecuencia (Hz)
Átomo de H	0,1 nm	●	●
Colesterol	2 nm	●	●
Virus VIH	0,1 μm	●	●
Glóbulo rojo	8 μm	●	●
Axón neuronal	3 mm	●	●



Viendo crecer los volcanes

Entre los modernos instrumentos usados para estudiar la Tierra destaca el SAR (acrónimo en inglés de *Radar de Apertura Sintética*). Los satélites que portan estos aparatos obtienen mapas topográficos de enorme resolución (¡centímetros!). Con técnicas basadas en la interferencia de ondas de radio es posible detectar cómo cambia el nivel del suelo en las zonas donde la corteza se deforma por acumulación de magma interno (en los volcanes) o por tensiones de origen tectónico. En la imagen (NASA/JPL) puedes ver un *interferograma* del volcán Kilauea en Hawai obtenido con ondas de radar de 3 cm de longitud. Los colores utilizados muestran cambios en la topografía del volcán.



Analiza cualitativamente la imagen que ves en la figura y contesta:

- ¿De qué orden de magnitud es la deformación total que aparece representada en la imagen? (La diferencia de alturas entre curvas de nivel del mismo color es de 3 cm, la longitud de onda del radar).
- ¿Qué partes del terreno se han deformado más y cuáles menos, o incluso no se han deformado en absoluto?
- ¿Qué conclusiones obtienes de los apartados anteriores?

Telescopios y difracción. ¡Qué fastidio!

Los fenómenos de difracción también pueden ser un fastidio. ¿Sabes lo que es la resolución angular de un instrumento óptico? Cuando vemos un objeto, las líneas rectas que unen sus extremos con nuestro ojo forman un cierto ángulo. Este es tanto menor cuanto más alejado está. Cuando el ángulo es demasiado pequeño, los instrumentos ópticos (¡incluido el ojo humano!) solo ven manchas de luz y se pierden los detalles, ¡todo por culpa de la difracción! Esto les pasa también a los telescopios. Su resolución angular (que determina el detalle que podemos ver con ellos) viene dada por la fórmula

$$\theta = \frac{C \cdot d}{\lambda}$$

donde C es una constante; d , el diámetro del telescopio, y λ , la longitud de onda de la luz.



Busca el radio de la órbita de Plutón y contesta a la siguiente pregunta. Si la resolución angular del Telescopio Espacial Hubble (HST) es de unos 0,05 segundos de arco y el diámetro de su espejo son 2,4 m, ¿qué diámetro debería tener un telescopio espacial para poder ver el mismo detalle que se aprecia en la foto de Plutón? Esta imagen, obtenida por la sonda New Horizons desde una distancia de 450000 km, muestra detalles de hasta 2,2 km.

Plutón. Foto: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory /Southwest Research Institute

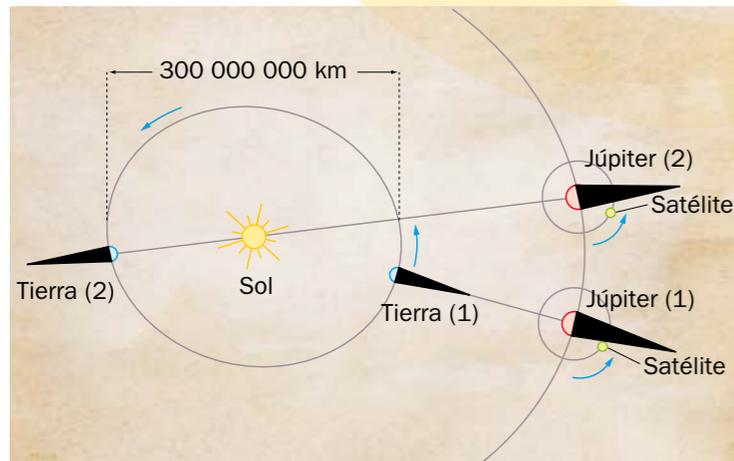
No te pierdas un buen video sobre interferencia en: www.e-sm.net/fecyluz11

De la luz a la relatividad

La de la relatividad es una teoría famosa. Seguro que has oído hablar de ella y piensas que es imposible entender nada de nada. ¡Pues te equivocas! ¿Sabías que para formularla, Einstein se tuvo que fijar en el comportamiento de la luz? Seguro que sabes que la luz va muy rápido, pero ¿tienes una idea de cuál es su velocidad? ¿Sabes cómo se midió por primera vez?



No hay quien pille a la luz



El primer científico en demostrar que la luz se propaga con una velocidad finita pero enorme fue el astrónomo danés Ole Rømer, quien, observando el retraso de las ocultaciones de los satélites de Júpiter por el planeta, llegó a la conclusión de que la luz necesitaba unos 22 minutos para cruzar la órbita de la Tierra alrededor del Sol. Con este dato y el radio de la órbita terrestre (que es aproximadamente de unos 150 millones de kilómetros), el astrónomo holandés Christian Huygens determinó que la velocidad de la luz era aproximadamente de 220 000 km/s, muchísimo mayor que ninguna velocidad medida hasta entonces. Hoy sabemos que su valor exacto es de 299 792,458 km/s.

Busca en una enciclopedia los siguientes datos: los radios de las órbitas de Júpiter y de la Tierra (R_J y R_T), sus períodos orbitales (el de la Tierra es un año, ¡no te despistes!) y el período de la órbita del satélite Ío alrededor de Júpiter. Con ellos y tomando para la velocidad de la luz $c = 300\,000$ km/s, contesta las siguientes preguntas:

- Calcula aproximadamente el tiempo que tarda en llegar a la Tierra la luz que se emite desde Ío justo antes de que se produzca su ocultación por Júpiter cuando los planetas se encuentran en la configuración (1) y en la (2).
- ¿Cuánto tiempo tarda la luz en atravesar la órbita de la Tierra?
- Divide el tiempo calculado en b) entre el número de ocultaciones de Ío que se producen en medio año para calcular el retraso promedio entre la observación de dos ocultaciones sucesivas. Esto te da una idea de los retrasos que tuvo que medir Rømer en sus observaciones, ¡algo no demasiado fácil con los medios de la época!
- Sabiendo que la velocidad de la luz en el aire es aproximadamente igual que en el vacío y que la del sonido es de unos 340 m/s, ¿cuántas veces es más rápida la luz que el sonido en el aire?

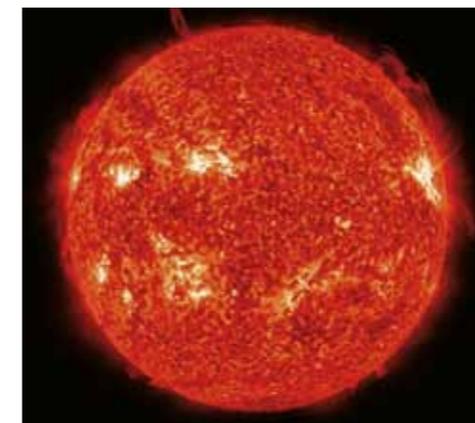
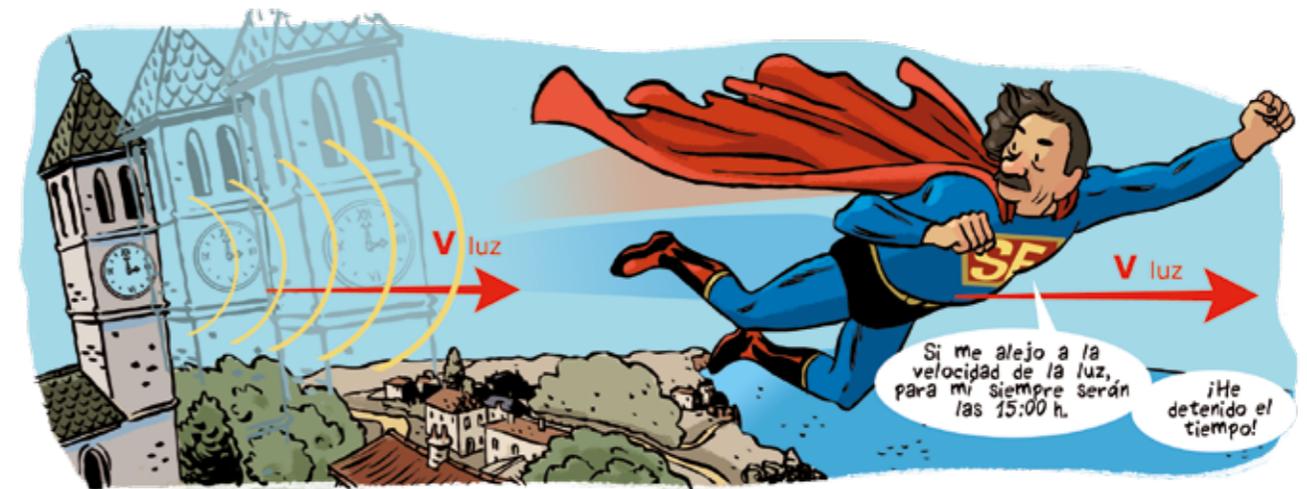
Si quieres medir la velocidad de la luz en casa, mira el divertido enlace: www.e-sm.net/fecytuluz12

Éter o no éter..., ¡he ahí el problema!

A finales del siglo XIX, los físicos tenían problemas para interpretar algunas características de la luz. Una de las teorías que intentaba resolverlos postulaba la existencia de un medio, el éter lumínico, en el que se propagaban las ondas luminosas. Pero si este "éter" existía, era una sustancia rara, rara..., con propiedades muy extrañas como ser muy rígido o muy poco denso o ambas cosas a la vez... y sin embargo las estrellas y los planetas se mueven a través de él como si nada. Para detectar el elusivo "éter" se diseñaron varios experimentos. El definitivo fue el de Michelson y Morley (Estados Unidos, 1887), que trató de detectar el movimiento de la Tierra respecto al éter con un interferómetro. El resultado del experimento, uno de los más importantes de la historia de la física, fue que ¡no detectaron nada!

La teoría de la relatividad especial de Einstein (1905) resolvió todas las paradojas asociadas con la propagación de la luz y borró el "éter" de la física. Algunas de sus consecuencias más relevantes son las siguientes:

- La velocidad de la luz en el vacío ($c = 3 \cdot 10^8$ ms⁻¹) es la máxima velocidad con la que se puede transmitir información.
- Todos los observadores inerciales (no acelerados) miden la misma velocidad para la luz.
- El tiempo no transcurre de la misma forma para objetos que se encuentran en movimiento relativo.
- La longitud que medimos de un objeto que se mueve a velocidad elevada es menor que su longitud en reposo.
- La masa y la energía son equivalentes. Esta equivalencia se expresa en la famosa fórmula de Einstein, $E = mc^2$.



La transformación de la masa en energía explica por qué brillan las estrellas y la existencia de procesos violentos como las explosiones de las supernovas. Para que veas lo que implica la fórmula de Einstein, vamos a hacer algunas cuentas.

- Supón que la gasolina que utiliza un coche es octano puro, cuya entalpía molar de combustión es de -250 kJ/mol y cuya densidad es de 703 kg/m³ a 20 °C. Si un automóvil consume cinco litros de gasolina cada cien kilómetros. ¿Cuántos kilómetros recorrería si toda la masa de esos cinco litros se convirtiera en energía?
- El Sol pierde masa a razón de unas cuarenta mil toneladas por segundo. ¿Cuál es entonces la energía emitida por el Sol en un segundo? Compárala con el consumo mundial de energía, que en 2014 se estimó en $5,6$ GJ.

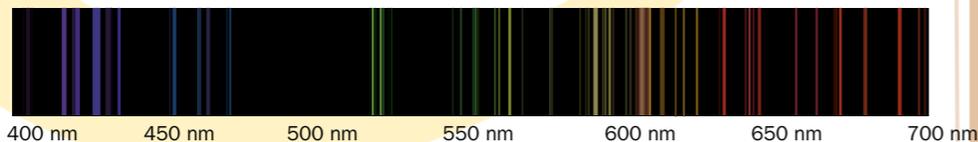
Luz y color

El color, una de las propiedades de la luz, está asociado a su naturaleza ondulatoria. Está determinado por la longitud de onda. Nosotros vemos los colores visibles, pero la luz tiene «colores» invisibles para nuestros ojos que cubren todo el espectro electromagnético.



Espectros: el código de barras de las sustancias

Las sustancias puras, por ejemplo, los elementos químicos, emiten radiación cuando se encuentran en forma de vapor y sus átomos pueden moverse con libertad. Esta radiación está formada por multitud de colores individuales que podemos registrar en lo que conocemos como espectros, como el del argón en la región visible que ves a continuación. Cada sustancia tiene un espectro característico y particular que la distingue de todas las demás. Es la “huella dactilar” de la sustancia.



El átomo de hidrógeno es tan simple que fue posible encontrar una fórmula que nos da la forma de su espectro:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2} \right)$$

λ denota la longitud de onda de una línea, n_1 y n_2 son números naturales distintos, y R es la constante de Rydberg, cuyo valor es $1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$. La radiación de las diferentes líneas se emite cuando un electrón sufre una transición entre dos niveles de energía diferentes correspondientes a los valores de n_1 y n_2 .

a) Utilizando la expresión anterior, rellena la siguiente tabla con las longitudes de onda correspondientes a las primeras transiciones de la llamada “serie de Balmer”. En todos los casos el nivel de llegada corresponde a $n_1 = 2$.

n_2	3	4	5	6	7
λ (nm)	•	•	•	•	•

b) Con los datos de la tabla, dibuja “el espectro del hidrógeno” utilizando los colores apropiados.

¿Pueden “deseñir” los colores de la luz?



¿Se puede multar a una galaxia por exceso de velocidad?

El efecto Doppler aparece siempre que la fuente que produce las ondas luminosas, sonoras o de otro tipo, se mueve respecto al que percibe dichas ondas. ¿Te has fijado en cómo cambia el sonido de un tren cuando este se acerca o se aleja? Pues el efecto Doppler es el causante de dicho fenómeno. En su formulación más sencilla, la relación entre la longitud de onda emitida por una fuente que se mueve a velocidad v_f y la percibida por un receptor en reposo viene dada por la expresión

$$\frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{u}{u \pm v_f}$$

donde u es la velocidad de propagación de la onda, y se toma el signo “+” si la fuente se acerca al receptor y el “-” si la fuente se aleja del receptor.

a) Un violinista está tocando la nota “La”, cuya frecuencia es $f = 440 \text{ Hz}$. Si estás sentado en el banco de una estación de metro, di qué frecuencia percibirías si el violinista:

- Está parado junto a ti.
- Está en un tren que se acerca a 20 km/h .
- Está en un tren que se aleja a 20 km/h .

Recuerda que la velocidad del sonido en el aire es $u = 340 \text{ m/s}$ y que $\lambda f = u$.



La expansión del universo hace que las galaxias lejanas se alejen de nosotros. Debido al efecto Doppler, los espectros de los átomos que las componen que obtenemos con nuestros telescopios son distintos de los que medimos en los laboratorios. A partir de estas diferencias en las longitudes de onda de la luz que recibimos, podemos determinar la velocidad a la que se alejan y la distancia a la que se encuentran. Por ejemplo, las galaxias más rojizas de la imagen están a 300 millones de años luz y se alejan a 6700 km/s .

b) El grupo de galaxias de la imagen (NASA/HST) es el famoso quinteto de Stephan. ¿Sabes qué significa que una de las galaxias tenga un color más azulado?

Los radares que controlan la velocidad en las carreteras se basan en el mismo efecto, aunque utilizan ondas de radio en lugar de luz visible.

La variación de la frecuencia de las ondas emitidas por un radar al rebotar en un coche es $\Delta f = 2f_r v/c$, donde f_r es la frecuencia del radar; v , la velocidad del vehículo que queremos medir, y c , la velocidad de la luz.

c) Si $f_r = 3 \cdot 10^{10} \text{ Hz}$ y el cambio de frecuencia de las ondas recibidas por el radar de tráfico es $\Delta f = 5000 \text{ Hz}$, ¿a qué velocidad va el coche detectado por el radar?

Del Sol al LED

El Sol es la fuente natural de luz por excelencia. Durante el día ilumina directamente a la Tierra, durante la noche lo hace indirectamente, con la ayuda de la Luna, que refleja su luz.

1 Los restos de incendios producidos por los rayos y por los volcanes fueron nuestros primeros aliados hace más de un millón y medio de años en su lucha contra la oscuridad de la noche. A lo largo de milenios aprendieron a conservar el fuego, alimentarlo y aun a crearlo.

2 Remotos antepasados iluminaron sus desplazamientos nocturnos con palos de madera sacados del fuego. Posteriormente los revistieron con pieles untadas en resinas de los árboles. Los **hachones** de trapos embreados iluminaron las calles y a los viajeros por los caminos hasta el siglo XIX.



4



En el 3000 a. C., los egipcios revistieron de cera de abeja palos de madera. Posteriormente se sustituyó el palo por una mecha central de algodón u otra fibra vegetal, naciendo la **vela**. Los romanos utilizaron velas de sebo y desde la Edad Media se volvió a emplear la cera de abeja. En el siglo XVIII se difundieron las velas hechas con aceite de ballena y desde el siglo XIX con ácido esteárico y fundamentalmente con parafina.

6



Mediado el siglo XIX aparecen las lámparas de **arco eléctrico**. Dos electrodos de carbono se conectaban a una batería, la diferencia de potencial ionizaba el aire produciéndose un arco "eléctrico" muy luminoso. Se utilizaron preferentemente en faros costeros.



9

En los años sesenta del siglo XX aparecieron los primeros dispositivos **láser**. Se basan en el efecto de la emisión inducida o estimulada para generar un haz de luz coherente. Esto supone que la luz emitida se mantiene en un haz muy fino sin dispersarse.



MEDIANTE COMBUSTIONES



3 Hacia el 15000 a. C., el ser humano utilizó la combustión de fibras vegetales untadas en tuétanos, grasas y sebos contenidas en piedras ahuecadas y posteriormente en **lucernas**, cuencos de arcilla o hierro; más tarde y hasta el siglo XX, en candiles de latón y hojalata. En 1900 aparecieron los candiles de acetileno, conocidos como lámparas de carburo.



5 La combustión de gases, primero los obtenidos de la destilación de la hulla y después del petróleo, fue empleada para iluminar las ciudades en el siglo XIX, sustituyendo a los hachones. En los hogares se utilizó para alimentar **lámparas de Argand** modificadas para quemar queroseno, más conocidas como **quinqués**.

MEDIANTE ELECTRICIDAD



7 A partir de 1880 se difundieron las **lámparas eléctricas de incandescencia**. El paso de una corriente eléctrica por un filamento conductor lo calienta hasta la incandescencia, emitiendo entonces una luz brillante. Inicialmente el filamento era de carbono, hoy es de wolframio.

8 Las **lámparas de descarga** son lámparas eléctricas basadas en el fenómeno de la luminiscencia: luz emitida por excitación de un gas sometido a descargas eléctricas entre dos electrodos. No hay casi pérdidas por calor, por lo que se dice que son lámparas frías.

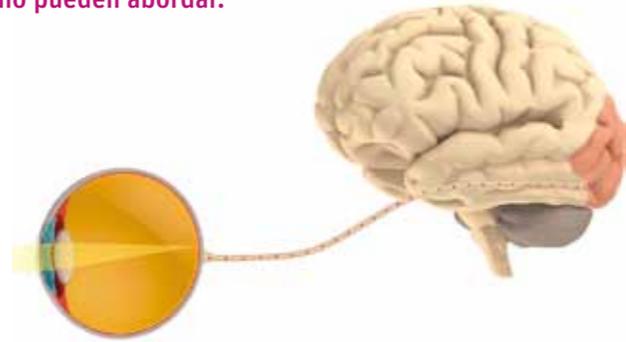


10 **LED, diodo emisor de luz**. Inicios del siglo XXI. Su funcionamiento está basado en la electroluminiscencia. Produce una luz casi veinte veces superior a la de las bombillas de incandescencia y prácticamente no tiene pérdida calorífica.

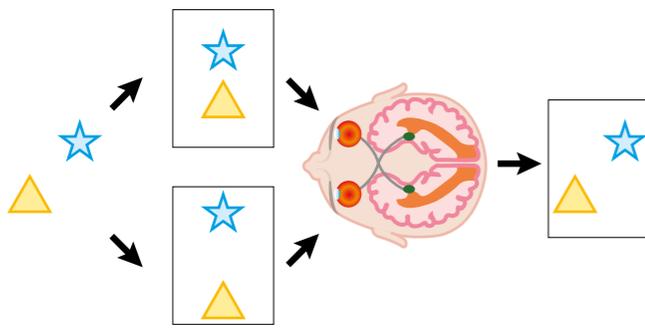


Vista y cerebro

Sin duda, los ojos son imprescindibles para la visión, pero sin el cerebro no podríamos interpretar la información que captan de nuestro entorno. El problema de convertir los estímulos luminosos en ideas es una tarea de enorme complejidad que nuestro cerebro es capaz de resolver, pero que los ordenadores más potentes todavía no pueden abordar.



El córtex visual



La percepción visual empieza cuando la luz llega a la retina y estimula los fotorreceptores (células sensibles a la luz).

El procesamiento de la información visual comienza ya en el ojo. En capas de células situadas detrás de la retina se detectan **contrastes en la imagen**, que indican la **presencia de sombras y aristas**, e información sobre el **color**.

El nervio óptico lleva toda esta información a la corteza cerebral, donde comienza el análisis de la información que conocemos como percepción. La primera etapa se realiza en el **córtex visual primario (V1)**, cuyas

células están organizadas para permitir al sistema visual situar los objetos en el espacio. Existe una correspondencia uno a uno entre las células de la retina y una parte de las células del V1, de forma que áreas cercanas en la retina se corresponden con áreas cercanas del córtex visual primario. Esto le permite situar los objetos usando las dos dimensiones del «mundo visual» y añadir la tercera comparando las señales recibidas por ambos ojos. Otros conjuntos de células se encargan de identificar orientaciones reaccionando fuertemente a la presencia de líneas con una orientación dada, en particular las de las aristas de los objetos que definen su forma.

En un segundo nivel en el procesamiento de la información visual se encuentra el **área visual (V2)**, que se encarga de interpretar los colores. En sucesivas **áreas visuales (V1-V8)**, el cerebro empieza a incorporar al procesamiento las expectativas basadas en la experiencia y a interpretar el movimiento. Aunque este procedimiento produce a veces fallos en la percepción (ilusiones ópticas), acelera notablemente la respuesta del cerebro a los estímulos visuales.

Hay personas que carecen de la habilidad para percibir la profundidad, aunque por lo demás vean bien. Puedes probar lo que sienten si te tapas un ojo durante un rato e intentas hacer vida normal

- a) Prueba a llenar un vaso con agua de una botella y un ojo cerrado. ¿A que no es tan fácil?
- b) Intenta jugar a tu deporte favorito con un ojo tapado. ¿Qué tal se te da?
- c) Intenta imaginar cómo ve el mundo un cachalote, que tiene un ojo a cada lado de la cabeza.

Más sobre color y cerebro en www.e-sm.net/fecytluz18

El problema de Molyneux

Si un hombre que naciera ciego volviera a ver de repente, ¿sería capaz de reconocer a través de la vista las cosas que había aprendido a distinguir por el tacto? (Por ejemplo, una esfera y un cubo de metal).

El filósofo y político irlandés William Molyneux (cuya mujer se volvió ciega) le hizo esta pregunta a su amigo John Locke, también filósofo. Locke defendía que carecemos de ideas innatas y que todo lo que sabemos llega a nosotros a través de los sentidos, así que opinaba que en un primer momento no, el ciego no podría distinguir los objetos.

En el siglo XX fue posible realizar el experimento observando a personas que habiendo nacido con cataratas que les impedían ver, fueron operadas de adultos y recuperaron la vista. Aunque al volver a ver podían distinguir la diferencia entre las imágenes de los objetos, no eran capaces de establecer una conexión entre lo que veían y lo que sentían al tocarlos. Parece que la respuesta a la pregunta de Molyneux es **negativa**.

Durante el **crecimiento**, nuestro cerebro **desarrolla las habilidades** necesarias para interpretar los estímulos que proceden de los sentidos e incorporar la información recibida en una imagen unificada de la realidad.

- a) ¿Te has parado a pensar por qué los niños pequeños pueden aprender un idioma y parecer hablantes nativos mientras que para un adulto esto es prácticamente imposible?
- b) ¿Qué te sugiere esto sobre el desarrollo del lenguaje en las personas?

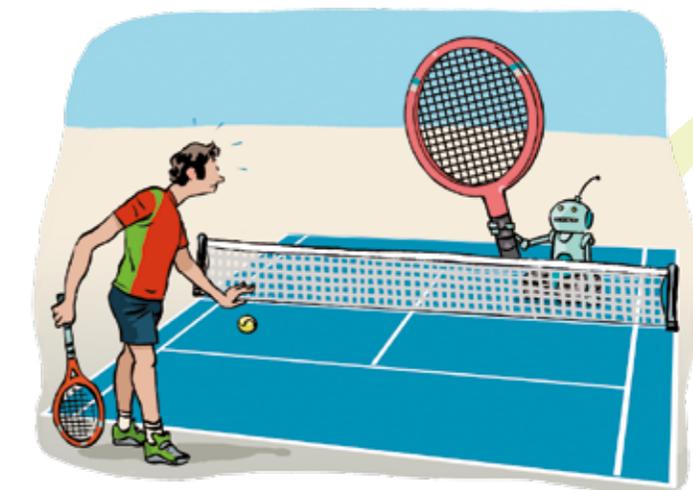


Ordenadores y visión

¿Podría un robot derrotar a Rafa Nadal igual que el programa Deep Blue consiguió derrotar al campeón del mundo de ajedrez Garry Kasparov? Para ello tendría que moverse rápido y reaccionar con precisión. También tendría que **aprender a procesar la información visual** sobre el movimiento de la pelota y el de su rival, algo nada fácil... Para fabricar esos robots hace falta que entendamos cómo procesa el cerebro la información que recibe de los ojos.

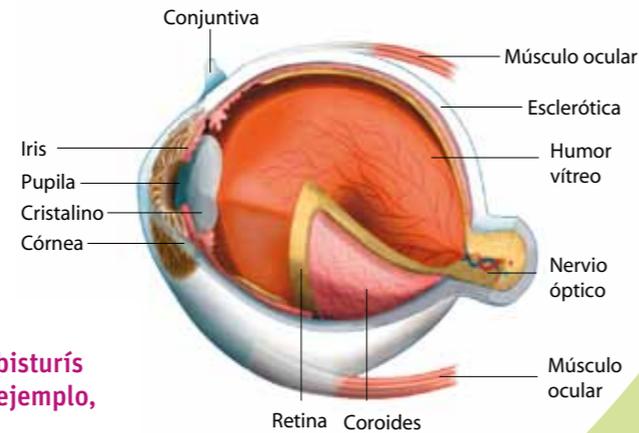
Nuestro cerebro, al interpretar las imágenes, es capaz de distinguir los objetos del fondo e identificarlos a pesar de los cambios de color y orientación. Aunque nos parezca fácil reconocer las letras o las caras, todavía no hemos conseguido que nuestros ordenadores hagan esto bien.

Mira a dos robots jugando en www.e-sm.net/fecytluz19



Láseres y visión

Los láseres permiten depositar altas densidades de energía de manera muy localizada. Por ello se usan en la industria como cuchillos de precisión para cortar materiales, o en medicina como bisturís de alta precisión, por ejemplo, para retallar la córnea.



¿Por qué me pongo gafas?

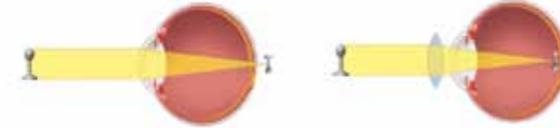
Desde el punto de vista óptico, el ojo es un sistema convergente, en el que la córnea y el cristalino son las lentes que hacen converger los rayos de luz en la retina. La córnea se comporta como una lente de menisco y el cristalino como una biconvexa.

Al mirar objetos lejanos, el músculo ciliar está relajado y el efecto combinado de la retina y el cristalino hace que los rayos entrantes converjan en la retina. Al acercarse el objeto, el cristalino, presionado por el músculo ciliar, disminuye su distancia focal para que la imagen se siga formando en la retina. Esto se denomina acomodación, y nos permite ver de manera nítida objetos en un amplio rango de distancias. Para un ojo sano y distancias menores de unos 25 cm, el músculo ciliar es incapaz de aumentar más la presión sobre el cristalino, formándose una imagen borrosa en la retina.

Si la profundidad del globo ocular es mayor o menor que la correspondiente a un ojo sano, se sufre de miopía o de hipermetropía, respectivamente. Estos defectos se subsanan con las lentes que forman las gafas o lentillas y que corrigen la trayectoria de los rayos de entrada para que la imagen se forme en la retina.



La imagen de objetos lejanos se forma delante de la retina, con lo que en esta se forma una imagen borrosa. Se corrige con lentes divergentes.



La imagen de los objetos cercanos se forma detrás de la retina, con lo que en esta se forma una imagen borrosa. Se corrige con lentes convergentes.

Pide las gafas a tus familiares o amigos y proyecta a su través la luz de un foco de escritorio sobre una hoja blanca.

- ¿Puedes identificar y explicar la diferencia que hay entre lo que se ve en el papel al utilizar las gafas de un miope y de un hipermetrope?
- Comprobando al tacto la diferencia de grosor entre los bordes y el centro, también se puede identificar si una gafa es para miopía o hipermetropía. Investiga con las gafas que te hayan dejado y enuncia cuál es la conclusión que obtienes.

Gafas, lentillas, ...
¿No hay otra solución?

Apunta al ojo...

Una idea alternativa al uso de lentes que corrijan este tipo de enfermedades sería poder cambiar la forma de la córnea, modificando su distancia focal de tal manera que el efecto fuera equivalente al que introducen las lentes externas (gafas o lentillas).

El láser ha sido la herramienta que ha permitido tallar de forma segura y precisa la córnea dando lugar a lo que se conoce como cirugía refractiva.

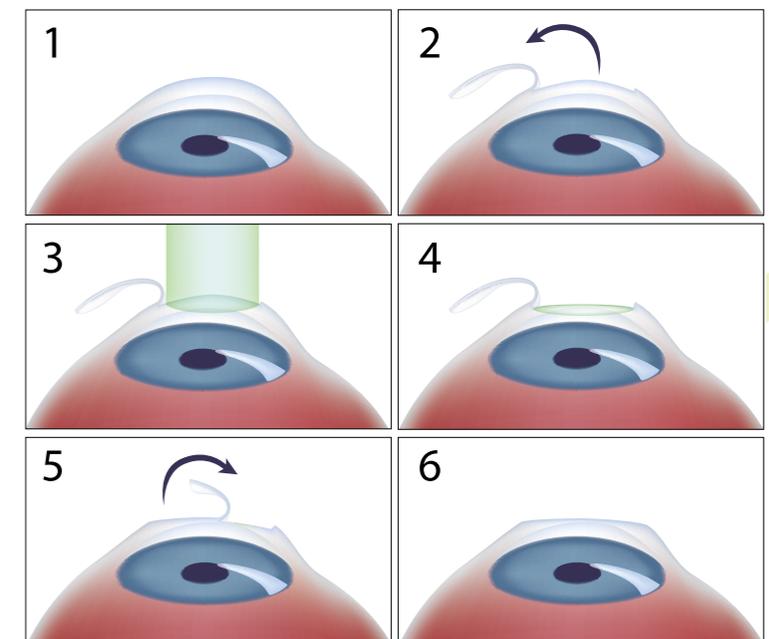
Actualmente, la técnica LASIK (*laser assisted in Situ Keratomileusis*) es la cirugía refractiva más extendida para corregir defectos como la miopía, hipermetropía o astigmatismo. El procedimiento utilizado se puede resumir en los siguientes pasos:

- Con una cuchilla de precisión (microqueratomo) se realiza un pequeño corte en la parte externa de la córnea, levantándose un pequeño pedazo (llamado *flap*) que se retira para dejar la córnea expuesta a la acción del láser.
- El láser incide sobre la córnea, evaporando de forma controlada fracciones micrométricas de tejido corneal de una manera programada y dando una nueva curvatura a la córnea. Este proceso se conoce como fotoablación.
- Por último, el pedazo inicialmente levantado se vuelve a colocar sobre la córnea recién retallada.



En el proceso se utiliza luz ultravioleta, que es absorbida muy bien por los tejidos orgánicos. Al tratarse de fotones de alta energía, este tipo de luz es capaz de disociar las moléculas de los tejidos, en vez de cortarlos o calentarlos. Así se puede producir la fotoablación sin cambiar la transparencia de la córnea.

- Antes de la técnica LASIK se utilizaba en cirugía refractiva la PRK (*photorefractive keratectomy*). Busca información y señala en qué se diferencian ambas técnicas.
- La técnica LASIK utiliza un láser excímero de fluoruro de argón (ArF) que emite a una longitud de onda de 193 nm. ¿Qué es un láser excímero?
- Tras una operación, la miopía en el ojo de un paciente ha pasado de 4 dioptrías a 0,25. Supuesto que con una fotoablación de 10 micras se corrige 1 dioptría de miopía, ¿cuál es el espesor de córnea que ha tenido que eliminarse en la operación?
- Las imágenes de la derecha corresponden a la operación anterior. Míralas y describe razonadamente lo que observas en cada una de las fases que se describen.
- ¿Por qué en la operación citada, la ablación no se realiza en toda la córnea?



Percepción visual

¿Sabes que las imágenes que se forman en el fondo del ojo están invertidas? Pues sí. Afortunadamente, nuestro cerebro se encarga de interpretarlas para que podamos ver en condiciones. De todas formas, a veces también nos engaña y nos hace creer que vemos cosas que no estamos viendo...

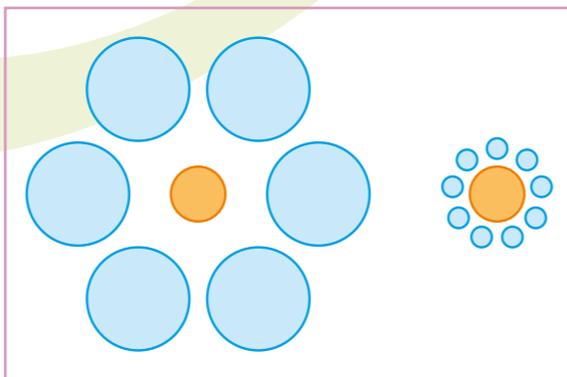


Luna lunera cascabelera

¿Te has dado cuenta de que la luna parece mucho más grande cuando la vemos cerca del horizonte que cuando está en lo alto del cielo? ¿Se te ha ocurrido pensar por qué? La realidad es que se trata de un efecto debido a nuestra forma de percibir los objetos. Si esto te parece extraño, mira entonces la figura de la derecha. ¿Cuál de los dos círculos anaranjados es más grande? ¿Y cuál te parece más oscuro?

Vamos a diseñar experimentos para determinar si la imagen de la luna es más grande cuando está cerca del horizonte.

- a) ¿Te interesa la fotografía? Si dispones de una cámara fotográfica y un trípode, simplemente toma una imagen de la luna llena cuando esté saliendo por el horizonte y, sin cambiar el zoom de la cámara, toma otra imagen unas horas después.



Para que las fotos salgan bien, tendrás que ajustar la exposición. Luego, abre las fotos con tu ordenador y compáralas con tu programa favorito superponiéndolas. ¿Qué observas? ¿Qué forma tiene la imagen que tomaste cerca del horizonte? ¿Cuál es mayor?

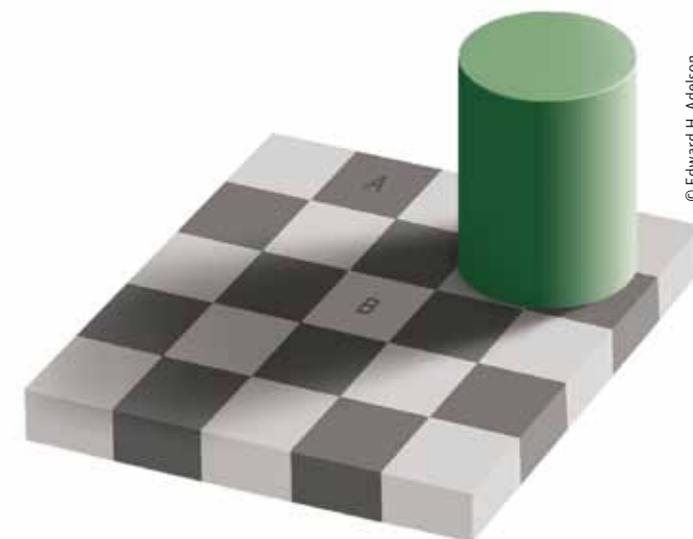
- b) Busca objetos de tamaños variables que puedas poner fácilmente en el extremo de un palo. Intenta determinar cuál de ellos cubre justo la imagen de la luna cuando estiras el brazo con el palo. Repite la experiencia unas horas después cuando la luna esté ya alta. ¿Notas alguna diferencia?
- c) Fíjate en el dibujo del lobito y la luna. Prescindiendo de la reflexión del lobo, ¿crees que es posible algo así?
- d) Busca cómo se mide actualmente la distancia a la Luna. ¿Tiene algo que ver con la luz?
- e) Si quieres un reto, intenta pensar un procedimiento para medir la distancia a la Luna haciendo fotos con una cámara digital. Mira el enlace www.e-sm.net/fecytluz22a

Diviértete con más efectos ópticos en el enlace www.e-sm.net/fecytluz22b

¿Ver para creer?

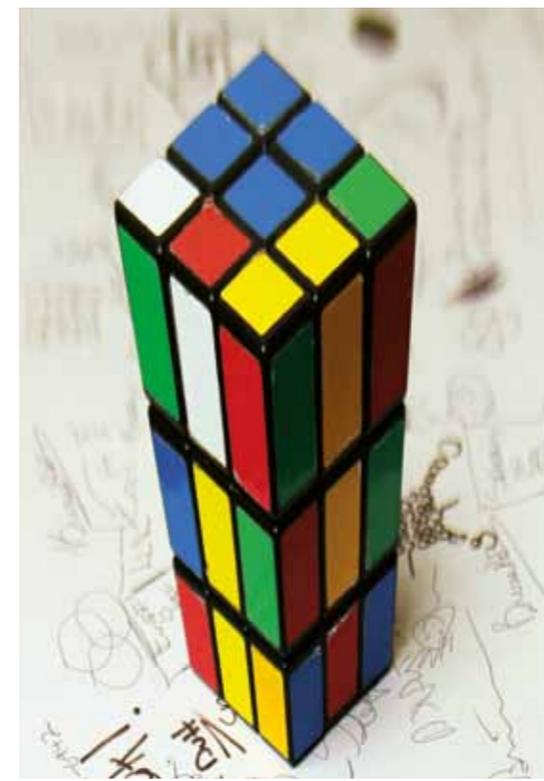
Si quieres divertirte con una estupenda ilusión óptica, sigue leyendo. Quizá la imagen de la derecha te parezca aburrida, ¡un tablero y un cilindro verde! Pero si te digo que los cuadraditos marcados con la A y la B son exactamente del mismo tono de gris, seguro que no me crees... ¿Quieres ver cómo tengo razón?

- a) Busca en la web una imagen como la de la figura. Puedes encontrar una en este enlace: www.e-sm.net/fecytluz23a
- b) Imprímela a un tamaño suficientemente grande. Puedes hacerlo en color, pero si lo haces en escala de grises también te valdrá.
- c) Recorta con unas tijeras los cuadrados A y B y compáralos... ¡No se te olvide cerrar la boca para que no cojas frío!



© Edward H. Adelson

Desconcertante profundidad...



© Brusspup

¿Te has parado alguna vez a pensar cómo somos capaces de estimar mediante la visión la distancia a un objeto inaccesible? (recuerda el problema de la luna de la página anterior).

La pregunta del párrafo anterior tiene una respuesta sorprendente y que nos indica el grado de sofisticación y perfección que ha logrado la naturaleza en el desarrollo de los seres vivos en general y del hombre en particular.

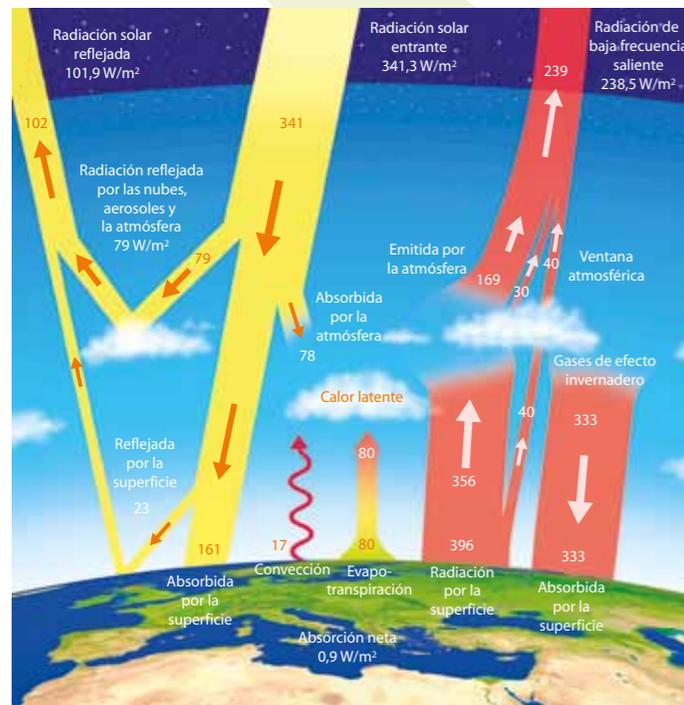
Nuestro cerebro, con la ayuda de nuestro par de ojos, determina las distancias a los objetos de forma asombrosa y automática. Para ello aprovecha las pequeñas diferencias entre las imágenes recibidas por ambos ojos: lo que se conoce como visión estereoscópica. Si cerramos un ojo, nos resulta mucho más difícil medir las distancias.

Puedes hacer el siguiente experimento. Imprime una imagen como la que aparece a la izquierda y haz fotos con tu cámara o secuencias de vídeo hasta que lo que veas sea indistinguible de la imagen de un cubo de Rubik de verdad.

Puedes obtener la imagen y otras igualmente asombrosas en el siguiente enlace: www.e-sm.net/fecytluz23b

Efecto invernadero. ¿El malo de la película?

La atmósfera juega un papel fundamental en el clima terrestre. Y uno de los elementos decisivos en este papel es la capacidad de algunos gases de absorber y emitir radiación electromagnética. Esta interacción entre gases y radiación depende fuertemente de la longitud de onda, y esta dependencia es la base del denominado "efecto invernadero"



¡Gracias, atmósfera!

La Tierra recibe energía del Sol. En un modelo simplificado se obtendría un valor de la temperatura media del planeta: $T_G = -18^\circ\text{C}$. ¡La conclusión nos deja helados! Con este valor no hubiera sido posible que se desarrollara la vida que hoy existe en la Tierra. De hecho, la temperatura promedio en su superficie es de unos 15°C .

¿Cómo se explica esta diferencia de 33°C entre los valores calculado y real de T_G ? La respuesta está en los llamados "gases de efecto invernadero" que están en la atmósfera: H_2O , CH_4 , NO_2 , NO , O_3 y, el más importante, el CO_2 .

La mayor parte de la energía que llega del Sol corresponde al espectro visible (ejercicio b) y no puede ser absorbida por las moléculas de los gases de la atmósfera, por lo que esta es casi transparente a la radiación solar. Por el contrario, la Tierra, a 288 K , emite principalmente radiación infrarroja que sí puede ser absorbida por los gases atmosféricos. Estos gases reemiten esta radiación absorbida, que vuelve en parte a la superficie terrestre, produciendo un calentamiento extra: el efecto invernadero.

a) Interpreta el balance de emisiones del gráfico y comprueba que la absorción neta que se produce es de $0,9\text{ W/m}^2$.

Tanto la Tierra como el Sol se pueden considerar como emisores casi perfectos de radiación electromagnética. El máximo de las emisiones se sitúa, en cada caso, a una longitud de onda, λ_{max} , dada por la ley de Wien:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2,9 \cdot 10^{-3} (\text{km}), \text{ donde } T \text{ es la temperatura del emisor en kelvin.}$$

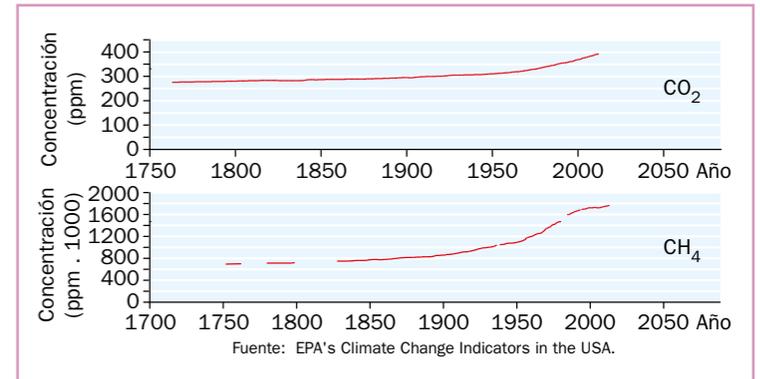
b) Copia y completa la tabla calculando cuáles son las longitudes de onda máximas de las emisiones de radiación del Sol y de la Tierra.

	T (K)	λ_{max} (m)
Sol	6000	•
Tierra	288	•

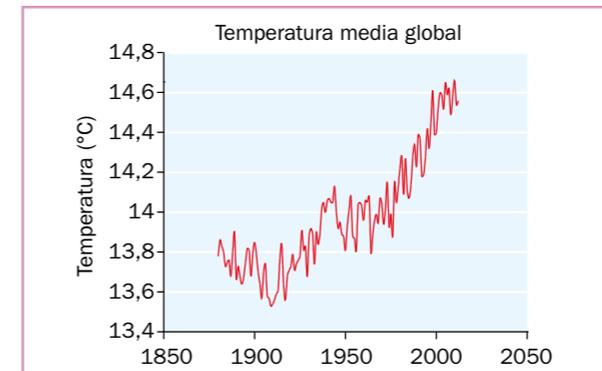
¿Y qué pasa con el cambio climático?

Efecto invernadero y cambio climático: la controversia

Midiendo la concentración de gases atmosféricos atrapados en pequeñas burbujas en el hielo antártico o, más recientemente, a partir de medidas directas, se sabe que la concentración de gases como el CO_2 ha permanecido casi constante ($270\text{-}280\text{ ppm}$) entre el siglo VIII y el XVIII, cuando comienzan a aumentar. La concentración de CO_2 es el resultado del equilibrio entre los procesos de respiración de los seres vivos y de fotosíntesis de las plantas. Sin embargo, a partir de la Revolución Industrial, y como consecuencia, sobre todo, de la quema de combustibles fósiles, la concentración de CO_2 atmosférico ha aumentado de forma continua hasta un nivel próximo a las 400 ppm .



En la figura puedes ver cómo han aumentado las concentraciones de CO_2 y CH_4 en los últimos tres siglos.



Este comportamiento se ha observado también en otros gases de efecto invernadero, cuyo aumento de concentración en la atmósfera incrementaría la reemisión de energía hacia la Tierra, y podría originar un incremento de la temperatura global del planeta.

En la gráfica de la izquierda se observa cómo la temperatura global del planeta ha aumentado $0,8^\circ\text{C}$ desde 1880. Este aumento puede parecer pequeño, pero produce un impacto directo tanto en el clima de la Tierra (episodios extremos de calor, cambios en los regímenes de precipitación...) como en su morfología (disminución de la capa de hielo, aumento del nivel del mar...).

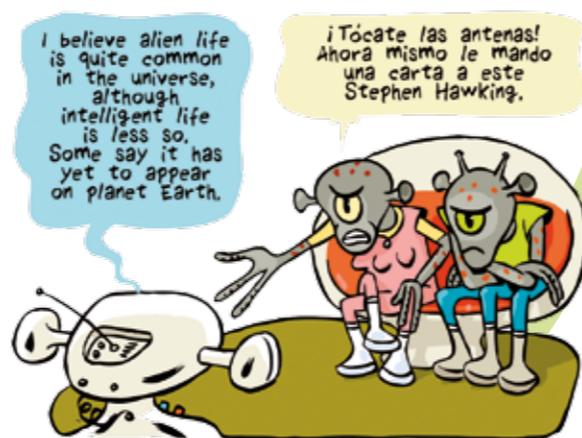
¿Existe relación entre el aumento de gases de efecto invernadero por la acción humana y el de la temperatura de la Tierra? La mayoría de los científicos cree que hay evidencias claras de esta relación, aunque responder a esta pregunta es muy difícil, ya que en el clima influyen muchas variables. Por ejemplo, antes de que existiera el ser humano también ha habido grandes cambios climáticos.



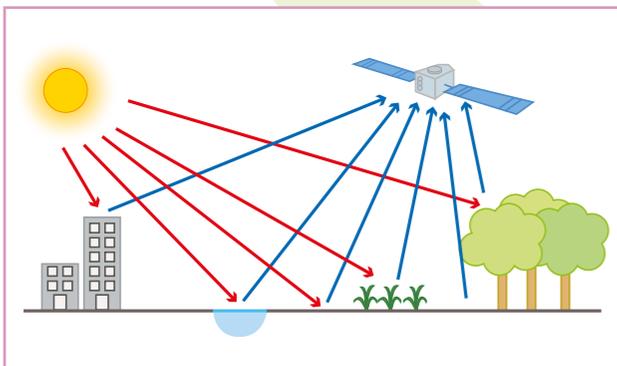
- a) ¿Sabes qué unidad de concentración es la ppm? Investiga en qué casos se utiliza frente a otras unidades.
- b) A partir de los datos de la gráfica correspondiente, calcula cuál ha sido el aumento porcentual en las concentraciones de CH_4 y CO_2 en los períodos 1800-1900 y 1900-2000 y compáralos.
- c) La temperatura media global de Marte es aproximadamente de -53°C . ¿Por qué no existe un efecto invernadero equivalente al que experimenta la Tierra, que pudiera elevar esa temperatura?
- d) Infórmate: ¿qué es el IPCC?

La "luz",
una linterna
para buscar
vida

Encontrar vida extraterrestre ha sido siempre un objetivo de la ciencia. Más allá de los encuentros con simpáticos o agresivos alienígenas, muchos científicos han argumentado que no hay razones científicas que limiten la vida en exclusiva a nuestro planeta: la Tierra no es especial en el inmenso universo. La "luz" es una herramienta imprescindible en esta búsqueda de vida.



Medir a distancia... teledetección electromagnética

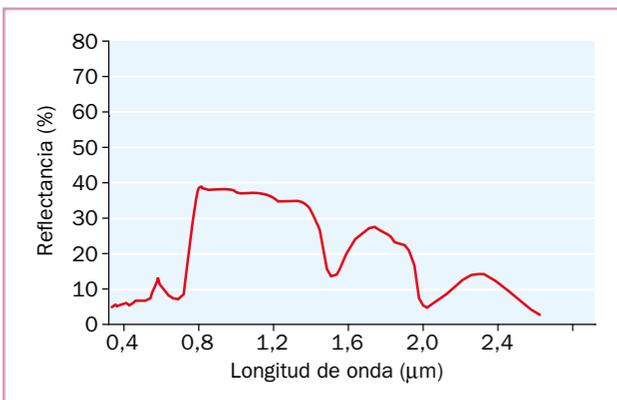


¿Es posible obtener información de un cuerpo realizando una medida a distancia? La respuesta es sí. Si hacemos incidir radiación electromagnética sobre un objeto, las características de la radiación que absorbe o refleja dependen de ese cuerpo, y si somos capaces de medir esa luz reflejada, aprenderemos mucho sobre él. Así es como conseguimos datos muy valiosos sobre la superficie de un planeta.

Imagina que queremos caracterizar la superficie de la Tierra utilizando un sensor embarcado en un satélite. Podemos utilizar la luz proveniente del Sol como fuente de iluminación. Esta radiación incide sobre la superficie terrestre, es reflejada por esta y posteriormente captada y medida por el sistema sensor

del satélite. Este sistema suele ser multispectral, es decir, puede medir cuál es el porcentaje de radiación que se ha reflejado para cada longitud de onda, en un amplio rango espectral.

Supongamos que la superficie que está observando el satélite es un campo de maíz. En la curva de la figura se pueden observar unos picos de bajo porcentaje de radiación reflejada (es decir, no absorbida) en la región visible, entre 0,4 y 0,7 μm . La clorofila de la cubierta vegetal es la responsable de estas absorciones. Dicho al revés, si el instrumento mide estas absorciones es porque el satélite está observando una cubierta vegetal.



a) En la figura correspondiente al porcentaje de luz reflejada por una cubierta vegetal en función de la longitud de onda, aparecen bandas de absorción en 1,45 μm y 1,95 μm . ¿Por qué crees que aparecen estas bandas? Piensa en la sustancia más importante de los seres vivos. ¿Se te ocurre alguna aplicación o utilidad que se podría extraer de la medida de estas bandas?

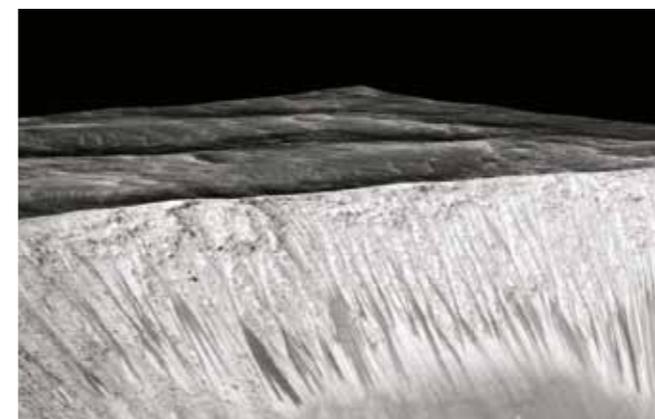
b) La clorofila presenta bandas de absorción en el visible en torno a 0,4 μm (azul) y 0,7 μm (rojo). ¿De qué color visible va a ser primordialmente la radiación reflejada en una cubierta vegetal?

¿Cómo podemos utilizar la teledetección para buscar vida?

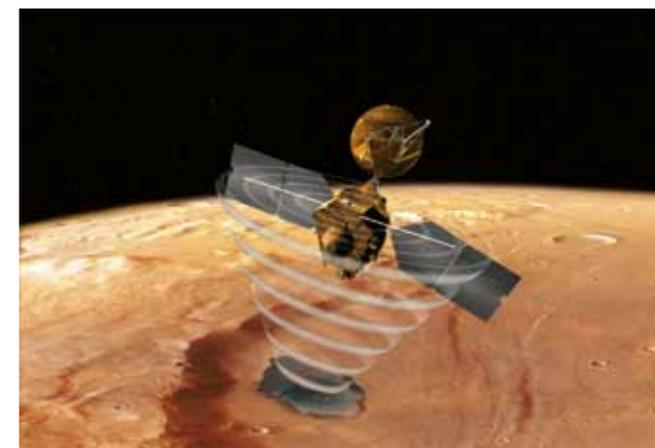
Buscando vida extraterrestre...

Buscamos vida extraterrestre, pero para ello... ¿qué tenemos que buscar? Un elemento clave para considerar viable la vida en un planeta es la existencia de agua líquida. La vida, tal y como la conocemos hasta ahora, no sería posible sin la existencia de agua líquida, el solvente donde tienen lugar las reacciones químicas de las biomoléculas basadas en carbono.

La teledetección de radiación electromagnética es la herramienta más utilizada para la búsqueda de agua líquida en la superficie de un planeta, ya que el agua líquida absorbe dicha radiación debido a las vibraciones de sus enlaces O-H. Además, sus bandas de absorción se diferencian bien de las correspondientes al vapor de agua o al hielo.



Las rayas estrechas oscuras que emanan de las paredes del cráter Garni, en Marte, son una muestra más de que el planeta rojo tiene agua líquida y que, en esas condiciones, podría albergar algún tipo de vida, según un estudio publicado por varios científicos en la revista *Nature Geoscience*.



En el sistema solar, Marte, Europa (una de las lunas de Júpiter), Encelado o Titán (dos lunas de Saturno) son, de momento, los mejores candidatos para albergar algún tipo de vida. Marte, por su cercanía, ha recibido una atención muy especial. Recientemente, la NASA ha publicado resultados que parecen confirmar la presencia de agua líquida en zonas muy concretas de la superficie de Marte. Se sabía que en Marte había agua en forma de hielo y, en una pequeña cantidad, como vapor de agua en la atmósfera.

El descubrimiento de agua líquida ha sido posible utilizando técnicas de teledetección, analizando las medidas de CRIMS, un espectrómetro de imagen que mide la luz solar reflejada en la superficie marciana, y que está a bordo del *Mars Reconnaissance Orbiter* de la NASA (en la imagen inferior izquierda puedes ver una recreación de dicha nave).

Y lo mejor está por venir. La Agencia Espacial Europea y la Academia de Ciencias de Rusia planean enviar en 2018, dentro de la misión ExoMars, un rover a Marte que podrá taladrar su superficie hasta una profundidad de 2 m. Se supone que, si hay moléculas orgánicas, será más fácil encontrarlas en el subsuelo, donde estarán protegidas del daño por radiación, fundamentalmente cósmica. Buscaremos evidencias de vida directa en la misma superficie de Marte.

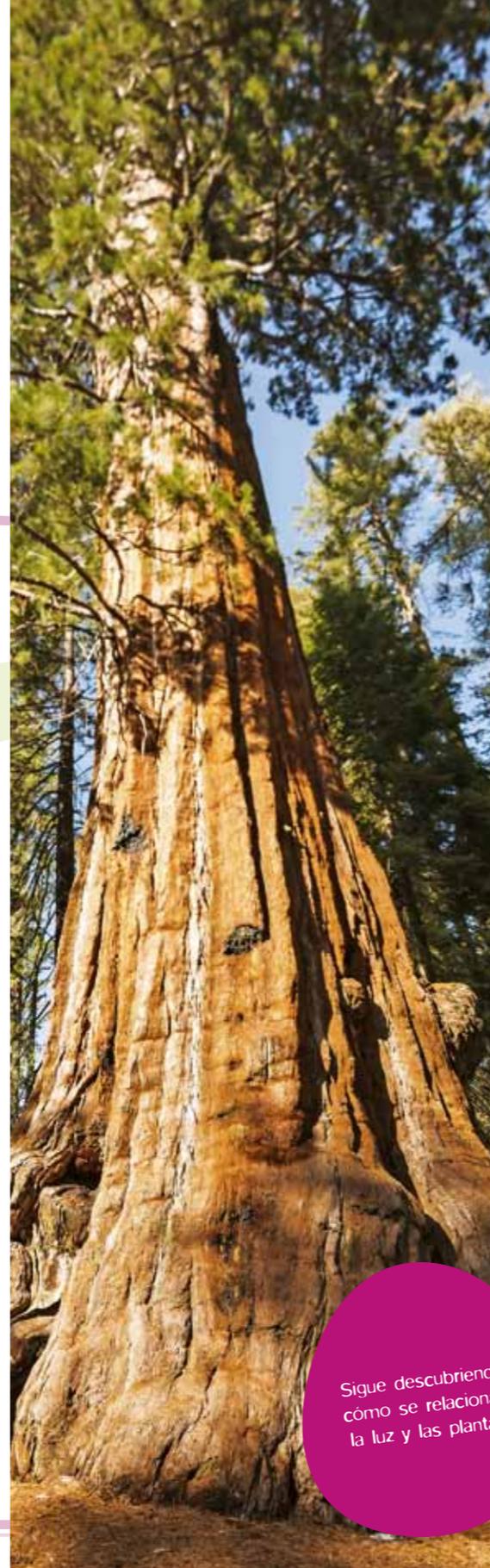
- ¿Por qué Venus no es buen candidato para albergar vida?
- ¿Qué es la zona de habitabilidad de una planeta?
- Desde hace varios años se están descubriendo multitud de planetas fuera del sistema solar. Investiga si en alguno de ellos podrían darse condiciones para la vida.
- Escribe en 10 líneas tu opinión sobre la vida extraterrestre y cómo te la imaginas.

Fotosíntesis

La fotosíntesis es el proceso básico que permite que exista la vida en la Tierra.

Mediante la clorofila, las plantas absorben la luz del sol y usan su energía para sintetizar distintos tipos de azúcares.

En este proceso se libera el oxígeno que la mayor parte de los organismos vivos utilizamos para respirar.



¿De dónde procede la madera de los árboles?

A partir de agua, CO_2 y luz del sol, las plantas sintetizan azúcares, en particular la glucosa, que luego utilizan en múltiples combinaciones para hacer estructuras con celulosa (un polímero de la glucosa que es el componente fundamental de la madera) y almacenar energía (el almidón de los granos de trigo y de las patatas). En este proceso liberan, ¡como desecho!, una sustancia fundamental para la vida en la Tierra: el oxígeno.

La clorofila es uno de los pigmentos que usan las plantas para llevar a cabo este proceso (es el más importante, pero no el único). Absorben la luz azul y roja y reflejan la verde y amarilla; por eso vemos las plantas verdes.

El agua es absorbida por las raíces, pero el dióxido de carbono procede de la atmósfera. ¿Quién iba a decir que las toneladas de madera que tiene un gran árbol o el almidón de la harina que contiene el pan proceden del aire?

Esquemáticamente, la reacción que se produce durante la fotosíntesis es:



Si suponemos que la madera es fundamentalmente un derivado de la glucosa:

- ¿Cuántos litros de agua tiene que absorber un árbol para producir una tonelada de madera? Recuerda que la densidad del agua a 20°C es de 1 g/cm^3 .
- ¿Y cuántos litros de CO_2 ? (En condiciones normales de presión y temperatura).
- Para producir un mol de glucosa en la reacción anterior es necesario aportar una energía de 2813 kJ. ¿Cuántos fotones de luz azul de 470 nm de longitud de onda serían necesarios para aportar esa energía?

Sigue descubriendo cómo se relacionan la luz y las plantas

¿Plantas extraterrestres?

Aún no hemos descubierto vida extraterrestre, pero es posible que en un futuro próximo la descubramos en alguno de los planetas que giran alrededor de otras estrellas. La luz de estos astros tiene colores diversos que dependen de su temperatura y de su masa. Por ello, según sea el color de la luz de una estrella, la posible vida vegetal en alguno de sus planetas podría ser muy diferente de la terrestre. En las estrellas más frías, las plantas podrían llegar a ser negras, para absorber mejor la luz y el calor de su sol. Cerca de las estrellas más brillantes quizá tengan que ser capaces de reflejar la luz. ¿Te imaginas una planta de hojas brillantes como el metal?

- Busca el nombre de cinco estrellas cuyo color sea rojo, otras cinco amarillas como nuestro Sol y otras cinco azules. ¿Crees que habrá alguna estrella de color verde?

Puede parecerte extraño, pero hay un tipo de estrellas conocidas como “enanas marrones” cuya temperatura puede llegar a ser como la de tu habitación o incluso inferior. Busca información y contesta.

- ¿Qué es una enana marrón? ¿Cuál es la estrella más fría que se ha detectado hasta el momento?



Comprueba cómo las plantas absorben CO_2

Esta experiencia la puedes hacer solo o en grupo, pero siempre con la ayuda de un profesor. Hacen falta:

- Dos botellas pequeñas de plástico (de algún refresco) con su tapón.
- Agua de cal (mira la receta de la derecha).
- Varias hojas grandes y verdes (por ejemplo, de un castaño).
- Una pajita de refresco.
- Dos vasos de plástico transparentes.

Sopla en una de las botellas a través de la pajita durante 30 segundos y tápala. Coge la otra, sopla durante 10 segundos, introduce las hojas, vuelve a soplar durante 30 segundos y tápala bien. Pon las dos botellas al sol.

Después de una hora, echa una cucharada sopera de agua de cal en cada una de ellas teniendo cuidado de abrirlas y cerrarlas con rapidez. Agita su contenido y observa.

Fíjate que, en ambos casos, al soplar hemos introducido CO_2 en el agua y que el agua de cal se vuelve lechosa al ponerse en contacto con el CO_2 . Esto se debe a que se produce la reacción $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ y el carbonato de calcio generado enturbia el agua. ¿Qué observas? Verás que el agua de la botella que tenía las hojas es transparente porque no quedaba CO_2 . ¡Con ayuda de la luz del sol, las hojas lo han convertido en glucosa y oxígeno!

Para hacer el agua de cal, disuelve un gramo de hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, en un litro de agua destilada. Agita bien la mezcla durante unos minutos y déjala reposar durante un día. Con cuidado, vierte la parte superior de la disolución en otro recipiente (filtrándola con papel si es necesario).



HUYGENS, NEWTON... Y LA NATURALEZA DE LA LUZ



Nuestros dos personajes nacieron en el s. XVII. De jóvenes inventaron relojes, lentes y telescopios. De mayores fueron físicos famosos, y no tuvieron tiempo ni de enamorarse... ¡salvo de la Ciencia, claro!. Como ves, tenían muchas cosas en común; sin embargo discreparon en sus respuestas a una de las grandes preguntas de la Física

¿Qué es la luz?



Christiaan Huygens pensaba que la luz era una onda y con su teoría explicaba muy bien algunos fenómenos como la reflexión y la refracción.

Isaac Newton descompuso la luz con un prisma y mantenía que estaba formada por partículas, de distinta masa según el color de cada luz.



Está claro: ¡son ondas!



Está claro: ¡son partículas!

La polémica estaba servida y cada uno atacaba y contraatacaba con ingeniosos argumentos

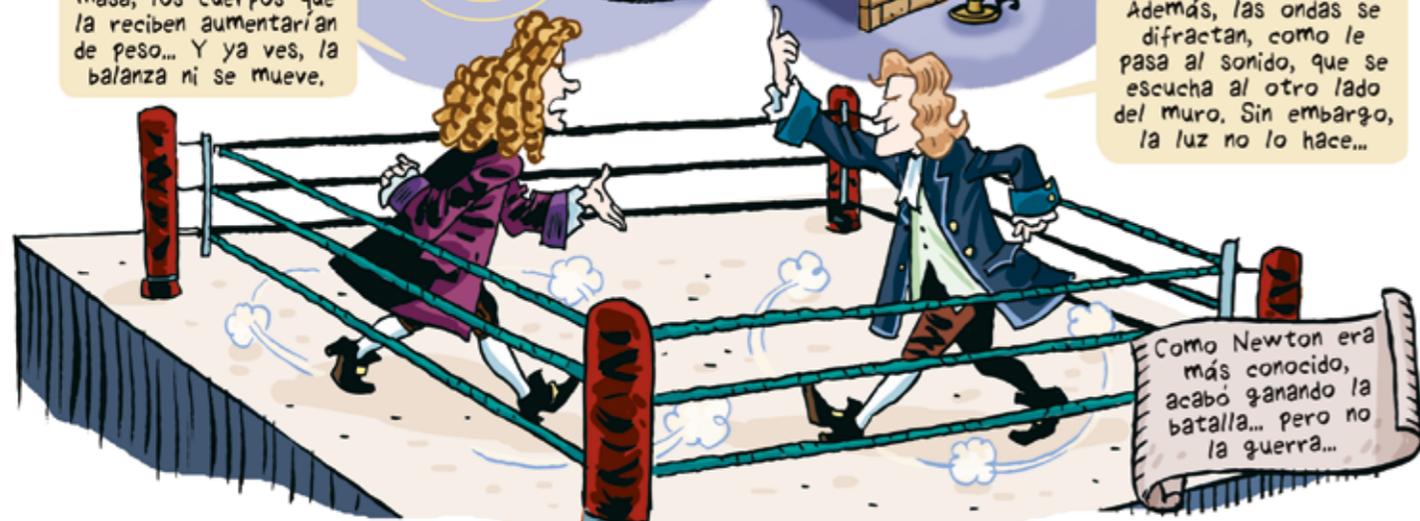
¡TING!

Estimado Isaac: si la luz estuviera compuesta de partículas, con la enorme velocidad que llevan, chocarían y se romperían.

Estimado Christiaan, si la luz fuese una onda, necesitaría un medio en el que propagarse, y bien sabes tú que la luz es capaz de atravesar el vacío...

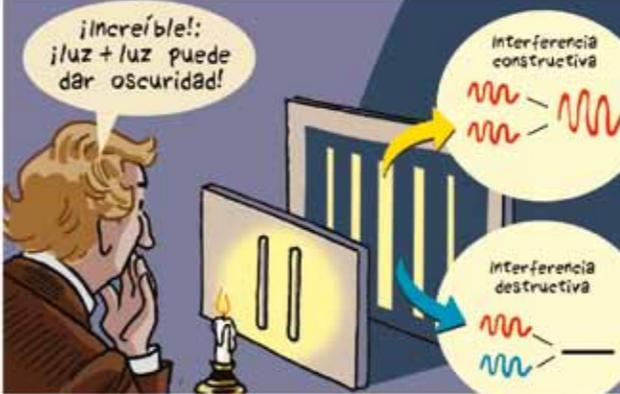
Además, si estas partículas de la luz tuvieran masa, los cuerpos que la reciben aumentarían de peso... Y ya ves, la balanza ni se mueve.

Además, las ondas se difractan, como le pasa al sonido, que se escucha al otro lado del muro. Sin embargo, la luz no lo hace...



Como Newton era más conocido, acabó ganando la batalla... pero no la guerra...

En 1801, Thomas Young justificó el fenómeno de la interferencia de la luz utilizando el modelo ondulatorio de Huygens

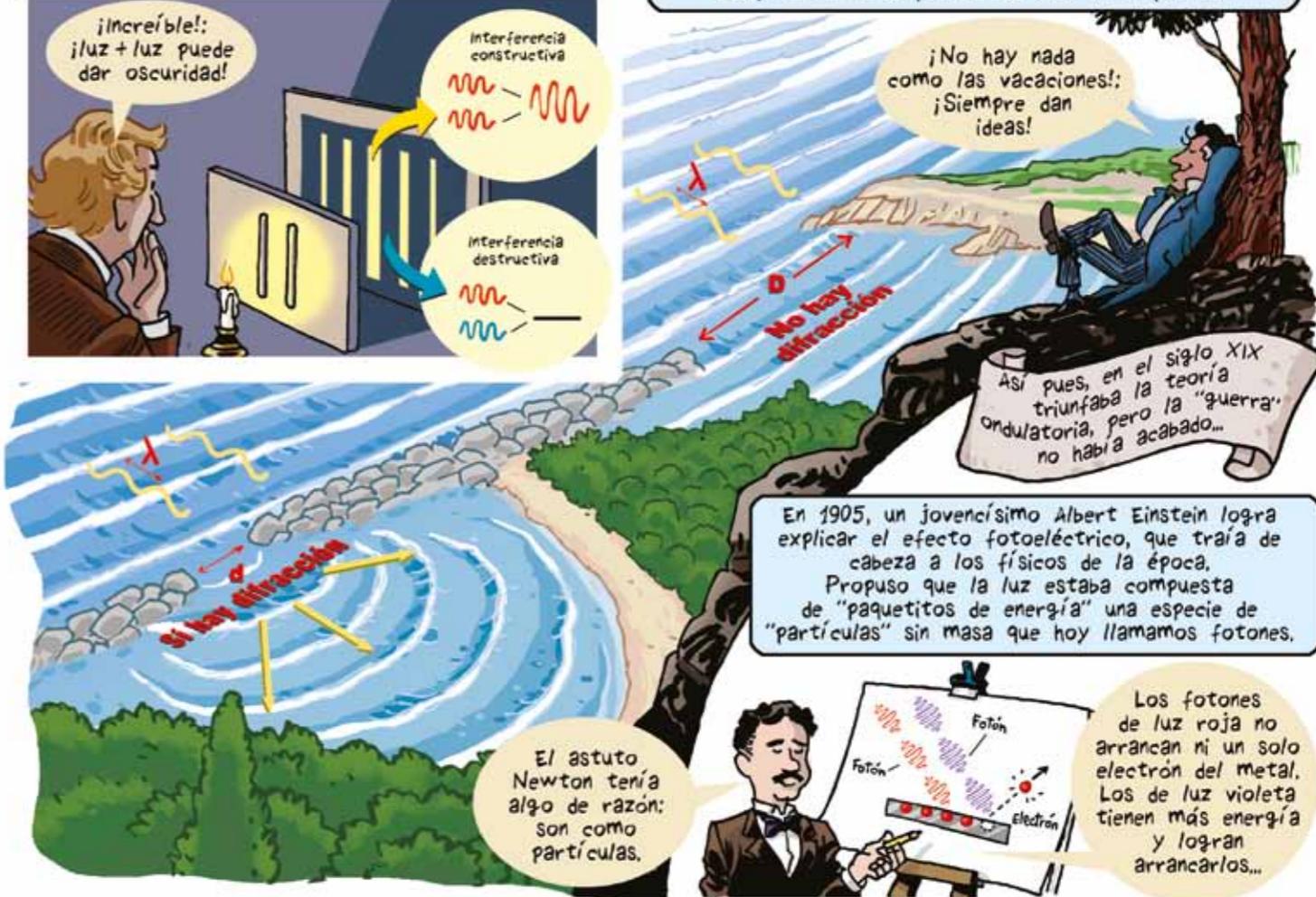


¡Increíble!: ¡luz + luz puede dar oscuridad!

Interferencia constructiva

Interferencia destructiva

Unos cuantos años después, Augustin-Jean Fresnel explicó que la luz sí que se difracta cuando el tamaño del obstáculo o del agujero es similar al de la longitud de onda, tal como le pasa a las olas en el puerto.



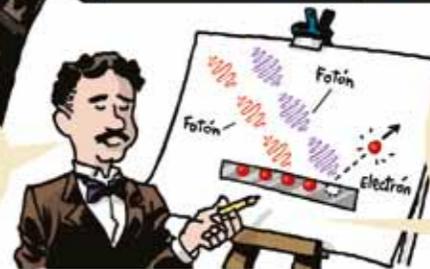
¡No hay nada como las vacaciones! ¡Siempre dan ideas!

Así pues, en el siglo XIX triunfaba la teoría ondulatoria, pero la "guerra" no había acabado...

En 1905, un jovencísimo Albert Einstein logra explicar el efecto fotoeléctrico, que traía de cabeza a los físicos de la época. Propuso que la luz estaba compuesta de "paquetitos de energía" una especie de "partículas" sin masa que hoy llamamos fotones.

El astuto Newton tenía algo de razón: son como partículas.

Los fotones de luz roja no arrancan ni un solo electrón del metal. Los de luz violeta tienen más energía y logran arrancarlos...



En 1924, Louis de Broglie, séptimo duque de Broglie y uno de los pocos nobles interesados por la física, dio con una solución "salomónica": la dualidad onda-corpúsculo.

¡Haya paz! La luz a veces se comporta como onda y otras veces como partícula.

Y es más, los electrones, que parecen partículas, a veces se comportan como ondas.



¡Ves como tenía yo razón!

¡Qué pesado! ¡Soy yo el que tenía razón!



Este cuaderno de actividades es un material concebido como anexo a la unidad didáctica “CIENCIA CON LUZ PROPIA”, editada y coordinada por la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT) y dentro de un convenio de colaboración entre dicha fundación y SM.

Autoría

Jesús Fernando Barbero, Antonio Jesús de Castro, Mariano Esteban, Julio Serna

Edición

Juan Alberto Torresano, José González López de Guereñu

Corrección

Ricardo Ramírez

Fotografía

Fidel Puerta, Javier Calbet; PHOVOIR; THINKSTOCK; iStock; AGE FOTOSTOCK; NASA, JHUAPL, SwRI; ESA, Hubble SM4 ERO Team; JPL, University of Arizona; NASA, JPL; Edward H. Adelson; Brusspup/ thisiscoossal.com; Laboratorio de Sensores, Teledetección e Imagen en el Infrarrojo (LIR) Departamento de Física, UC3M; ARCHIVO SM

Foto de cubierta

“El péndulo caótico”. Alexandre Wagemakers. VIII edición del Certamen de fotografía científica FOTCIENCIA.

Ilustración

Juan Antonio Rocafort Huerta; Bartolome Seguí; Ariel Alejandro Gómez; Juan Francisco Cobos Hernández; Félix Moreno Arrastio; Raúl Ayala Mayol; ARCHIVO SM

Edición gráfica

Fidel Puerta

Diseño

Estudio SM

Coordinación editorial de Ciencias

Laura Pérez

Coordinación editorial de Matemáticas

Josefina Arévalo

Dirección de arte del proyecto

Mario Dequel

Dirección editorial

Aída Moya

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Dirijase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.