

# Formación de Imágenes y agudeza visual

## 1. LA CÁMARA OSCURA (estenoscopio)

En sus albores, el prototipo de la cámara fotográfica moderna era un aparato denominado "cámara oscura" cuya forma primitiva era simplemente una cavidad oscura que contenía un agujero pequeño en una de las paredes. La luz que entraba por el orificio proyectaba una imagen invertida de la escena exterior iluminada en aquel entonces por el sol, en la pared opuesta a la que contenía el orificio. Figura 1. Este principio era conocido por Aristóteles cuyas observaciones fueron custodiadas por los eruditos árabes durante toda la Edad Media Europea.

En el siglo XV, Leonardo Da Vinci definió a la cámara oscura. Decía que si se coloca una hoja de papel en blanco verticalmente en una habitación oscura, con un pequeño orificio de entrada de luz del exterior enfrente del papel, el observador verá proyectada en ella los objetos del exterior, con sus formas y colores. "Parecerá como si estuvieran pintados en el papel", escribió. Lo único que faltaba, era descubrir la forma de fijar la imagen. O sea, hallar una emulsión sensible a la luz (que se oscureciera al recibir los rayos luminosos) con la que recubrir el papel y un medio de fijarla para que no continuara oscureciéndose. No llegó a descubrirlo.

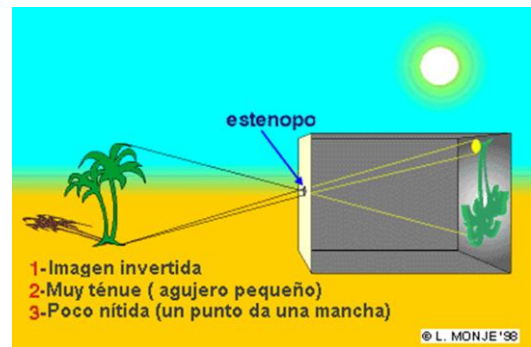


Figura 1. Prototipo de cámara oscura.

Los libros de campo de Leonardo da Vinci describen varios experimentos con la cámara oscura, pero el primer estudio detallado del aparato aparece en *Magia Naturalis* de Giovanni de la Porta quien lo recomendaba como ayuda para dibujar. Johannes Kepler, ilustre astrónomo contemporáneo de Galileo (siglos XVI y XVII), disponía de una versión portátil que utilizaba mientras hacía peritajes en Austria. Hacia fines del siglo XVII, la cámara oscura portátil, pequeña, ya era muy conocida.

Veamos el proceso de formación de la imagen. Se supone que todo el patito es iluminado por una fuente de luz que no hemos dibujado, y que de todos los puntos que definen la escena, tomamos por ejemplo un punto ubicado en la punta del piquito del pato que por reflexión emite luz en todas direcciones.

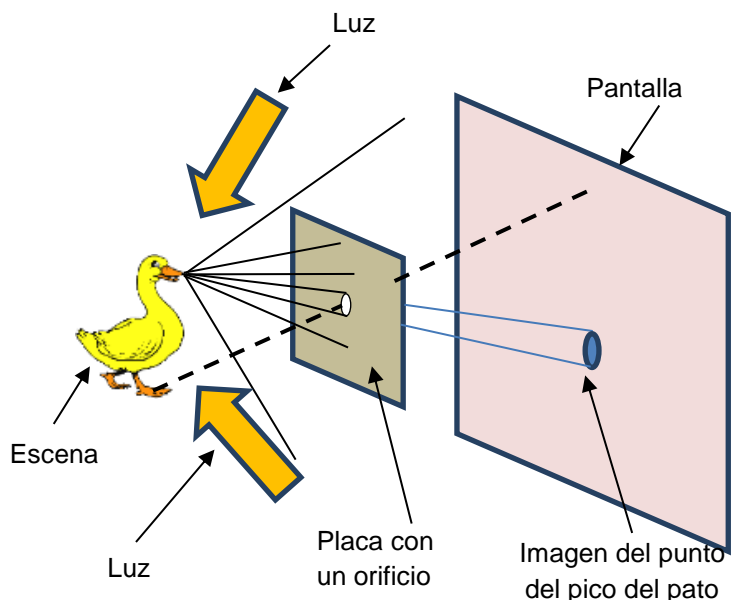


Figura 2. En el dibujo se ha indicado la imagen de la punta del pico del pato.e

De todos los rayos emitidos por el punto elegido en el pico del pato, sólo algunos pasan por el orificio y forman la imagen de ese punto sobre la pantalla. Cuanto más pequeño sea el orificio, más parecida a un punto será la imagen sobre la pantalla, aun cuando no serán demasiados los rayos que atraviesan el orificio, por lo cual la imagen será de una intensidad muy pobre.

Cada punto que define el pato, emite infinidades de rayos de luz, muy poquitos de los cuales atraviesan el orificio y forman su imagen sobre la pantalla. Por ejemplo la luz que sale de un punto ubicado en el extremo de las patitas del pato (línea punteada), formará su imagen por encima de

la imagen del pico, por lo que la imagen del pato resultará invertida. Lo mismo ocurrirá con cada uno de los puntos de la escena (patito) y finalmente la totalidad de puntitos imagen, recompondrá la totalidad de la imagen. Cuanto más pequeño sea el orificio, más pequeños serán los puntitos imagen, y más nítida pero menos intensa será la imagen.

Si en aquel lugar en el cual se forma la imagen se coloca una superficie fotosensible, por ejemplo una película fotográfica, la cámara oscura se transforma en una cámara fotográfica, en el sentido como hoy se entiende es una cámara fotográfica (un equipo o instrumento que registra escenas). Naturalmente, a partir de la cámara oscura utilizada como cámara fotográfica, los equipos se fueron haciendo más complejos con el agregado de lentes, primero una y luego varias, prismas o pentaprismas en los modelos "réflex", sistemas que pueden modificar el tamaño del orificio por el cual penetra la luz reflejada por el objeto y el tiempo que el orificio permanece abierto, etc. Finalmente, la película que inicialmente se utilizaba para registrar la imagen, cambia por una placa compuesta por una cantidad enorme de sensores, que envían la información registrada a una memoria digital. De este modo nace la fotografía digital.

La primera fotografía tomada en película fotográfica (permanente), fue hecha por Joseph Nicéphore Niépce (1765-1833) con una cámara de caja con una pequeña lente convexa, una placa de peltre sensibilizada y unas 8 horas de exposición. Esto sucedió en el 1826/27 cuando logró fijar una imagen permanente del patio de su casa. Figura 3. Para realizar esta fotografía utilizó una plancha de peltre recubierta de Betún de Judea. Exponiendo la plancha a la luz y luego lavándola, quedaba la imagen invisible: las partes del barniz afectadas por la luz se volvían insolubles o solubles, dependiendo de la luz recibida. El lavado se hacía con un disolvente de aceite esencial de lavanda y de aceite de petróleo blanco, disgregándose las partes de barniz no afectadas por la luz y luego se lavaba con agua pudiendo apreciar la imagen compuesta por la capa de betún para los claros y por la superficie de la placa plateada (sin betún) para los oscuros.



Figura 3. Primer imagen permanente.

## 2. ACTIVIDADES

**2.1 Construye tu propia cámara oscura.** Puedes construir tu propia cámara oscura con una caja de zapatos, o con cualquier caja de paredes opacas que no permitan el paso de la luz, con un orificio en una de la caras y reemplazando la cara opuesta a aquella en la

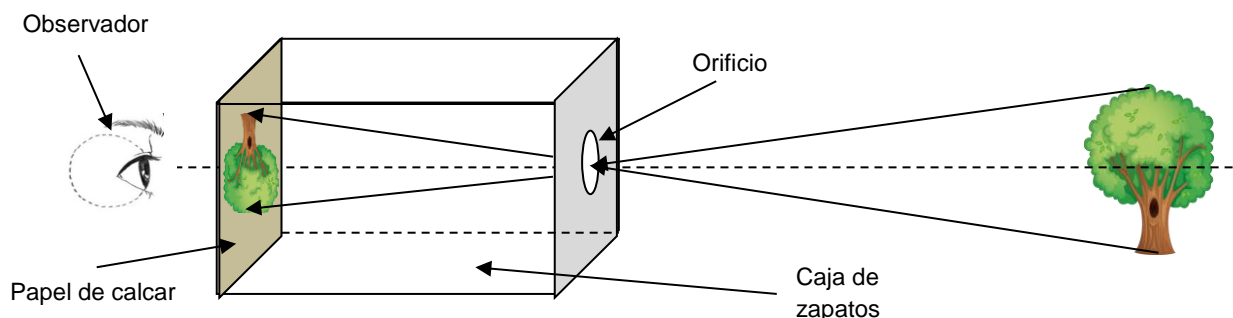
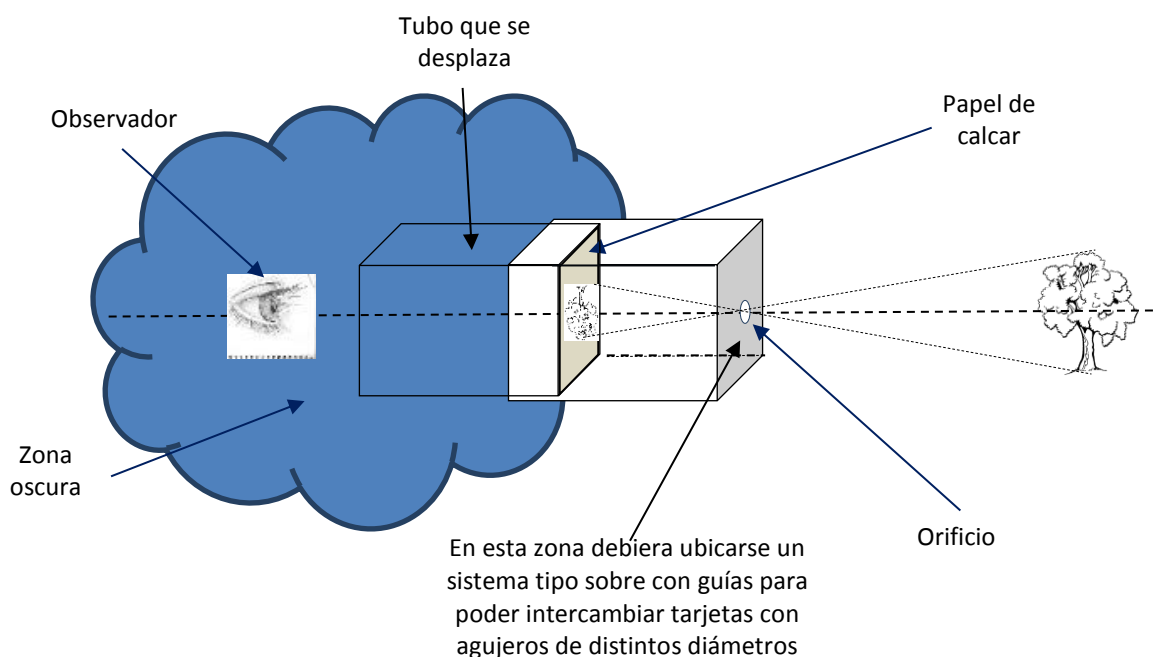


Figura 4. Cámara oscura con una caja de zapatos.

cual hemos realizado el orificio, por papel de calcar. Figura 4. El papel de calcar resulta necesario, en razón de que vamos a observar la imagen desde la parte externa de la caja (del otro lado en relación con la cara a la cual llegan los rayos de luz).

Con el propósito de que se perciba con mayor claridad la imagen que se forma sobre el papel de calcar, es conveniente cubrir para que no ingrese luz, de alguna manera, la zona próxima a la imagen. Una manera de considerar este aspecto es colocar el papel de calcar en el extremo de otra caja (en este caso un tubo), que pueda desplazarse por dentro de la caja que tiene en una de sus caras el orificio (Figura 5), y que ya no tiene la cara por donde entra el tubo o caja interior. También es conveniente que el ojo del observador se encuentre en una zona oscura, de modo de dilatar su pupila por la falta de luz y poder observar la imagen de baja intensidad que se forma sobre el papel de calcar. Una manta, dibujada como una nube en la Figura 5, ayuda a lograr una zona oscura a la izquierda del estenoscopio. Este diseño con dos tubos, uno dentro del otro, permite como se advierte en el dibujo, modificar la distancia entre el papel de calcar y el orificio.



**Figura 5.** Diseño de cámara oscura que permite modificar la distancia entre el orificio y la imagen, y el tamaño de los orificios.

Los tubos pueden ser de sección cuadrada, rectangular o circular, como usted lo desee. La sección del tubo, definirá de alguna manera, el tamaño y la forma de la imagen. También es conveniente que en la cara en la cual se ubicará el orificio, se construya un sistema tipo sobre, para que utilizando tarjetas con agujeros de distintos diámetros, pueda modificarse el tamaño del orificio y observar lo que ocurre con la imagen sobre el papel de calcar, en cada caso. De igual modo debiera desarrollarse un sistema que permitiese, además de intercambiar tarjetas con distintos orificios, la posibilidad de colocar una lente en las proximidades del orificio. Los orificios debieran hacerse con la punta de una aguja o mejor, con un sacabocados, para lograr bordes limpios.

De acuerdo a lo indicado precedentemente, y a los materiales disponibles construye una cámara oscura. El tamaño (largo y forma de los tubos), queda a tu criterio. Una vez construida la cámara oscura, observa distintas escenas, preferiblemente bien iluminadas.

**2.2 Experimento 1 con la cámara a oscura.** Construye tarjetas con distintos orificios, teniendo en cuenta el tamaño del sobre (guías); los orificios pueden ser desde diámetros de 2mm hasta diámetros de 2 cm. Ahora, intercambia tarjetas en el estenoscopio (distintos tamaños de orificios) y observa cuidadosamente lo que ocurre con la imagen en el papel de calcar. Explica brevemente los fenómenos observados. Concentra tu explicación en la nitidez de la imagen y en la intensidad de la misma. ¿Es necesario que el orificio sea circular? AYUDA: para percibir las distintas características de la imagen, es conveniente

que no modifiques la imagen que observas y su iluminación (tanto el estenoscopio como la escena, no debieran moverse).

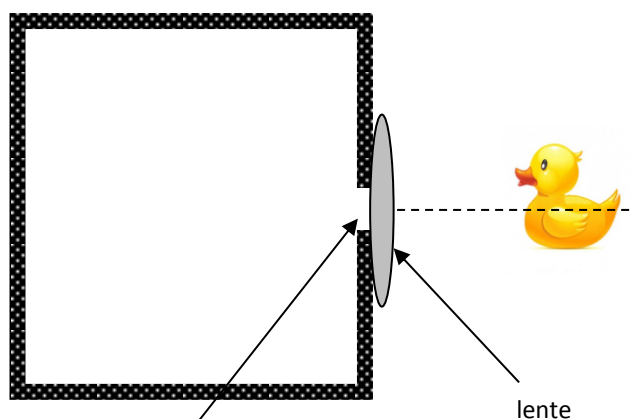
**2.3 Experimento 2 con la cámara a oscura.** Coloca el estenoscopio de manera de lograr la **imagen** de una escena. Ahora desplaza el tubo interno de cartón por dentro del otro, de manera de modificar la distancia entre el orificio y el papel de calcar y observa cuidadosamente lo que ocurre con la imagen. Explica brevemente los fenómenos que observas (nos referimos al tamaño y a la intensidad de la imagen). ¿Puedes calcular en cualquier posición relativa de los tubos, el tamaño de la imagen en relación con la del objeto?

**2.4 Experimento 3 con la cámara a oscura.** NOTA: a una determinada distancia entre la pantalla (papel de calcar en nuestro caso) y el sistema óptico (en nuestro caso el orificio), la imagen será de muy buena calidad (bien nítida) y luego si acercas o si alejas la pantalla del sistema óptico, la imagen comenzará a verse borrosa. Hay posiciones extremas de visión nítida a partir de las cuales, resulta inaceptable considerar como nítida a la imagen. Se denomina “profundidad de campo” de un sistema óptico tipo cámara fotográfica, a la distancia entre las posiciones extremas de una pantalla siempre que sobre la misma se observe una imagen más o menos nítida de la escena.

En nuestro caso del estudio de las imágenes que produce una cámara oscura, tratemos de responder estas preguntas: ¿la imagen de la escena exterior se produce a cualquier distancia del orificio? ¿Existe una distancia entre el orificio y el papel de calcar que provoque una mejor imagen? ¿Si cambiamos el tamaño del orificio, alguna de las dos preguntas anteriores, tendría otra respuesta? Resumiendo, que puedes decir acerca de la “profundidad de campo” del sistema óptico “cámara oscura”. En todos los casos, explica brevemente.

**2.5 Experimento 4 con la cámara a oscura.** Ahora realiza un nuevo experimento, colocando una lente convergente en el orificio. Puedes tomar un orificio de tamaño intermedio, por ejemplo de 1 cm de diámetro y la lente la puedes sostener, con tu mano, pegar de algún modo sobre el orificio con cinta de enmascarar, o solicitar ayuda a otro miembro del equipo para que la sostenga, tal como se muestra en la figura 6.

Modifica la posición relativa de los tubos, hasta lograr una imagen nítida sobre el papel de calcar. Ahora, sin mover el estenoscopio, quita la lente de su posición delante el orificio y luego vuelve a colocarla. Realiza esta operación en varias oportunidades. ¿Qué observas? ¿Puedes explicar lo que observas? Mediante un trazado de rayos intenta explicar los cambios de la imagen provocados por la presencia o no de la lente.

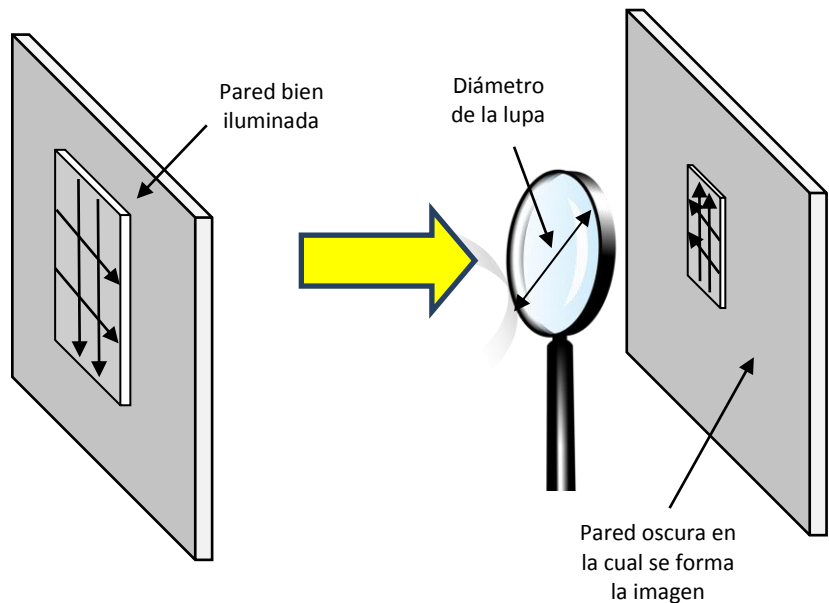


**Figura 6.** Cámara oscura con un diseño que la aproxima a una cámara actual.

Coloca un orificio de otro tamaño y luego repite el experimento anterior, colocando y quitando la lente del orificio. Explica lo que ocurre con la intensidad de la imagen, con su nitidez, con su tamaño, y fundamentalmente, opina sobre la “profundidad de campo”. Explica brevemente con un trazado de rayos, lo que ocurre en relación con la profundidad de campo.

**2.6 Experimento 5.** Ahora vas a realizar experimentos con lupas de distinto diámetro, sin la cámara oscura. Busquemos una pared en un lugar medianamente oscuro, más o menos blanca y lisa (el blanco y liso, lo podemos resolver pegando una hoja blanca con cinta de enmascarar en la pared). Sería bueno que frente a la pared elegida, tengamos una escena bien iluminada, con ventanales por los cuales se observen paisajes. Figura 7.

Coloca la lupa con su plano paralelo a la pared, y acércala a la misma a partir de una distancia de algo más de medio metro, hasta observar una imagen más o menos nítida de la pared iluminada (pared de enfrente, con ventanas y paisajes). Acerca y aleja la lupa (lente convergente) de la pared y observa lo que ocurre. Prueba a continuación con lentes de distintos diámetro intentando, en todos los casos, formar la imagen de los ventanales y paisajes, sobre la hoja o la pared; no importa que las distancias entre la lente y la pared al momento de formarse la imagen, sean distintas. **NOTA:** las distintas potencias ( $P = \frac{1}{f}$ ) de las lentes, provoca que la imagen se produzca a distancias distintas entre la lupa y la pared.



**Figura 7.** Experimento en el cual la variable independiente en la formación de las imágenes, es el diámetro de la lupa (lente convergente).

Describe lo que observas cuando modificas el diámetro de la lupa. Explica con fundamento el ¿por qué? de lo que ocurre. Puedes analizar la intensidad de la imagen, su tamaño y la distancia entre la imagen y la lente.

**2.7 Experimento 6 con la cámara a oscura.** Se trata de un experimento similar a varios de los anteriores, sólo que en este caso observarás con la “cámara oscura” la imagen de una fuente puntual. Utilizaremos como fuente puntual una lamparita pequeña o una linterna LED (de un solo elemento). Coloca tarjetas con distintos orificios en el sobre del estenoscopio y observa la imagen. Con cada una de las tarjetas, desplaza la posición relativa de los tubos y observa lo que ocurre con la imagen. Caracteriza la imagen en relación con el tamaño del orificio, y con la distancia al orificio, y principalmente, con las dimensiones de la fuente de luz.

**2.8 Experimento 7 con la cámara a oscura.** En este caso utiliza como escena para observar con la “cámara oscura” una fuente de luz constituida por dos a más fuentes puntuales, similares a las del experimento 6. Mueve la posición relativa de los tubos y observa lo que ocurre con las imágenes. Intercambia el orificio por otro de distinto tamaño y observa lo que ocurre con las imágenes de las fuentes puntuales. Analiza con precisión el momento en el cual dejas de ver las fuentes puntuales para ver una mancha que de alguna manera es suma de las manchas producida por cada una de las fuentes.

**3. COMENTARIOS.**

Las lentes que normalmente se utilizan en los laboratorios de enseñanza de la Física, tienen superficies planas o esféricas. En la figura se observan las tres de la izquierda “convergentes” y las tres de la derecha “divergentes”.

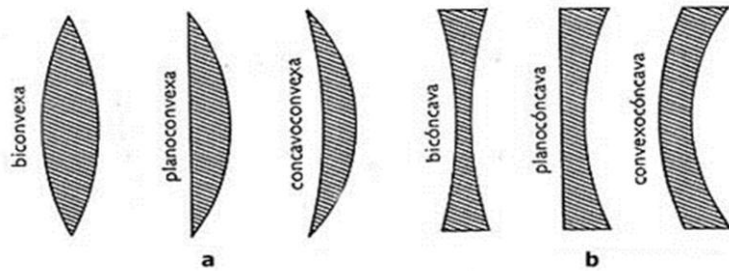


Figura 8. Tipos de lentes: a) convergentes, y b) divergentes.

Figura 8. Estas lentes se caracterizan porque un haz de rayos que proviene de una fuente puntual de luz, cuando atraviesan la lente, se desvían y vuelven a cruzarse en un punto. Pero sólo los rayos próximos al eje óptico del sistema se cruzan en un punto luego de atravesar la lente. Los rayos alejados del eje óptico del sistema, se desvían al atravesar la lente, pero de tal modo que se cruzan en un punto más próximo a la lente que el resto de los rayos. Este fenómeno se denomina “aberración esférica” en razón de que se produce por el carácter esférico de sus superficies. Si las superficies de las lentes fuesen paraboloides de revolución, no existirían estas aberraciones.

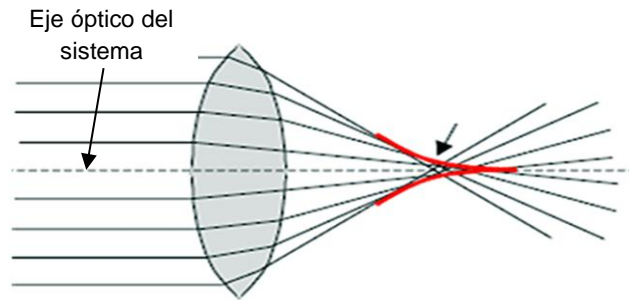


Figura 9. A este fenómeno se le denomina “aberración esférica”.

Las aberraciones cromáticas están relacionadas con el valor del índice de refracción del material con el cual se construye la lente, y con una propiedad de éste índice, que destaca su variación con la longitud de onda (color) del rayo luminoso.

De alguna manera estamos señalando que la velocidad de la luz en la materia, por ejemplo en el agua (figura 10) o en el vidrio (figura 11), no es la misma para los distintos colores del espectro luminoso. La refracción del haz de luz, cuando ingresa a la lente y cuando emerge de la misma, gobernada por la Ley de Snell, en la cual participa el índice del material con el cual se construyó la lente, depende del índice de refracción. El hecho de que el índice de refracción depende del color (longitud de onda), provoca que la desviación de los rayos resulte distinta según la longitud de onda.

Esta característica indeseada en el caso de las lentes, permite el funcionamiento de los prismas como dispersor de longitudes de onda o colores.

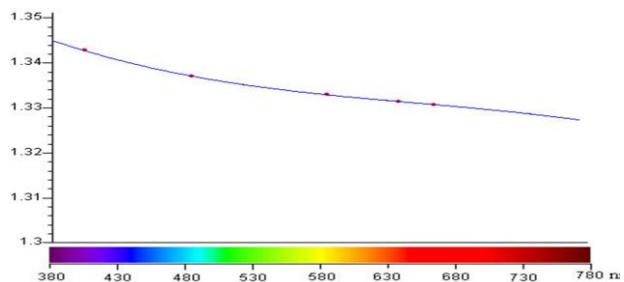


Figura 10. Variación del índice de refracción del agua, con la longitud de onda.

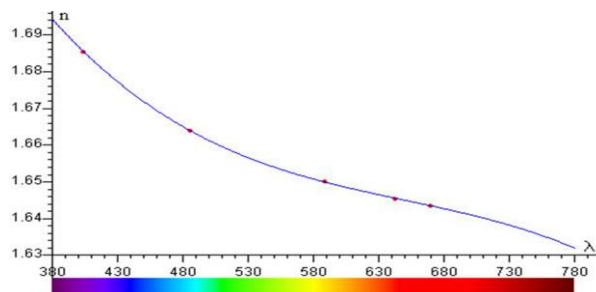


Figura 11. Variación del índice de refracción del agua, con la longitud de onda.

#### 4. EL OJO HUMANO

El ojo es un órgano que detecta la luz y es la base del sentido de la vista. Su función consiste básicamente en transformar la energía lumínica en señales eléctricas que son enviadas al cerebro a través del nervio óptico. En lo que sigue nos detendremos en todos aquellos aspectos de este órgano, que nos permitan explicar el fenómeno de la visión: marcha de rayos en su interior, lentes, sensores que transforman energía luminosa en energía eléctrica, separación entre sensores, orificio por el cual penetra la luz al ojo, índice de refracción de algunas de las sustancias que lo componen, etc.

El “ojo humano” funciona de forma muy similar al de la mayoría de los vertebrados y algunos moluscos; posee una lente llamada cristalino (lente convergente que puede modificar su potencia según la distancia entre la escena y el ojo), un diafragma que se llama pupila cuyo diámetro está regulado por el iris y un tejido sensible a la luz que es la retina. La luz penetra a través de la pupila, atraviesa el cristalino y se proyecta sobre la retina (lugar en el cual se forma una imagen como en la cámara oscura), donde se transforma gracias a unas células llamadas fotorreceptoras en impulsos nerviosos que son trasladados a través del nervio óptico al cerebro.

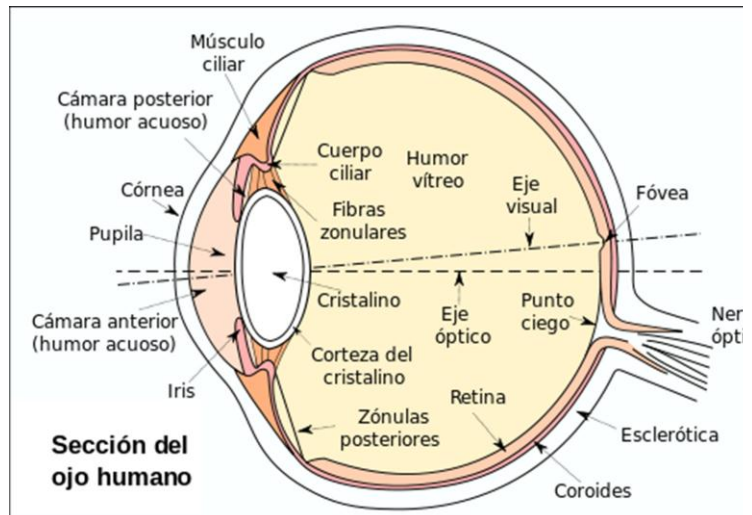


Figura 1. Partes que componen el ojo humano

Su forma es aproximadamente esférica, mide alrededor de 2,5cm de diámetro y está lleno de un gel transparente llamado humor vítreo que rellena el espacio comprendido entre la retina y el cristalino. En la porción anterior del ojo se encuentran dos pequeños espacios: la cámara anterior que está situada entre la córnea y el iris, y la cámara posterior que se ubica entre el iris y el cristalino. Estas cámaras están llenas de un líquido que se llama humor acuoso, cuyo nivel de presión, llamado presión intraocular, es muy importante para el correcto funcionamiento del ojo.

Para que los rayos de luz que penetran en el ojo se puedan enfocar en la retina, se deben refractar. La cantidad de refracción requerida depende de la distancia del objeto al observador. Un objeto distante requerirá menos refracción (ángulo  $\beta$  del dibujo) que uno más cercano (ángulo  $\alpha$ ). Figura 2 La mayor parte de la refracción ocurre en la córnea, que tiene una curvatura fija. Otra parte de la refracción requerida se da en el cristalino. El cristalino puede cambiar de forma, aumentando o disminuyendo así su capacidad de refracción. El cristalino, relajado, hace las veces de una lente bien delgada (pequeño espesor en la parte central) y está preparado para observar objetos que se encuentran muy lejos del observador; por acción de los músculos ciliares se transforma en una lente algo más gruesa (incrementa su espesor en la parte central) cuando el objeto a observar se encuentra próximo al observador. Al envejecer, el ser humano va perdiendo esta capacidad de ajustar el

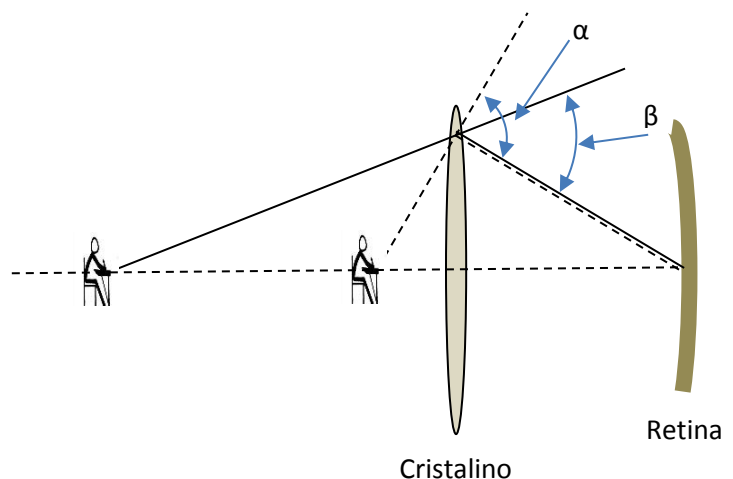


Figura 2. La cantidad de refracción requerida, depende de la distancia entre el objeto y el observador.

enfoque, deficiencia conocida como presbicia o vista cansada. Esta incapacidad comienza a manifestarse con dificultades para engrosar el cristalino que dificulta la observación de objetos próximos.

Las llamadas “*células fotorreceptoras*” o “*células sensoriales*” de la retina, reaccionan de forma distinta a la luz y los colores y son de dos tipos: bastones y conos. Los “*bastones*” se activan en la oscuridad, y sólo permiten distinguir el negro, el blanco y los distintos grises, en razón de que no discriminan colores. Los conos, en cambio funcionan de día y en ambientes iluminados, hacen posible la visión de los colores.

En el ojo humano hay tres tipos de conos, sensibles a luz de color azul, rojo y verde respectivamente. Cada uno de ellos absorbe la radiación de una determinada porción del espectro gracias a que poseen unos pigmentos llamados opsinas. Las opsinas son unas moléculas que están formadas por una proteína y un derivado de la vitamina A:

- La eritropsina tiene mayor sensibilidad para las longitudes de onda largas de alrededor de 650 nm (luz roja – conos L),
- la cloropsina para longitudes de onda medias de unos 530 nm (luz verde – conos M) y por último
- la cianopsina con mayor sensibilidad para las longitudes de onda pequeñas de unos 430 nm (luz azul – conos K).

Mediante las diferentes intensidades de las señales producidas por los 3 tipos de conos, podemos distinguir todos los colores que forman el espectro de luz visible.

Los conos están concentrados en el centro de la retina, mientras que los bastones abundan más en la periferia de la misma. Cada cono está conectado individualmente con el centro visual del cerebro y cada ojo humano dispone, aproximadamente, de 7 millones de conos y 125 millones de bastones. Esta densidad de células receptoras, nos permite distinguir a una distancia de 10 metros dos puntos luminosos separados por alrededor de 4 milímetros.

Cada “cono” recepta información de un punto de la escena y la envía al cerebro. De ese modo, “pinta” un punto en la matriz de puntos que será nuestra imagen. Nosotros no vemos los puntos, vemos una imagen continua. La información de dos conos pegados (que provienen de dos puntos), si es la misma en cada cono, no se pueden distinguir los puntos de los cuales proceden; si no recoge información de lo que ocurre entre los puntos (no hay conos para recogerla) los dos puntos se ven como una mancha alargada.

Veamos una cuenta sencilla que nos permita conocer la distancia entre unidades receptoras. Nos concentraremos en los conos dado que nos interesa ver en colores. Según se indicó en párrafos anteriores, resulta necesario para distinguir todos los colores de las señales producidas por los 3 tipos de conos, por lo que consideraremos a cada unidad receptora constituida por 3 conos. En consecuencia dispondremos para la recepción de la imagen de

$$n^{\circ} \text{ de unidades receptoras} = \frac{7.000.000}{3}$$

Resultando 2.333.333 unidades receptoras.

En la figura 3 hemos supuesto el conjunto de unidades receptoras con una distribución uniforme y cubriendo una superficie cuadrada. En realidad, los dos supuestos no se deben cumplir en la práctica: es probable que la densidad de puntos disminuya hacia los laterales a partir del centro, y sería mucho más probable que la superficie cubierta tuviese una forma circular. De cualquier manera, como sólo estamos intentado llevar a cabo un análisis cualitativo que nos proporcione algún dato sobre la separación de las unidades receptoras, nos parece interesante realizarlo y luego comparar los resultados con algunos datos que si se conocen del ojo humano, y que finalmente nos permitirán

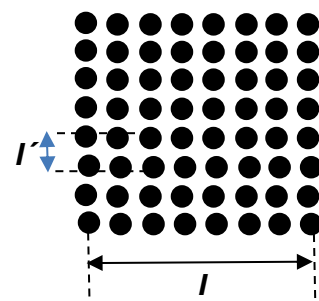


Figura 3. Modelo sencillo de distribución de unidades receptoras.



inferir sobre algunos aspectos de la visión, especialmente aquellos que se refieren a la agudeza visual del ojo.

Como explicaremos más adelante, lo que resulta de interés es conocer la distancia entre unidades receptoras, y para calcularla consideramos que el número "n" de unidades receptoras en una línea horizontal o vertical, guarda con "l" y con "l'", la siguiente relación

$$l = (n - 1).l'$$

En realidad como el valor de "n" según los cálculos que siguen vemos que resulta muy grande, podemos despreciar el 1 frente a la "n", por lo que resulta  $l = n.l'$ .

La superficie que contiene la totalidad de unidades receptoras es  $A=l.l = l^2$ . Reemplazando por la expresión anterior, se obtiene

$$A = (n.l') \times (n.l') = n^2.(l')^2$$

Suponiendo que la retina tiene una superficie "A" cubierta de unidades receptoras de alrededor de  $49\text{mm}^2$ , el valor más probable según la bibliografía consultada, resulta para "l'"

$$l' = \sqrt{\frac{A}{n^2}}$$

Operando y considerando que  $n^2=2.333.333$  unidades receptoras, resulta

$$l' = \sqrt{\frac{0,000\ 049}{2.333.333}} = 4,58 \times 10^{-6} \text{m}$$

Valor que resulta aproximadamente la mitad de la distancia entre las imágenes que producen en nuestra retina dos fuentes de luz, que subtienden un ángulo igual a la agudeza visual. Estos resultados parecen indicar que dos imágenes han de estar separadas como mínimo por un cono no excitado, para poder ser resueltas. Volveremos sobre este punto, más adelante.

NOTA: con el propósito de fundamentar algunas de las simplificaciones que se hicieron en el ejemplo anterior, agregamos información acerca de la fovea, área de la retina donde se enfocan los rayos luminosos y que se encuentra especialmente capacitada para la visión del color.

La fovea posee pocos bastones y muchos conos, responsables de la percepción de colores. Los conos-M, sensibles a la luz verde y los conos-L sensibles a la luz roja, se disponen en la fovea formando un mosaico regular. Dependiendo de la especie, pueden encontrarse también presentes los conos-K, sensibles a la luz azul. En la región más interna, en la foveola (que mide en los seres humanos aproximadamente 0,33 mm de diámetro) es posible encontrar solamente conos particularmente delgados del tipo M y L.

Dirigir la vista hacia un objeto supone colocar su imagen óptica en la fovea. Esta es la razón por la que resulta particularmente difícil, por ejemplo, leer un texto en la penumbra. La escasez de bastones en la fovea tiene como consecuencia una degradación notable de la capacidad de discernir estructuras finas bajo malas condiciones de luminosidad.

Bibliografía autorizada (MacDonald y Burns) señalan que la distancia entre unidades receptoras de conos en el centro de la fovea es de  $5 \times 10^{-6} \text{m}$ . Este valor está de acuerdo con el calculado y nos estarían indicando que los 7.000.000 de conos, agrupados en 2.333.333 unidades receptoras, están con mayor densidad poblando la zona central de la fovea, tal vez sólo unos cuantos  $\text{mm}^2$ , pero que están distribuidos en una zona muy superior a la que nosotros consideramos en el cálculo. Estos dos aspectos se compensan y dan valor a las simplificaciones realizadas.

La visión escotópica, provocada fundamentalmente por los bastones y asociada a la visión nocturna, alcanza el valor más alto a unos 20° de la fovea, donde la densidad de bastones es máxima. El valor más elevado para la visión fotópica, provocada fundamentalmente por los conos y asociada a la visión diurna, es en la fovea, donde la densidad de conos es mayor.

Con los bastones la situación es bastante más complicada. Son muchísimos (125.000.000) y pensados como unidades sensibles a la luz en general pero no al color, debieran traducirse en una agudeza visual de la visión escotópica, muy pequeña. En realidad la observación nocturna es complicada y la agudeza visual no sólo que no mejora sino que disminuye. Puede ocurrir que los bastones se agrupen en manojos y que la información sobre un punto la proporcione el manajo. En ese caso podríamos pensar en una escala de grises y la necesidad de un número de sensores que a través de un determinado código, puede transportar la información.

### 5. AGUDEZA VISUAL (distancia mínima que puede resolver el ojo humano)

Se define la agudeza visual del ojo, como el menor ángulo “ $\theta$ ” que subtenden los rayos que provienen de dos fuentes luminosas, que equidistan del ojo, y que pueden ser distinguidas, por éste, como dos objetos independientes. De la definición se deduce que, si se hallan más próximos (disminuye “ $d$ ”) manteniendo la distancia “ $L$ ” entre las fuentes y el ojo, o si las fuentes se alejan del ojo (aumento de “ $L$ ”) manteniendo constante la distancia “ $d$ ” entre ellas, y, dado que en ambos casos el ángulo “ $\theta$ ” disminuye, el ojo verá la luz como si procediese de un solo punto. Figura 4.

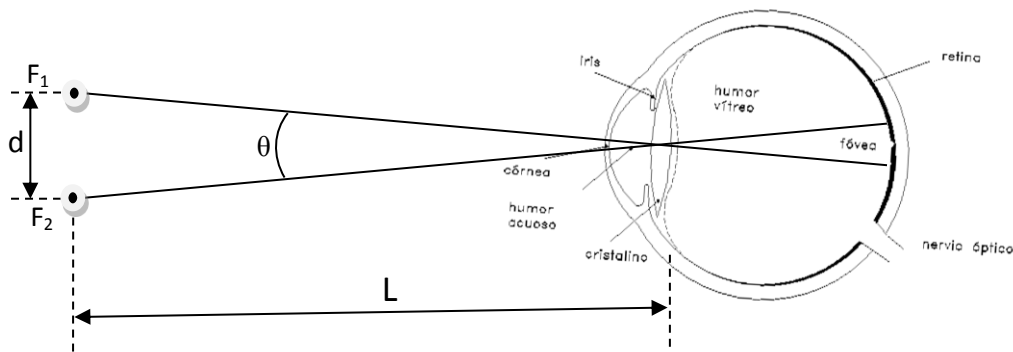


Figura 4. El ángulo  $\theta$  “mide” la agudeza visual.

En realidad en el dibujo el ángulo  $\theta$  está muy exagerado. Experimentalmente se mide como promedio para la agudeza visual de nuestra especie, un ángulo de valor

$$\theta \cong 5 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

Para tener una idea este ángulo equivale a  $2,87 \times 10^{-4}^\circ$ . Algo así como 1s.

Para estas cuentas es conveniente utilizar la medida del ángulo en radianes, dado que si multiplicamos el valor de un ángulo en radianes por el radio, obtenemos el valor del arco de circunferencia “ $S$ ”. Esto surge de la definición de radián, que expresa que un ángulo “ $\theta$ ” medido en radianes es el cociente entre el arco “ $S$ ” y el radio “ $R$ ”, indicados en la figura 5.

$$\theta = \frac{S}{R} \text{ (ángulo medido en radianes)}$$

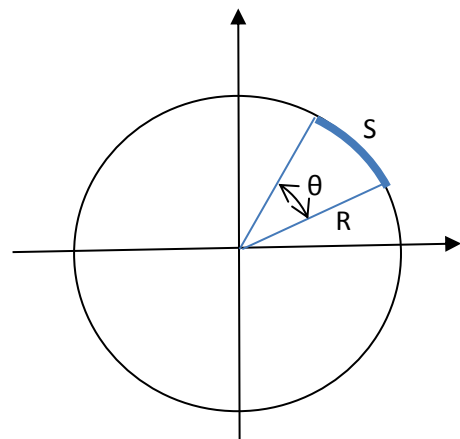


Figura 5. El cociente entre “ $S$ ” y “ $R$ ”, define al ángulo  $\theta$  en radianes.

De donde se deduce que  $S = \theta \cdot R$ . Ahora como para

ángulos pequeños la cuerda tiene aproximadamente el mismo valor del arco, entre las distancias “d” y “L” y el ángulo “θ”, podemos escribir la relación  $d = \theta \cdot L$ , expresión útil para calcular nuestra agudeza visual “θ”, midiendo sólo distancias.

De la expresión  $d = \theta \cdot L$  se deduce que a menor distancia “L” menor “d”, es decir mayor resolución. Ahora bien, uno naturalmente cuando desea ver detalles de un cuerpo, lo acerca a su ojo. Pero bien, ese acercamiento no puede superar una mínima distancia, ya a partir de distancias menores no es posible enfocar la escena (el cristalino ha engrosado su parte central lo más que ha podido) y la imagen se forma detrás de la retina. La mínima distancia a la cual se puede enfocar un objeto, se denomina “distancia mínima de visión distinta” y se la simboliza con la letra griega gamma “γ”.

La mayor resolución “d” la lograremos a la “distancia mínima de visión distinta”, que para una persona joven y normal, resulta de un valor  $\gamma = 0,25 \text{ m}$ .

$$d' = 0,25 \text{ m} \times (5 \times 10^{-4} \text{ rad})$$

$$d' = 1,25 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$d' \cong 1 \times 10^{-4} \text{ m} = 0,1 \text{ mm}$$

Es decir, que un joven normal, puede ver a una distancia de 25cm, dos puntos separados por una distancia de 0,1mm.

## 6. ACTIVIDADES

**Experimento nº 1.** La capacidad del ojo humano para ver objetos pequeños a una cierta distancia del ojo, tiene sus límites. El primer experimento consiste en analizar muestras que consistirán en distintos tipos de tela (preferiblemente sedas, tul o telas de trama fina), hilos delgados, pelos, y hojas impresas (folletos, afiches recortes etc.). Debes identificar con un número cada una de las muestras para luego volver a analizarlas y recordar el resultado de tu primer análisis. El análisis que debes realizar se relaciona con, colocada la muestra por ejemplo a 1m (un metro) del ojo, señalar si la escena que observas es continua o discreta. Anota en tu cuaderno el resultado de esta tarea (número de la muestra y resultado del análisis) para luego cotejarlos con nuevas observaciones. AYUDA: una muestra será discreta cuando alcanzamos a ver puntitos, hilos, o detalles muy pequeños de la misma. Caso contrario será continua.

**Experimento nº 2.** Con las muestras que trabajaste en el experimento anterior, realiza la misma observación y con el mismo propósito, pero ahora coloca las muestras a una distancia de 0,50 m del ojo. Realiza nuevamente el experimento colocando ahora las muestras a una distancia de 0,25cm del ojo. En todos los casos, y siempre anotando en tu cuaderno y dejando en claro el número de la muestra, indica si la escena que observas es continua o discreta.

**Experimento nº 3.** Ahora acerca cada una de las muestras, lo más que puedas a tu ojo, siempre que puedas enfocar, y por un lado examínala (continua o discreta) como en casos anteriores, y por otro analiza si enfocar a tan corta distancia, te ha producido cansancio en la vista. Mide con una cinta métrica, la distancia mínima de visión distinta “γ”.

**Experimento nº 4.** En este paso debes analizar lo que ocurre con los puntitos que muestra la figura 6. Puedes replicar este dibujo (matriz de puntos), con puntos más pequeños o más grandes, ubicados en una superficie como se muestra en la figura o en línea. También podrían ser sólo dos puntos, e incluso, podrían ser en cualquiera de los casos, puntitos blancos sobre un fondo negro.

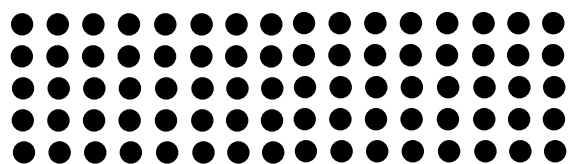


Figura 6. Muestra de puntos (discreta)

En el caso de que la muestra contenga más de dos puntitos, es conveniente que el tamaño de los mismos y la distancia entre ellos, se mantenga en todo el conjunto. Finalmente, es también conveniente, que las muestras de puntos se realicen en hojas que no contengan otra impresión más que la muestra a analizar.

La práctica consiste en que te acerques a la hoja con puntitos, que de alguna manera se ha fijado a la pared, a partir por ejemplo de una distancia de 50m (depende del lugar en el cual estés trabajando), y que midas a qué distancia comienzas a distinguir un punto del punto contiguo y luego ya sobre la hoja, midas la distancia entre los puntos.

Este experimento podría haberse realizado con el observador alejándose de la hoja con puntitos para detectar la distancia a la cual comienzan a dejarse de ver los puntos separados. Este experimento no es conveniente respecto del anterior, en razón de que luego de haber observado un determinado puntito, o dos puntitos separados, es probable que creamos seguir viéndolos, aun cuando ya no lo veamos, por un fenómeno de percepción virtual.

**Experimento nº 5.** En este experimento utilizaremos para observar fuentes de luz más o menos puntuales (linternas de un LED o lapiceras linternas), que deben colocarse bien próximas y sujetadas con cinta de enmascarar a una madera. El experimento es parecido al anterior, en el sentido que debemos acercarnos o alejarnos de las fuentes de luz, con el propósito de intentar detectar cambios en lo que vemos. En particular tenemos que estar atentos a darnos cuenta en qué momento nos parece distinguir que dónde veíamos una mancha luminosa, aparecen dos o más fuentes de luz. También y como en el caso anterior, debemos tomar nota de la distancia a la cual se perciben cambios en las fuentes observadas y las distancias entre las fuentes.

**Experimento nº 6.** Provistos de distintas lupas (lentes convergentes de distancia focal pequeña, menor a 5 cm), analiza nuevamente las muestras que analizaste en el experimento 1. Responde las mismas preguntas que se hicieron en aquella oportunidad y compara las respuestas.

**Experimento nº 7.** Puedes opinar sobre ¿qué tipo de imagen es la que observas en un TV? ¿y el modo como registra la imagen una cámara fotográfica digital? ¿y el modo cómo registra la imagen una cámara fotográfica con película tradicional? Y ¿qué observarías al acercarte a un TV? Y para el pequeño comedor de tu casa, ¿qué te comprarías, un TV de 21" o un TV de 40"? En próximos apartados, examinaremos otros detalles de la formación de imágenes, que te permitirán responder estas preguntas.

## 7. Referencias Bibliográficas

- Cromer, A., 1978. *Física para las Ciencias de la Vida*. Editorial Reverté. Páginas: 541.  
Guía de Estudio de la Cátedra de Física I, para alumnos de las carreras de Ciencias Biológicas. Edición del CEICIN.
- Hecht, E., 1998. *Física y (Álgebra y Trigonometría), Tomo I*. Editorial Thomson. México. Páginas: 735.
- Kane, J. y Sternheim, M., 1998. *Física*. Editorial Reverté, Segunda Edición. Páginas: 795.
- MacDonald, S. y Burns, D., 1975. *Física para las Ciencias de la Vida y de la Salud*. Editorial Fondo Educativo Interamericano. Páginas, 589.
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Imagen\\_digital](http://es.wikipedia.org/wiki/Imagen_digital)  
<http://platea.pntic.mec.es/~lgonzale/tic/imagen/conceptos.html>  
[http://arantxa.ii.uam.es/~eloy/html/doctorado/doct\\_9.pdf](http://arantxa.ii.uam.es/~eloy/html/doctorado/doct_9.pdf)  
<https://www.library.cornell.edu/preservation/tutorial-spanish/intro/intro-01.html>  
[http://www.ite.educacion.es/formacion/materiales/86/cd/m2/qu\\_es\\_la\\_imagen\\_digital.html](http://www.ite.educacion.es/formacion/materiales/86/cd/m2/qu_es_la_imagen_digital.html)