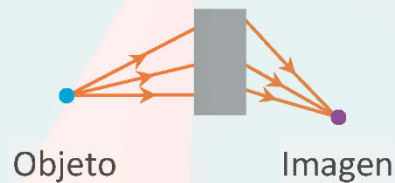


1. INTRODUCCIÓN

La **Óptica Geométrica** estudia la trayectoria de la luz visible cuando experimenta reflexiones (espejos) y refracciones (lentes) en la superficie de separación entre dos medios, sin considerar la difracción ni la interferencia, y utilizando el modelo de **Rayo** de luz, que es una línea perpendicular a los frentes de onda.

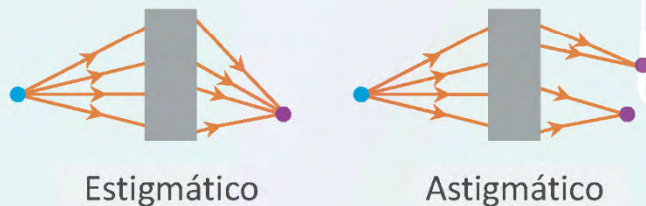
Los rayos son reversibles en su propagación: se propagan de la misma forma y por el mismo camino en un sentido que en otro.

Cuando dos, o más, rayos de luz que parten de un mismo punto se concentran posteriormente en otro distinto se dice que el segundo es la **Imagen** del primero.



Un **Sistema Óptico** es un conjunto de medios materiales, separados por superficies de cualquier naturaleza:

- Si todas las superficies de separación entre los medios tienen un eje de simetría común se dice que el sistema está **Centrado**.
- Si se cumple que todos los rayos que parten de un punto y, tras atravesar un sistema óptico, convergen en un mismo punto se dice que el sistema es **Estigmático**, y **Astigmático** en caso contrario.



Nosotros estudiaremos sistemas centrados y estigmáticos, que son los más sencillos.

Aunque los objetos reales son tridimensionales (con longitud, anchura y altura), nosotros trabajaremos exclusivamente con objetos unidimensionales (solamente con altura). Los representaremos como una flecha delgada perpendicular al eje del sistema óptico. Y con su pie sobre el.

Su imagen será la unión de las imágenes de todos sus puntos y resultará también unidimensional, paralela al objeto y con su pie sobre el eje del sistema óptico.



Las imágenes que se forman tras atravesar la luz un Sistema Estigmático se pueden clasificar según tres criterios:

Según su Orientación (respecto a la del objeto)

- Imagen **Derecha**
- Imagen **Invertida**

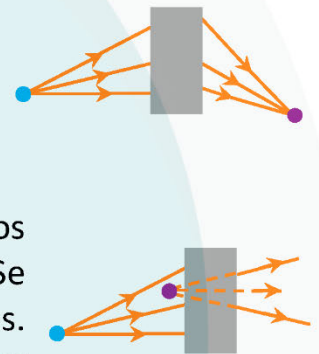


Según su Tamaño (respecto al tamaño del objeto):

- Imagen **Mayor o Aumentada** - Imagen **Menor o Reducida** - Imagen de **Igual tamaño**

Según su Naturaleza:

- Imágenes **Reales**: cuando, tras pasar por el sistema óptico, los rayos convergen. Se forman en la intersección de los rayos. La imagen debe proyectarse sobre un plano (pantalla, película fotográfica, retina, etc.) para ser visible.
- Imágenes **Virtuales**: cuando, tras pasar por el sistema óptico, los rayos divergen de manera que parecen provenir desde un origen diferente. Se forman por la intersección de las prolongaciones de rayos divergentes. La imagen no se puede proyectar, pero es visible por un observador (espejo plano).



Para estudiar la Óptica Geométrica se debe seguir el **Convenio de Signos** de las normas DIN:

- En todos los esquemas la luz siempre se propaga de izquierda a derecha.
- Para la imagen se usan las mismas variables que para el objeto, pero añadiendo el símbolo "prima" ' (y, y')
- Se usan ejes cartesianos:

Eje Y positivo hacia arriba

Eje X positivo hacia la derecha (será el eje de simetría del sistema)

O Vértice del Sistema Óptico



2. ESPEJOS PLANOS

Los **Espejos** son superficies reflectantes opacas. Nosotros estudiaremos solamente los espejos planos.

2.1. FORMACIÓN DE IMÁGENES EN ESPEJOS PLANOS

Para encontrar la imagen de un punto que forma un espejo plano basta trazar dos rayos:

- Rayo perpendicular al espejo, que regresa por el mismo camino que llega.
- Rayo oblicuo que se refleja con el mismo ángulo que incide.

Para formar la imagen de un objeto, a nosotros, nos basta con la imagen de un único punto (la punta de la flecha, para la que basta seguir el camino de dos rayos que pasen por ella) y trazar la paralela al objeto hasta su corte con el eje X.

O: vértice del espejo (origen del sistema de coordenadas)

x: distancia objeto **y:** tamaño objeto

(x, y) son las coordenadas de la punta de la flecha objeto, referidas al punto O.

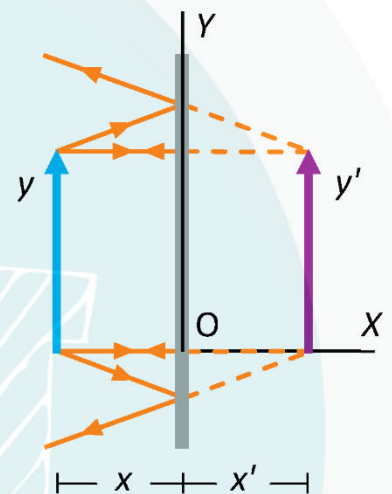
x': distancia imagen **y':** tamaño imagen

(x', y') son las coordenadas de la punta de la flecha imagen, referidas al punto O.

La imagen siempre es:

Virtual (x' es positiva) Derecha (signo y' = signo y) Del mismo tamaño ($|y'| = |y|$)

Y está situada en una posición simétrica al objeto ($x' = -x$)



2.2. AUMENTO LATERAL

Es un parámetro que nos informa a la vez de la orientación y del tamaño de la imagen. Se usa en toda la óptica geométrica, no solo en los espejos planos.

$$A = \frac{y'}{y}$$

Si A es	$\begin{cases} \text{Positivo} \\ \text{Negativo} \end{cases}$	La imagen es	$\begin{cases} \text{Derecha} \\ \text{Invertida} \end{cases}$	Si $ A $ es	$\begin{cases} >1 \\ =1 \\ <1 \end{cases}$	La imagen es	$\begin{cases} \text{Mayor} \\ \text{Igual} \\ \text{Menor} \end{cases}$
-----------	--	--------------	--	-------------	--	--------------	--

En los espejos planos $A = +1$ siempre.



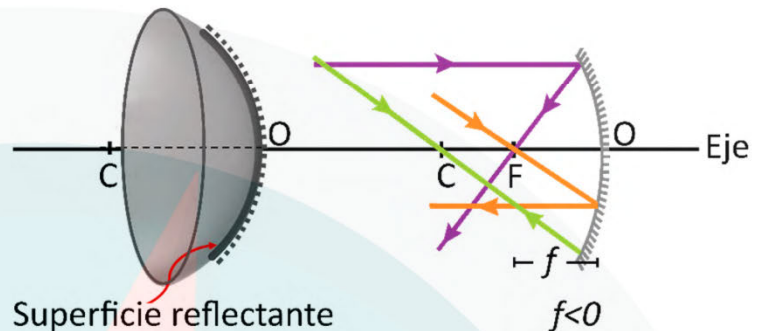
3. ESPEJOS ESFÉRICOS

Son espejos cuya superficie reflectante es de geometría esférica.

3.1. TIPOS DE ESPEJOS ESFÉRICOS

ESPEJOS CÓNCAVOS

La superficie reflectante es la cara interna



- **O, vértice del espejo:** origen de nuestro sistema de referencia.

- **C, centro de curvatura del espejo:** es el centro de la esfera. Cualquier rayo que llegue al espejo pasando por C tiene incidencia normal y, por tanto, regresa por donde vino. Se encuentra en el punto de coordenadas $(R, 0)$, con $R < 0$.

Se llama **radio de curvatura** del espejo a $|R|$. Es el radio de la esfera.

- **F, foco del espejo:** punto del eje, tal que cualquier rayo que llegue a al espejo paralelo al eje, tras reflejarse pasará por él, y viceversa (cualquier rayo que incida en el espejo tras pasar por él emergerá paralelo al eje). Se encuentra en el punto de coordenadas $(f, 0)$, con $f < 0$.

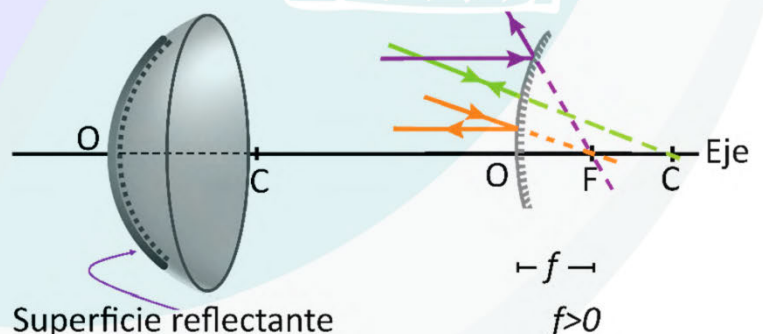
Se llama distancia focal de la lente a $|f|$.

En los espejos esféricos, F es el punto medio entre C y O $\rightarrow$

$$f = \frac{R}{2}$$

ESPEJOS CONVEXOS

La superficie reflectante es la cara externa



Cualquier rayo que llegue al espejo en dirección a C regresará por donde vino. Cualquier rayo que llegue al espejo paralelo al eje emergerá de manera que parecerá provenir del F. Cualquier rayo que llegue al espejo en dirección al F emergerá paralelo al eje.

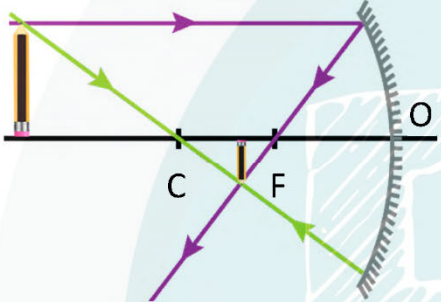
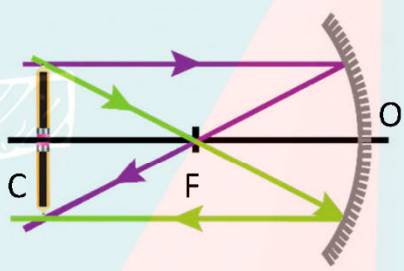
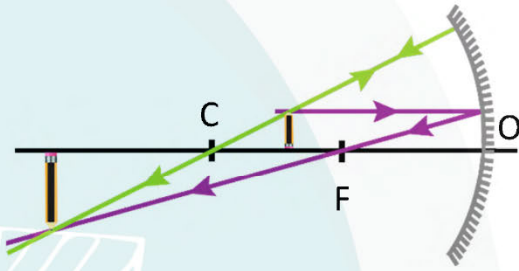
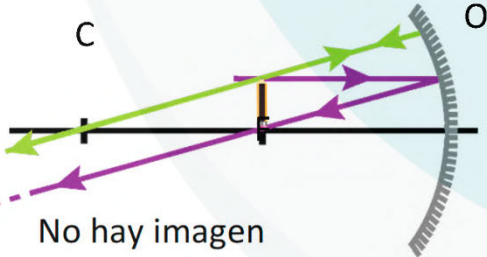
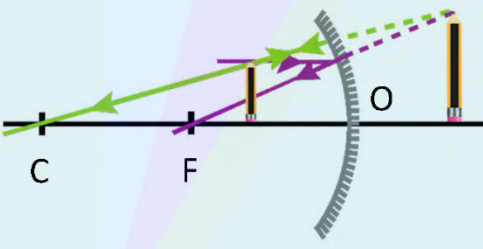
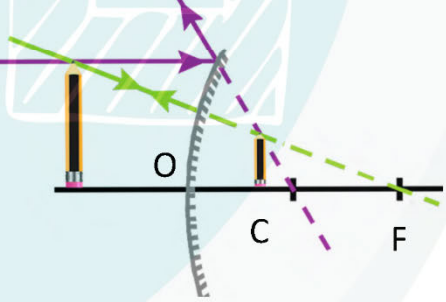


3.2. FORMACIÓN DE IMÁGENES EN ESPEJOS ESFÉRICOS

Para encontrar la imagen de un punto con un espejo esférico basta trazar dos de los tres rayos siguientes (es recomendable usar los dos primeros):

- Rayo que pasa por C y, tras incidir perpendicular al espejo regresa por el mismo camino.
- Rayo que incide paralelo al eje y, tras reflejarse el propio rayo (si el espejo es cóncavo) o su prolongación (si es convexo) pasa por F.
- Rayo que pasa él (si el espejo es cóncavo) o su prolongación (si es convexo) por F, y tras reflejarse emerge paralelo al eje. Este NO sirve cuando el objeto está en el foco.

Con los cóncavos hay cinco posibilidades, y con los convexos solamente una:

Cóncavo con objeto más lejos que el C  Imagen Real, Invertida y Menor	Cóncavo con objeto en el C  Imagen Real, Invertida e Igual tamaño	Cóncavo con objeto entre el C y el F  Imagen Real, Invertida y Mayor
Cóncavo con objeto en el F  No hay imagen	Cóncavo con objeto más cerca que el F  Imagen Virtual, Derecha y Mayor (ESPEJOS DE MAQUILLAJE, TELESCOPIOS REFLECTORES)	Convexo con objeto en cualquier posición  Imagen Virtual, Derecha y Menor (ESPEJOS RETROVISORES ESPEJOS DE VIGILANCIA)



Nota que:

- Las tres imágenes reales ($x' < 0$) son invertidas (signo $y' = -$ signo y) $\rightarrow A$ es negativo.
- Las dos imágenes virtuales ($x' > 0$) son derechas (signo $y' =$ signo y) $\rightarrow A$ es positivo.

Los espejos esféricos siempre cumplen para el Aumento:

$$A = \frac{y'}{y} = -\frac{x'}{x}$$

Y también cumplen la Ecuación de los Espejos esféricos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x'} + \frac{1}{x}$$

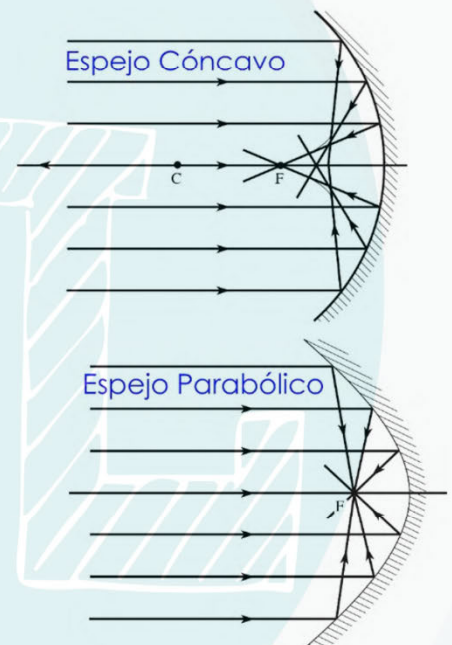
4. ABERRACIONES

Aunque no las consideramos, existen dos causas que conllevan una degradación de la imagen, a las que llamamos aberraciones:

4.1. ABERRACIÓN ESFÉRICA

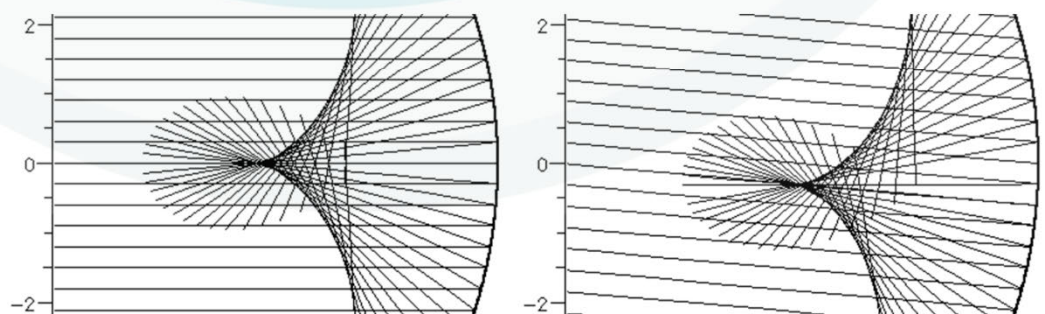
En los espejos esféricos a medida que el haz incidente se aleja del eje óptico el foco se formará en un punto más cercano al espejo, este efecto será más evidente cuando menor sea el radio de curvatura del espejo. El resultado es que el foco no se forma en un punto sino en una región: **Aberración Esférica**.

Una solución inmediata es utilizar un espejo parabólico en lugar de uno esférico, ya que en este caso todos los haces incidentes se focalizarán en un punto único, el foco de la parábola.



4.2. COMA

Cuando los rayos no inciden de forma paraxial (prácticamente paralelos al eje de la parábola) tampoco hay un foco claro. Esto da origen a la aberración denominada **Coma**, que aparece tanto en diseños esféricos como parabólicos. El coma depende del ángulo: simulaciones con incidencia paraxial (paralelos al eje óptico) y con incidencia 5° fuera del eje para un espejo esférico cóncavo.

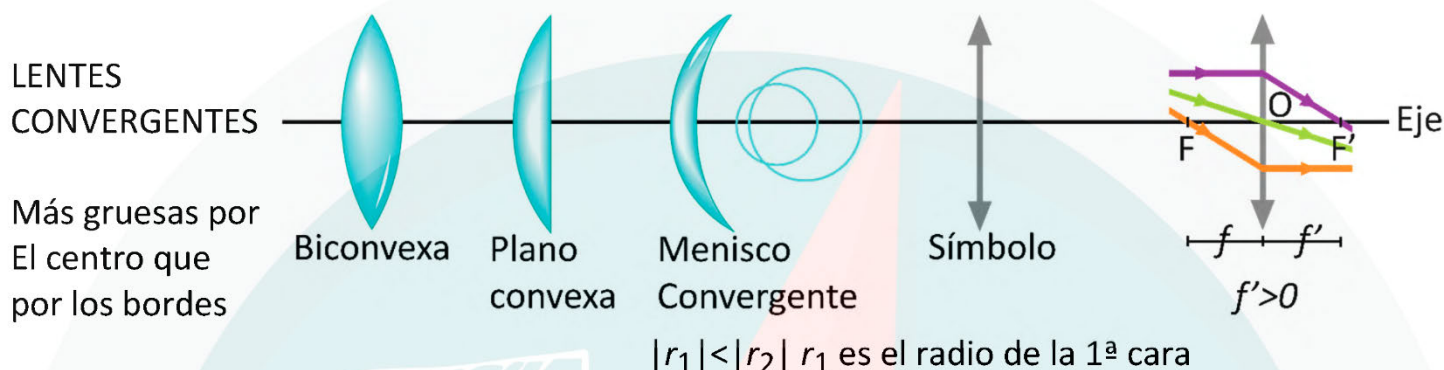


5. LENTES DELGADAS

Llamamos **Lente** a un objeto de material transparente limitado por dos superficies esféricas, o por una esférica y otra plana. Cuando los rayos de luz atraviesan una lente sufren dos refracciones: una al entrar y otra al salir.

Si su espesor, en el eje óptico, es despreciable frente a los radios de las caras de la lente decimos que es una lente **Delgada**.

5.1. TIPOS DE LENTES DELGADAS



- **O, centro de la lente:** origen de nuestro sistema de referencia. Cualquier rayo que pase por el centro de la lente se desviará tan poco que podemos despreciar su desviación.

- **F', foco imagen:** punto del eje, tal que cualquier rayo que llegue a la lente paralelo al eje, emergerá pasando por él. Se encuentra en el punto de coordenadas $(f', 0)$, con $f' > 0$.

- **F, foco objeto:** punto del eje, tal que cualquier rayo que llegue a la lente tras pasar por él, emergerá paralelo al eje. Se encuentra en el punto de coordenadas $(f, 0)$, con $f < 0$.

Los dos focos ocupan posiciones simétricas respecto al centro de la lente →

$$f = -f'$$

Se llama **distancia focal** de la lente a $|f'| = |f|$.



Cualquier rayo que llegue a la lente paralelo al eje emergerá de manera que parecerá provenir del foco imagen **F'**, situado a la izquierda de la lente. Cualquier rayo que llegue a la lente en dirección al foco objeto, **F**, situado a la derecha de la lente, saldrá paralelo al eje.

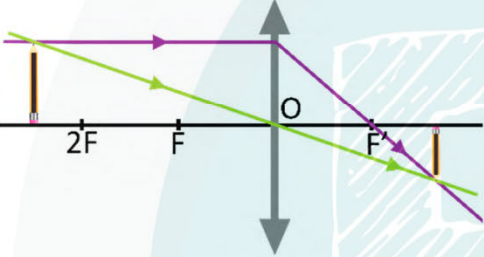
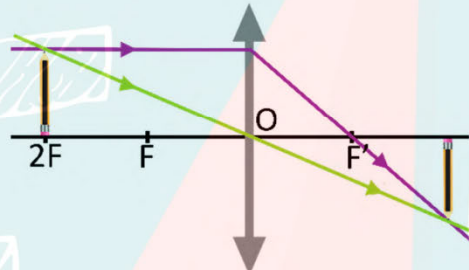
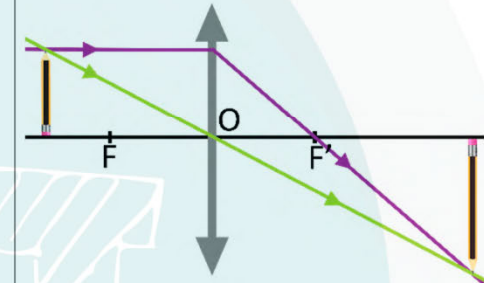
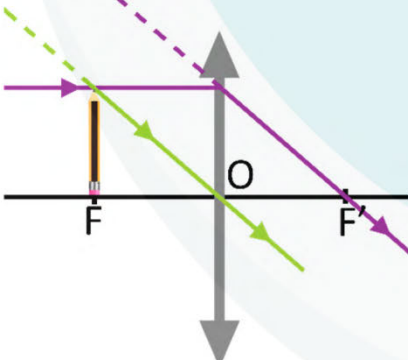
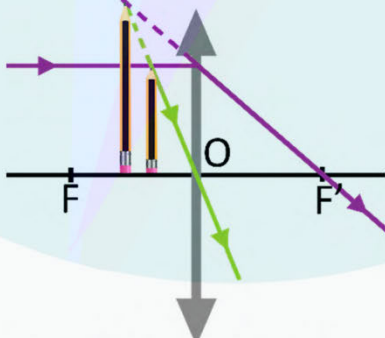
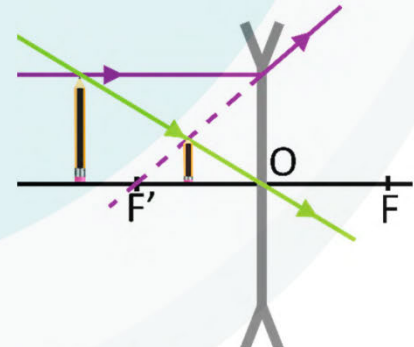


5.2. FORMACIÓN DE IMÁGENES EN LENTES DELGADAS

Para encontrar la imagen de un punto con una lente delgada basta trazar dos de los tres rayos siguientes (es recomendable usar los dos primeros):

- Rayo que pasa por el centro de la lente (O) y no se desvía.
- Rayo que incide paralelo al eje y, tras refractarse el propio rayo (si la lente es convergente) o su prolongación (si es divergente) pasan por F' .
- Rayo que pasa él (si la lente es convergente) o su prolongación (si es divergente) por F , y tras refractarse emerge paralelo al eje. Este NO sirve cuando el objeto está en el foco.

Con las convergentes hay cinco posibilidades, y con las divergentes solamente una (son los mismos casos que con espejos, pero con las imágenes al otro lado):

Convergente con objeto más lejos que $2F$  Imagen Real, Invertida y Menor (OJO, CÁMARA FOTOGRÁFICA)	Convergente con objeto en $2F$  Imagen Real, Invertida e Igual tamaño	Convergente con objeto entre $2F$ y el F  Imagen Real, Invertida y Mayor (PROYECTOR DIAPOSITIVAS)
Convergente con objeto en el F  No hay imagen	Convergente con objeto más cerca que el F  Imagen Virtual, Derecha y Mayor (LUPA, MICROSCOPIO SIMPLE)	Divergente con objeto en cualquier posición  Imagen Virtual, Derecha y Menor



Las lentes delgadas siempre cumplen para el Aumento:

$$A = \frac{y'}{y} = \frac{x'}{x}$$

Y también cumplen la Ecuación de las Lentes Delgadas:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{x'} - \frac{1}{x}$$

Además, cumplen la Ecuación del Fabricante de Lentes delgadas:

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

Se supone que la lente está en el aire.

n : índice de refracción de la lente

r_1 y r_2 : radios de sus caras izquierda y derecha. Positivos si el centro de la lente está a su derecha, y negativos si está a su izquierda. Si la cara es plana su radio de curvatura tiende a infinito.

Se define la **Potencia** de una lente como:

$$P = \frac{1}{f'}$$

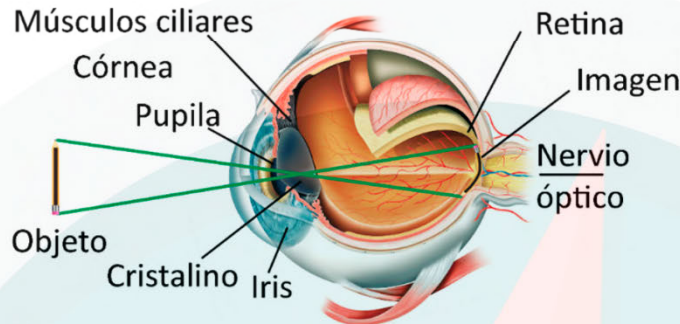
(D) Dioptría en S.I.

$$1 \text{ D} = 1 \text{ m}^{-1}$$

En las lentes Convergentes es positiva, $P > 0$, y en las Divergentes es negativa, $P < 0$.



Aunque es mucho más complicado podemos pensar en el ojo como una lente convergente, el **Cristalino**, de potencia variable que, para que la visión sea buena, debe formar las imágenes en un plano perpendicular al eje, justo en la **Retina**, que corta al eje en un punto concreto, pues si se forma delante o detrás de dicho punto la visión resulta borrosa. Para que nuestro cerebro la interprete bien la imagen debe ser real e invertida.



OV1. ACOMODACIÓN DEL OJO

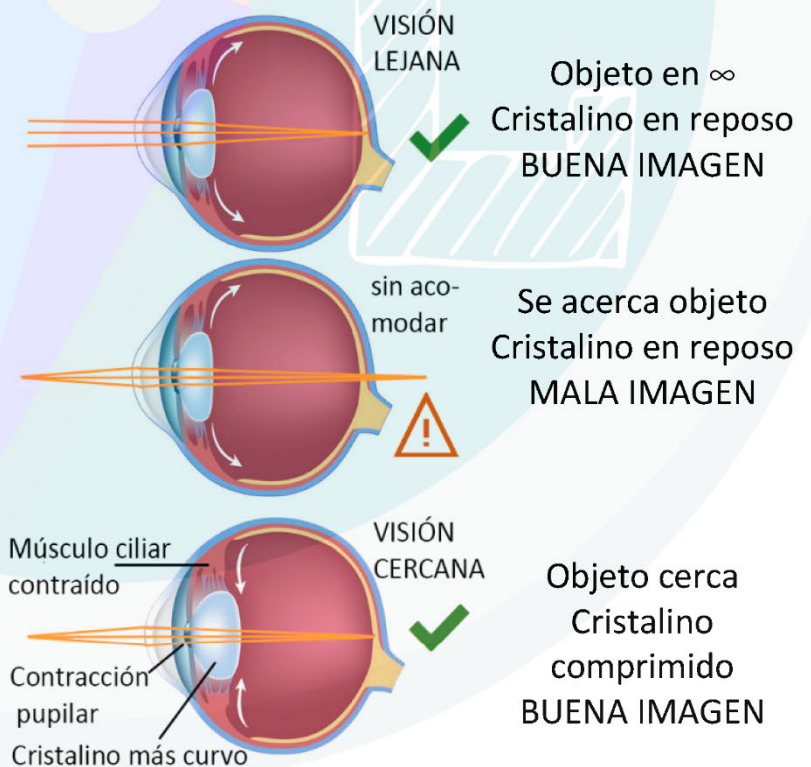
El cristalino cumple la ecuación de las lentes $\frac{1}{f'} = \frac{1}{x'} - \frac{1}{x}$, y como, para un ojo dado, la retina se encuentra a una distancia concreta del cristalino si queremos que la imagen se forme allí x' debe ser fija. Por tanto, para obtener buenas imágenes de objetos situados a diferentes distancias, es decir distintas x , es imprescindible que la distancia focal f' sea variable.

Esto es posible gracias a unos músculos llamados **Ciliares** que pueden comprimir al cristalino:

Cuando el objeto que se pretende ver se encuentra en el infinito los músculos están relajados y el cristalino está en reposo.

Si el objeto se va acercando los músculos ciliares comprimen el cristalino aumentando su espesor (aumentando su potencia), reduciendo su distancia focal para que la imagen se siga formando en la retina.

Este proceso se denomina **Acomodación** del ojo, y está limitado por la elasticidad del cristalino.

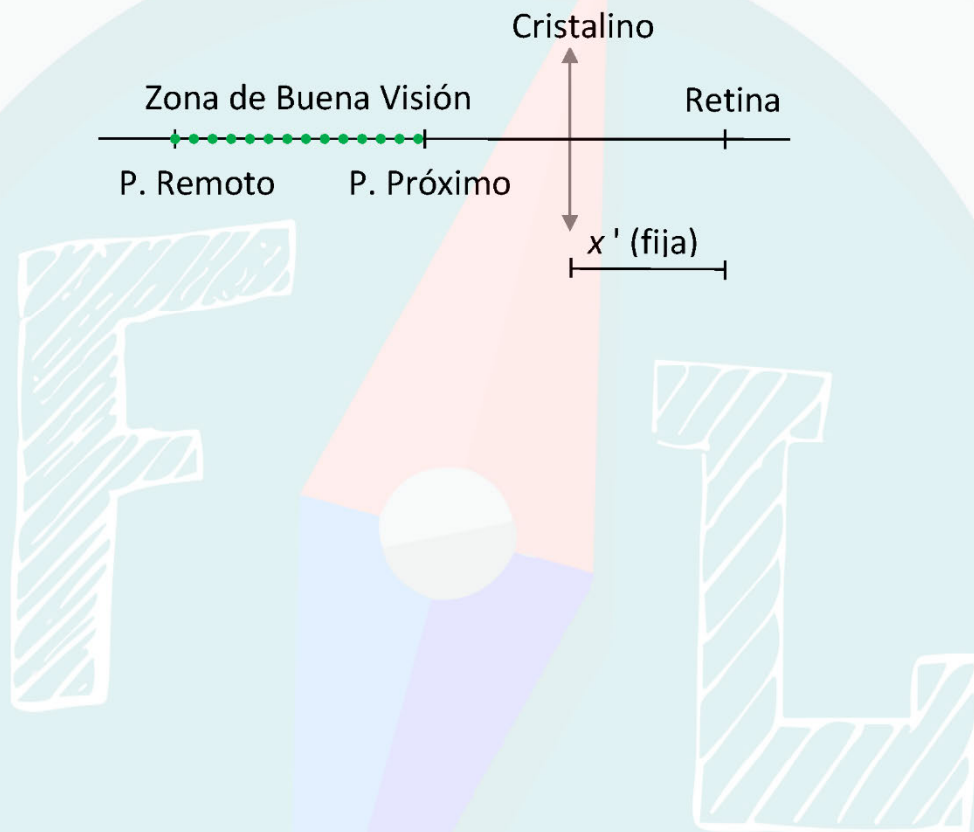


Punto próximo y punto remoto

Son los dos puntos que delimitan la zona de buena visión del ojo.

Punto Próximo: es el punto más cercano al ojo en el que puede colocarse un objeto y ser visto con nitidez. La distancia del cristalino a dicho punto se llama Distancia Mínima de Visión Distinta, y en un ojo humano adulto es de unos 25 cm.

Punto Remoto: es el punto más alejado del ojo en el que puede verse con nitidez un objeto. La distancia del cristalino a dicho punto se llama Distancia Máxima de Visión Distinta. Va disminuyendo con la edad.



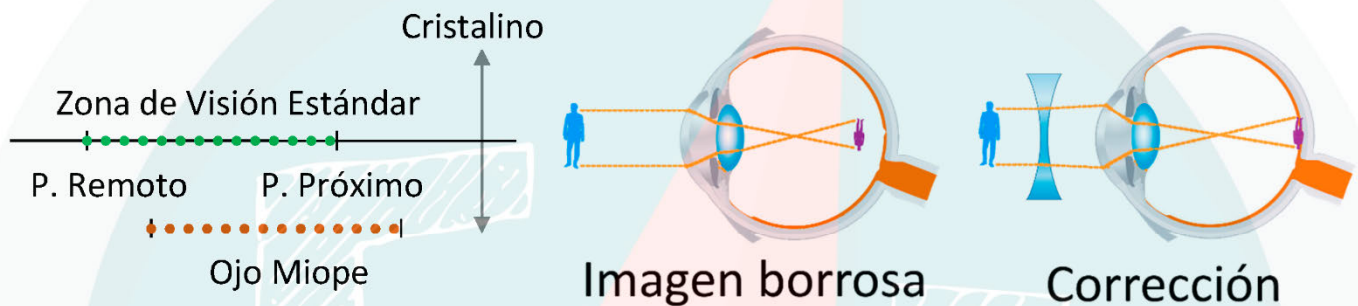
Cuando la imagen no se forma nítida en la retina hablamos de defectos de la visión. Los más habituales son:

OV2. MIOPÍA

Se produce por un exceso de convergencia en el cristalino, que hace que la imagen se forme delante de la retina.

Así los puntos próximo y remoto están más cerca del ojo de lo normal, de manera que un ojo miope ve mejor que uno estándar de cerca, pero peor de lejos.

Se corrige con lentes divergentes.

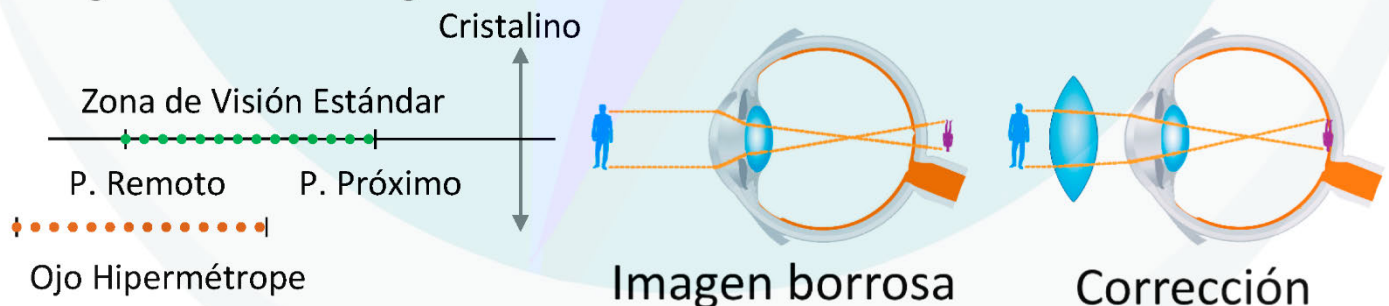


OV3 HIPERMETROPÍA

Es el fenómeno opuesto al anterior. Se produce por un defecto de convergencia en el cristalino, que hace que la imagen se forme detrás de la retina.

Así los puntos próximo y remoto están más lejos del ojo de lo normal, de manera que un ojo hipermetrope ve peor que uno estándar de cerca, pero mejor de lejos.

Se corrige con lentes convergentes.



OV4. PRESBICIA O VISTA CANSADA

Consiste en una mala acomodación del cristalino, por fatiga de los músculos ciliares o por pérdida de elasticidad del cristalino. Se da en ojos que se han forzado mucho, y en personas mayores.

No afecta a la visión lejana, pues en ella el cristalino está relajado, sino solamente al punto próximo que se encuentra más lejos de lo normal.

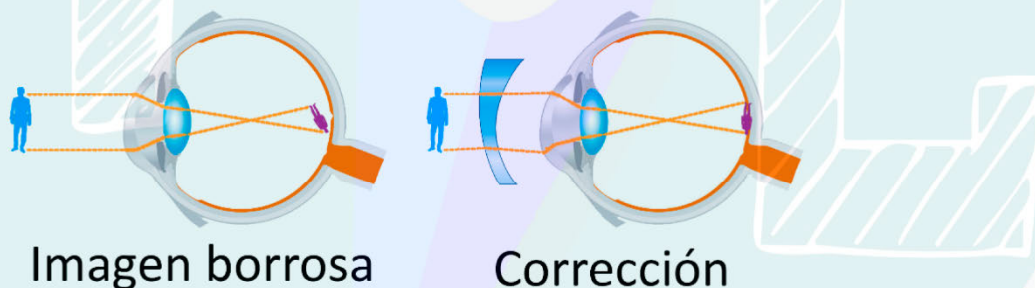
Se corrige mediante lentes bifocales que son convergentes en su parte inferior, para ver de cerca, y no están corregidas en su parte superior, para ver de lejos.

OV5. ASTIGMATISMO

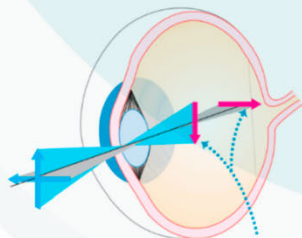
Se produce por irregularidades en la curvatura de la zona que protege al cristalino, la Córnea, lo que provoca que el ojo no sea un sistema óptico estigmático: los elementos verticales y horizontales se enfocan a distancias diferentes, de manera que todos los rayos que provienen de un punto no se juntan en otro, sino en varios.

Esto genera, en lugar de una única imagen nítida, la aparición de varias imágenes superpuestas, cuyo efecto final es que el ojo ve una imagen desenfocada.

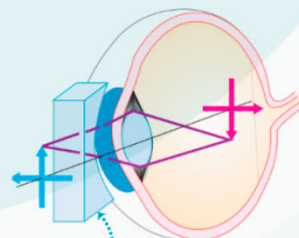
Se corrige con unas lentes de sección cilíndrica, que se curvan solamente en la dirección vertical, o en la horizontal. Es muy común que vaya asociado a la miopía o a la hipermetropía.



Ejemplo:



La imagen de las líneas verticales se forma delante de la retina



Esta lente cilíndrica se curva en la dirección vertical, pero no en la horizontal, cambiando la distancia focal de los elementos verticales.

$$A = \frac{y'}{y}$$

Aumento lateral. En los espejos planos es +1

$$f = \frac{R}{2}$$

Espejo esférico: relación entre las posiciones del foco y el centro

$$A = \frac{y'}{y} = \frac{-x'}{x}$$

Espejo esférico: ecuación del aumento lateral

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x'} + \frac{1}{x}$$

Espejo esférico: ecuación de los espejos esféricos

$$f = -f'$$

Lentes delgadas: relación entre las posiciones de sus dos focos

$$A = \frac{y'}{y} = \frac{x'}{x}$$

Lentes delgadas: ecuación del aumento lateral

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{x'} - \frac{1}{x}$$

Lentes delgadas: ecuación de las lentes delgadas

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

Lentes delgadas: ecuación del fabricante de lentes delgadas

$$P = \frac{1}{f'}$$

Lentes delgadas: potencia de una lente (D). 1 Dioptría = 1 m⁻¹

$$A = \frac{y'_{\text{final}}}{y_{\text{inicial}}} = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots$$

Lentes delgadas: aumento lateral de un sistema de lentes

