



Bolilla 12: Óptica Geométrica

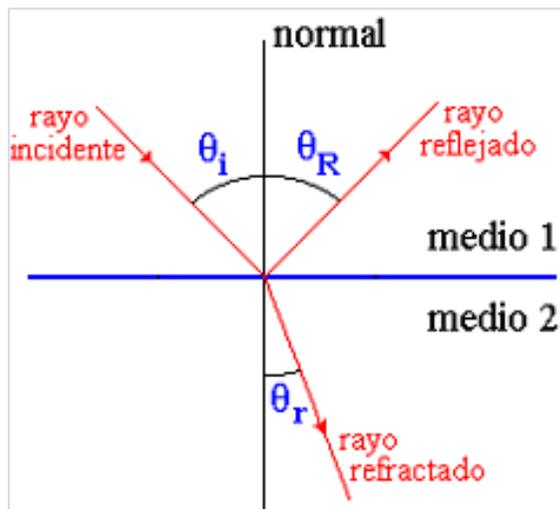


Bolilla 12: Óptica Geométrica

Los contenidos de esta bolilla están relacionados con los principios primarios que rigen el comportamiento de los instrumentos ópticos. La descripción de la trayectoria que siguen los rayos de luz en espejos y lentes permiten conocer el funcionamiento de instrumentos más complejos de uso corriente: una simple lupa, microscopios, telescopios, cámaras fotográficas, etc. Finalmente, describiremos los conceptos primarios que hacen al funcionamiento del ojo humano.

12.1 Reflexión y Refracción

Cuando rayos luminosos llegan a la superficie de separación de dos medios se producen los fenómenos de reflexión y de refracción. En la figura se representa esta situación. El rayo incidente se desplaza por el **medio 1**, con índice n_1 . Al llegar a la superficie de separación con el **medio 2** (índice n_2), da lugar al rayo reflejado que se propaga por el **medio 1**,



y al rayo refractado que se propaga por el **medio 2**. Estos rayos y la normal a la superficie de separación de los medios, verifican que:

- Todos los rayos se encuentran en un mismo plano.
- El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, $\theta_i = \theta_R$ (**ley de Descartes**)
- El ángulo de incidencia y el de refracción verifican la relación:

$$n_1 \sen \theta_i = n_2 \sen \theta_r \quad (\text{ley de Snell})$$

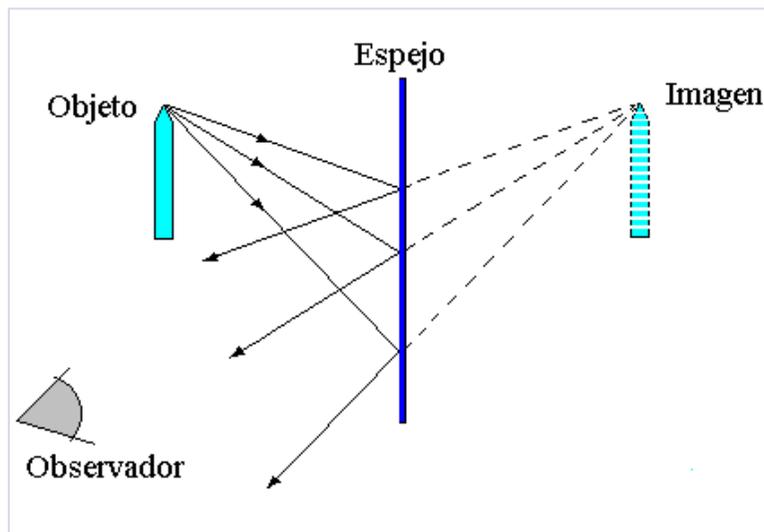


De acuerdo con la Ley de Snell y dado que la función seno es creciente para ángulos entre 0° y 90° , entonces si $n_2 > n_1$ (por ejemplo la luz pasa del aire al agua), se verifica que $\theta_i > \theta_r$. La luz al pasar al medio 2 se acerca a la normal. Caso contrario, si $n_1 > n_2$, la luz se aleja de la normal.

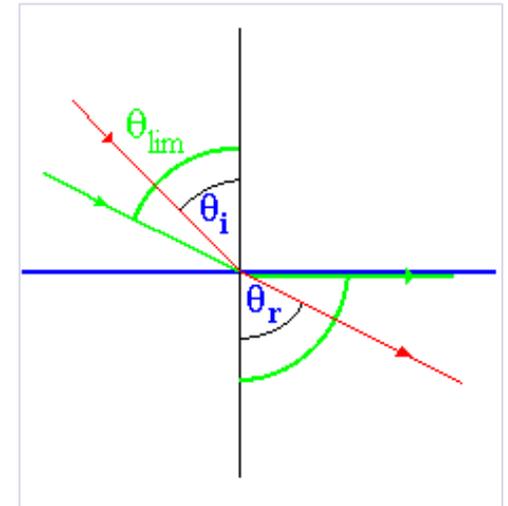
Existe una situación límite cuando el ángulo de refracción θ_r es 90° . Cuando se verifica esta condición, al ángulo de incidencia se lo denomina ángulo límite, verificando la condición:

$$\text{sen}\theta_{\text{lim}} = n_2/n_1$$

12.2 Espejos



La figura muestra un objeto situado delante de un espejo plano. Se representa la trayectoria de tres rayos originados en el punto superior del objeto. Para cada uno de ellos el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Los rayos reflejados divergen desde un único punto que se encuentra por detrás del espejo. Lo mismo sucede si consideramos cualquier punto del objeto cuya imagen deseamos conocer.

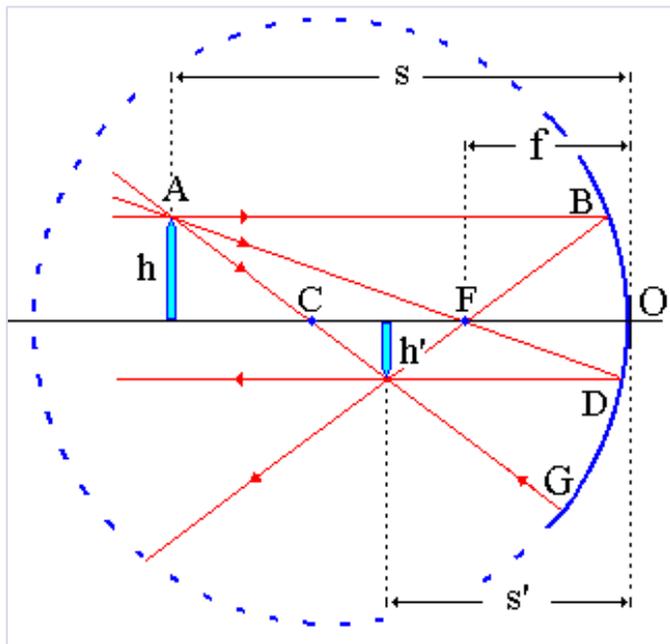
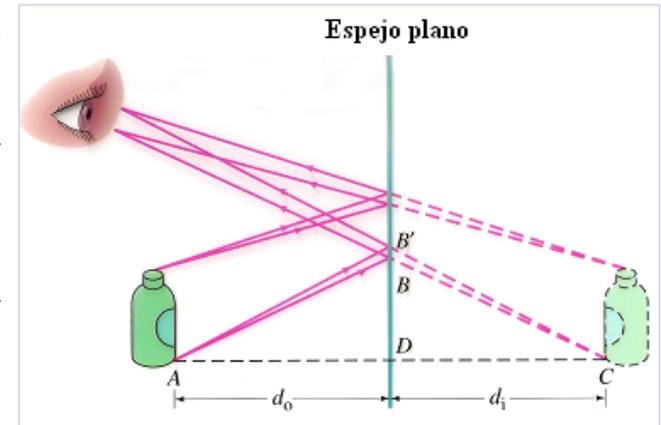


[Animación: Reflexión - Refracción](#)

[Animación: fibras ópticas](#)



De este modo cualquier observador colocado delante del espejo, verá los rayos de luz provenientes del objeto como si los mismos se originaran detrás del espejo en la posición que ocupa no el objeto en sí, sino su imagen. Es fácilmente demostrable que, en el caso de espejos planos la distancia objeto-espejo es igual a la distancia imagen-espejo. Cuando la imagen, como en este caso, se forma con la prolongación de los rayos reflejados, se denomina **imagen virtual**.



La figura de la izquierda representa un objeto de altura **h**, colocado a una distancia **s** de un espejo **esférico cóncavo**. El punto **C** es el centro de curvatura del espejo. La recta horizontal que pasa por **C** es el **eje principal** del espejo. Una superficie esférica verifica que todo rayo paralelo al eje principal (por ejemplo el rayo **AB**) se refleja pasando por el punto **F**, denominado **foco**. La distancia entre el punto **F** y el punto **O**, se denomina **distancia focal**, **f**. Para espejos esféricos, si **R** es la distancia desde el centro de curvatura al espejo, se verifica que:

$$f = R/2$$



Todo rayo que pase por el centro de curvatura (rayo **AG**), llega al espejo perpendicular, por lo tanto se refleja sobre si mismo. Todo rayo que pase por el foco del espejo (rayo **AD**), al llegar a éste se refleja paralelo al eje principal. Considerando un par de estos rayos característicos, la intersección de los mismos indica el lugar donde se forma la imagen del objeto.

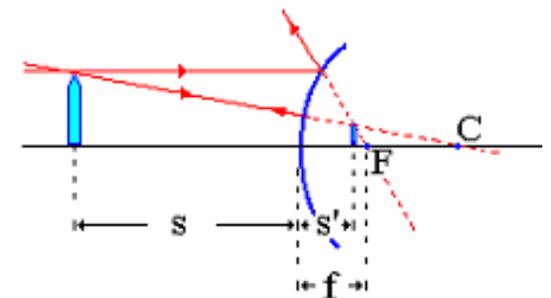
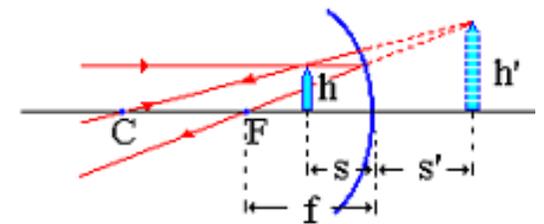
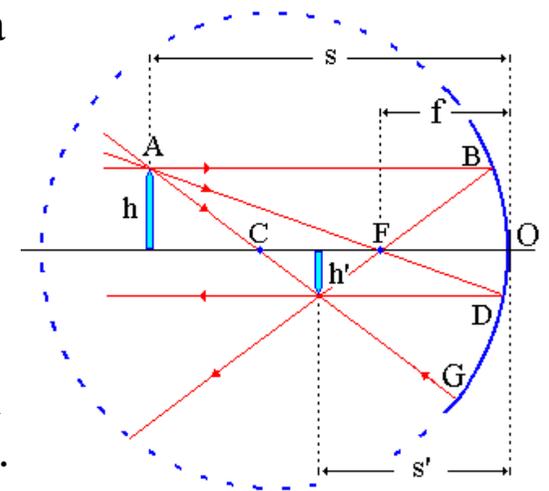
La figura del medio a la derecha, muestra la formación de la imagen en el caso que el objeto esté colocado entre el foco y el espejo. La inferior se muestra la situación de espejos convexos.

Si se tiene en cuenta la siguiente convención:

- f**: positiva para espejos cóncavos, negativa para convexos.
- s** (distancia objeto-espejo): siempre positiva.
- s'** (distancia imagen-espejo): positiva cuando la imagen, tomando como referencia el espejo, se forma del mismo lado del objeto. Negativa cuando la imagen está en el lado opuesto al objeto.

Se verifica que:

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





Si h es la altura del objeto, y h' la altura de la imagen, se define aumento lineal al cociente:

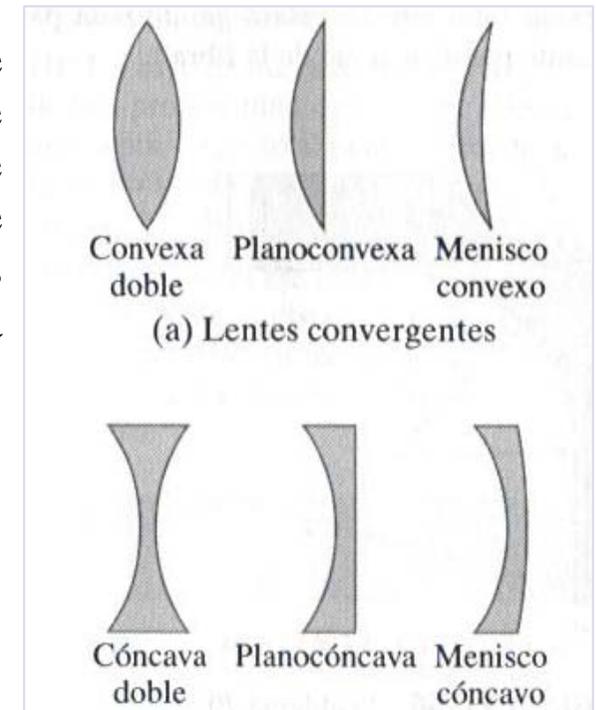
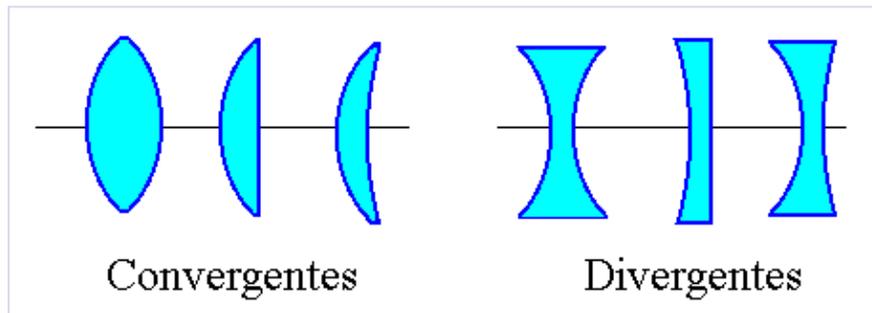
$$m = \frac{h'}{h}$$

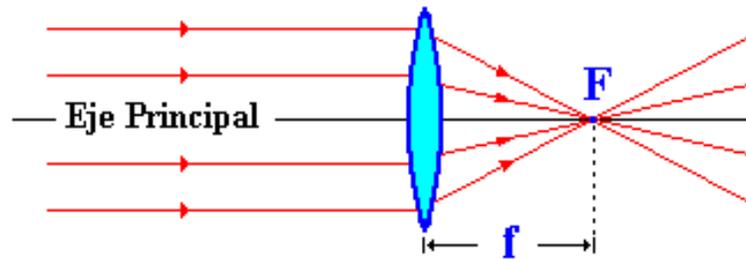
puede demostrarse que:

$$m = \frac{h'}{h} = - \frac{s'}{s}$$

12.3 Lentes

Una lente es un trozo de material transparente capaz de enfocar un haz de luz transmitido, de modo que converge en algún punto del espacio. Generalmente es una pieza de vidrio circular, fina, cuyas superficies son secciones de esferas o planas. La figura muestra un conjunto de lentes convergentes (el grosor es mayor a lo largo del eje de la lente que en los bordes) y de lentes divergentes.





La figura representa rayos que inciden en forma paralela al eje principal de una lente convergente. Se refractan en la lente, convergiendo en un punto denominado foco, **F**. Se denomina distancia focal, **f**, a la distancia entre el centro de la lente y el foco. Cada lente tiene dos focos, situados a igual distancia de la lente hacia ambos lados, sobre el eje principal.

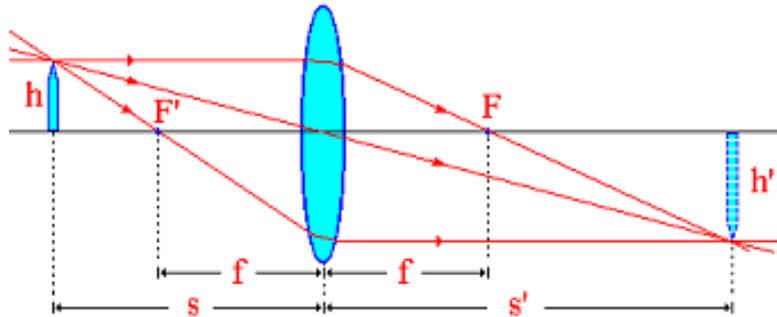
La distancia focal de una lente puede ser calculada utilizando la llamada **ecuación del constructor de lentes**:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

esta ecuación debe utilizarse teniendo en cuenta que:

- ✓ el rayo luminoso llega desde la izquierda de la lente.
- ✓ **n** es el índice de refracción de la lente.
- ✓ **R₁** es el radio de curvatura de la superficie izquierda de la lente.
- ✓ **R₂** es el radio de curvatura de la superficie derecha de la lente.

Si una de las superficies es plana, puede considerarse a su radio de curvatura como infinito.



Consideremos un objeto colocado delante de una lente convergente. Para determinar la posición de la imagen, se consideran tres rayos, que parten de la punta del objeto (**rayos principales**):

1. El rayo que se propaga paralelo al eje principal, se refracta por el foco F.

2. El rayo que pasa por el foco F' , sale de la lente paralelo al eje principal.

3. El rayo que pasa por el centro de la lente no se desvía.

Los tres rayos convergen en un punto donde se forma la imagen de la punta del objeto.

12.4 Formación de Imágenes

Para determinar la imagen, supondremos que la luz proviene desde la izquierda y adoptaremos la siguiente convención:

Distancia focal de la lente, f : positiva si la lente es convergente, negativa si es divergente.

Distancia desde el objeto a la lente, s : siempre positiva para objetos reales.

Distancia desde la lente a la imagen, s' : positiva si la imagen (real) se forma del lado opuesto, que ocupa el objeto. Negativa en caso contrario (virtual).

Altura del objeto, h : positiva cuando el objeto se encuentra por encima del eje de la lente.

Altura de la imagen, h' : positiva cuando la imagen está por encima del eje de la lente.



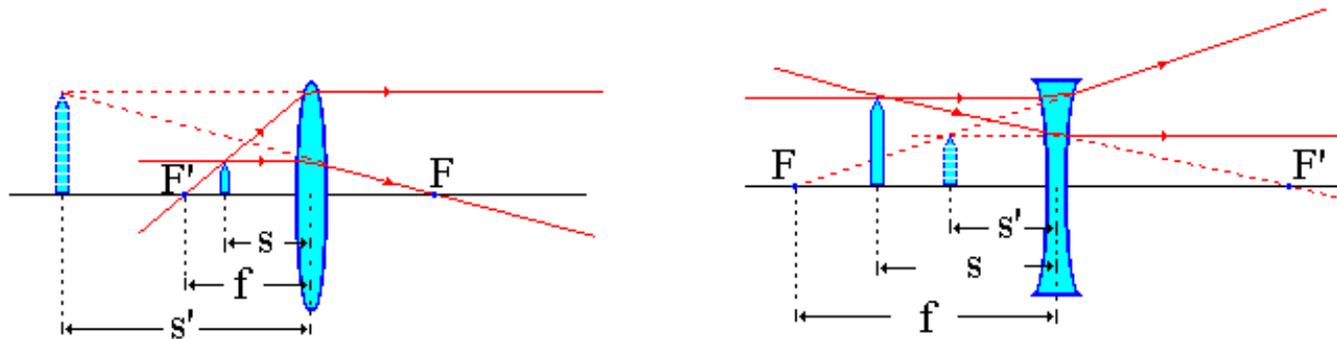
Con esta convención, resulta válida la siguiente ecuación, denominada **fórmula de las lentes delgadas**:

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

El aumento lateral es:

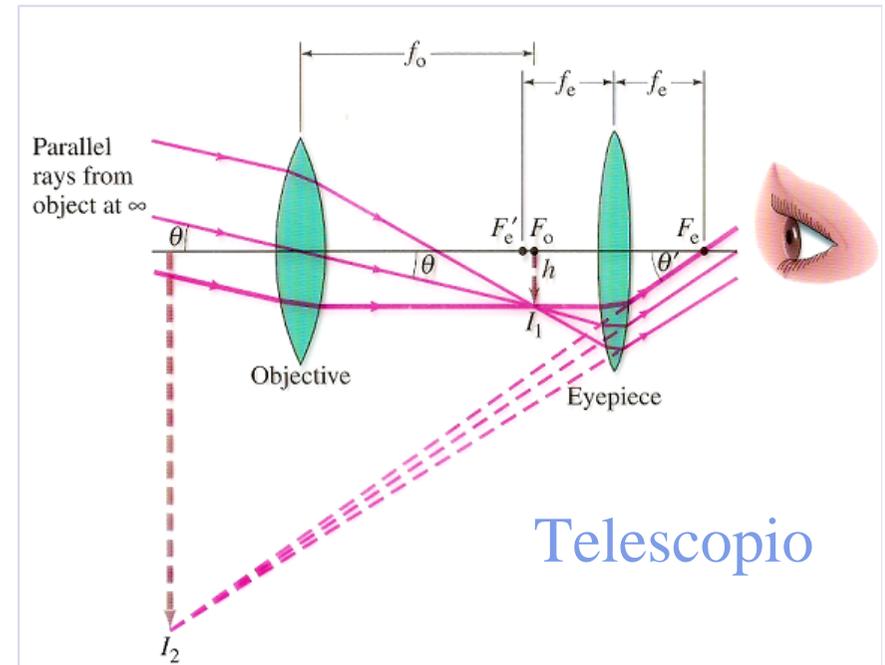
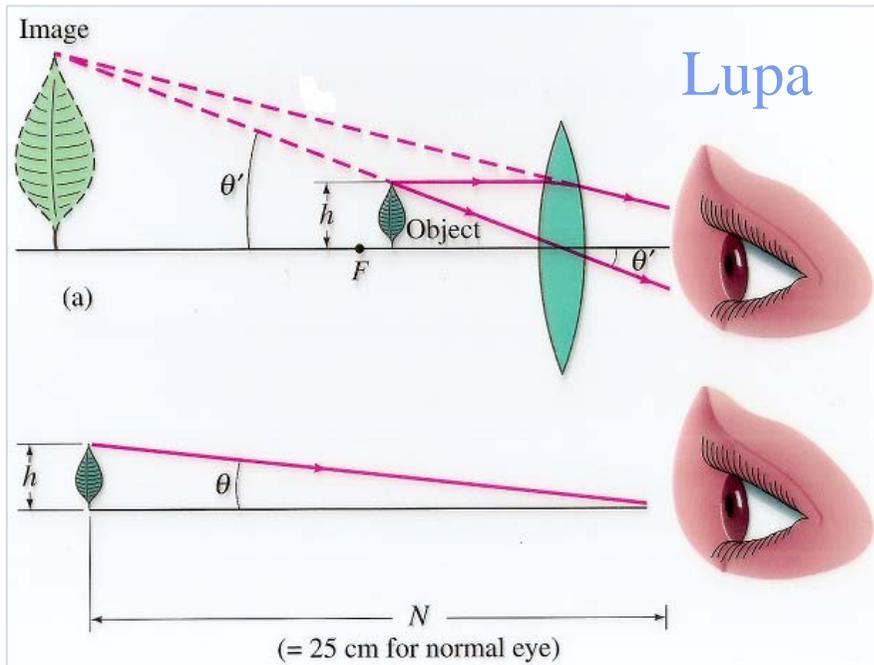
$$m = \frac{h'}{h} = - \frac{s'}{s}$$

La figura siguiente muestra la imagen formada por un objeto situado frente a una lente convergente (entre el foco y la lente) y frente a una lente divergente. En ambos casos la imagen es virtual (se forma con la prolongación de los rayos refractados).

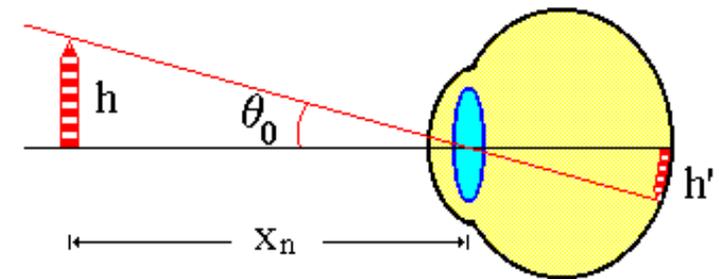




12.5 La Lupa y el Microscopio



A la derecha se representa un ojo humano, un objeto y su imagen en la retina. La **agudeza visual** es la separación angular mínima para la cual el ojo distingue dos objetos vecinos puntiformes. Para un ojo normal, la agudeza visual, θ_0 , es alrededor de $5 \times 10^{-4} \text{ rad}$ ($\approx 0.03^\circ$). La distancia objeto-ojo, $x_n = 25 \text{ cm}$, se denomina **punto próximo**. Es el punto más próximo al ojo en que puede enfocarse en forma comfortable.





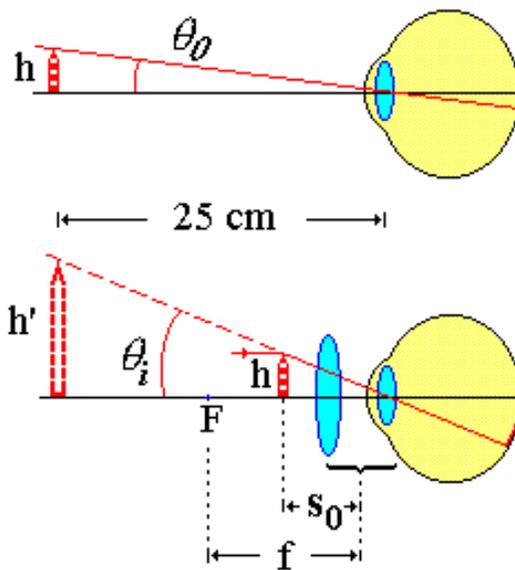
Como θ_0 es muy pequeño, se cumple la relación:

$$h = x_n \text{ tang } \theta = x_n \theta$$

Por lo tanto, los detalles mas finos que se pueden apreciar a simple vista tienen un tamaño:

$$h = (25 \text{ cm}) 5 \times 10^{-4} \text{ rad} = 0,125 \text{ cm}$$

La agudeza visual puede reducirse apreciablemente utilizando una lupa. En la parte superior de la figura de mas abajo se representa un objeto situado a una distancia de



25 cm del ojo, θ_0 mide la amplitud angular del objeto visto desde el ojo. En la parte inferior de la figura se muestra una lupa, que es una lente convergente, colocada delante del ojo. Si asumimos de que la lente se encuentra muy cercana al ojo, entonces no se comete un error significativo si, indistintamente, las distancias son medidas desde el ojo o desde la lente. La imagen virtual generada, se ha situado a una distancia óptima de **25 cm**. El objeto se encuentra, consecuentemente, a una distancia menor al ojo, s_0 . Ahora la apertura angular es θ_i . Se define **aumento angular** a:

$$M = \theta_i / \theta_0$$



Considerando ángulos pequeños resulta válida la aproximación:

$$\text{tang } \theta_0 = \theta_0 = h/25$$

$$\text{tang } \theta_i = \theta_i = h/s_0$$

Entonces:

$$M = \theta_i / \theta_0 = 25 / s_0$$

De la ecuación para lentes delgadas se obtiene:

$$\frac{1}{s_0} = \frac{1}{f} + \frac{1}{25} = \frac{25 + f}{25 f}$$

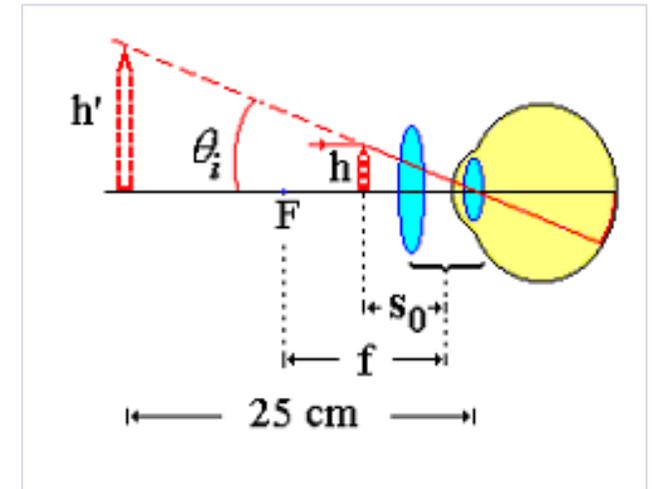
Comparando las dos últimas ecuaciones concluimos que:

$$M = \frac{25}{s_0} = \frac{25 + f}{f}$$

Suponiendo, además, que la distancia focal f mucho menor que 25 cm, concluimos que:

$$M = \frac{25 + f}{f} \cong \frac{25}{f}$$

El aumento de una lupa, es inversamente proporcional a su distancia focal.





La figura muestra, en forma simplificada, la trayectoria de los rayos de luz en un **microscopio simple**.

El objeto se coloca próximo a una primera lente convergente, **el objetivo**.

El objetivo provoca una imagen intermedia **real e invertida** que sirve de objeto a una segunda lente convergente, **el ocular**. Esta lente actúa como una lupa simple produciendo una imagen **virtual y aumentada**. El aumento en el tamaño del objeto es el

producto de los aumentos individuales de cada una de las lentes:

$$m_{\text{microscopio}} = m_{\text{objetivo}} \times m_{\text{ocular}}$$

Como el ocular se comporta como una lupa, el aumento producido por el microscopio puede escribirse del siguiente modo:

$$M_T = \frac{m_1 \cdot 25 \text{ cm}}{f_2}$$

en esta ecuación m_1 es el aumento del objetivo y f_2 es la distancia focal del ocular.

