

Tema I.

Introducción al ojo humano. Forma y dimensiones.

1.1. El ojo humano. Recuerdo anatomofisiológico.

El globo ocular es la estructura esférica que contiene el aparato óptico ocular y el tejido nervioso fotorreceptor. Su ubicación en la órbita le sirve de protección y le proporciona una superficie ósea de origen para los 6 músculos extrínsecos que lo mueven.

Forma y dimensiones

Está constituido por 2 casquetes esféricos contiguos de diferente radio de curvatura. El segmento anterior, llamado **córnea**, es más pequeño, transparente y constituye aproximadamente la sexta parte del globo ocular. Su radio de curvatura es de unos 8 mm. de media (valores normales entre 6'8 y 8'5 mm.). El segmento posterior, llamado **bulbo ocular**, es opaco y su radio de curvatura es de unos 11'5 a 12 mm.

El segmento anterior está limitado por la córnea y el **crystalino** y queda dividido de forma incompleta por el **iris** en una **cámara anterior** y una **cámara posterior**, comunicadas a través de la **pupila**.

Recordando su consideración geométrica como una esfera, en el globo ocular se pueden determinar 2 polos. El **polo anterior** se corresponde con el centro de curvatura corneal, mientras que el **polo posterior** se corresponde con el centro de curvatura escleral. La línea recta imaginaria que conecta ambos polos constituye el **eje óptico o geométrico**. El **eje visual** es la línea que une la **fóvea** (ligeramente temporal e inferior al polo posterior) con el punto nodal y, por tanto, no coincide con el eje óptico. Como en cualquier esfera, el **ecuador** del globo ocular se localiza como un plano equidistante de ambos polos, definiendo 2 hemisferios, el **anterior** y el **posterior**. Así pues, el ecuador es el plano imaginario (en el caso del globo ocular, es plano frontal o coronal) que es equidistante a ambos polos perpendicularmente al eje óptico. Cualquiera de las líneas circunferenciales imaginarias que unen ambos polos son consideradas, por lo tanto, **meridianos**.

El diámetro anteroposterior (de polo anterior a posterior) es habitualmente de 24 mm. En la miopía este diámetro aumenta, y en la hipermetropía es menor. El diámetro vertical (de parte superior a inferior) es de 23-23'5 mm. El diámetro horizontal (de nasal a temporal) es de 23'5-24 mm. El peso es de 7-8 gramos.

Anatomía

El globo ocular se compone de 3 capas (o **túnicas**) y 3 cámaras.

Túnicas oculares. Son tres túnicas de disposición concéntrica, que de fuera hacia dentro son:

- Capa o túnica fibrosa. Compuesta a su vez por la esclerótica y la córnea.

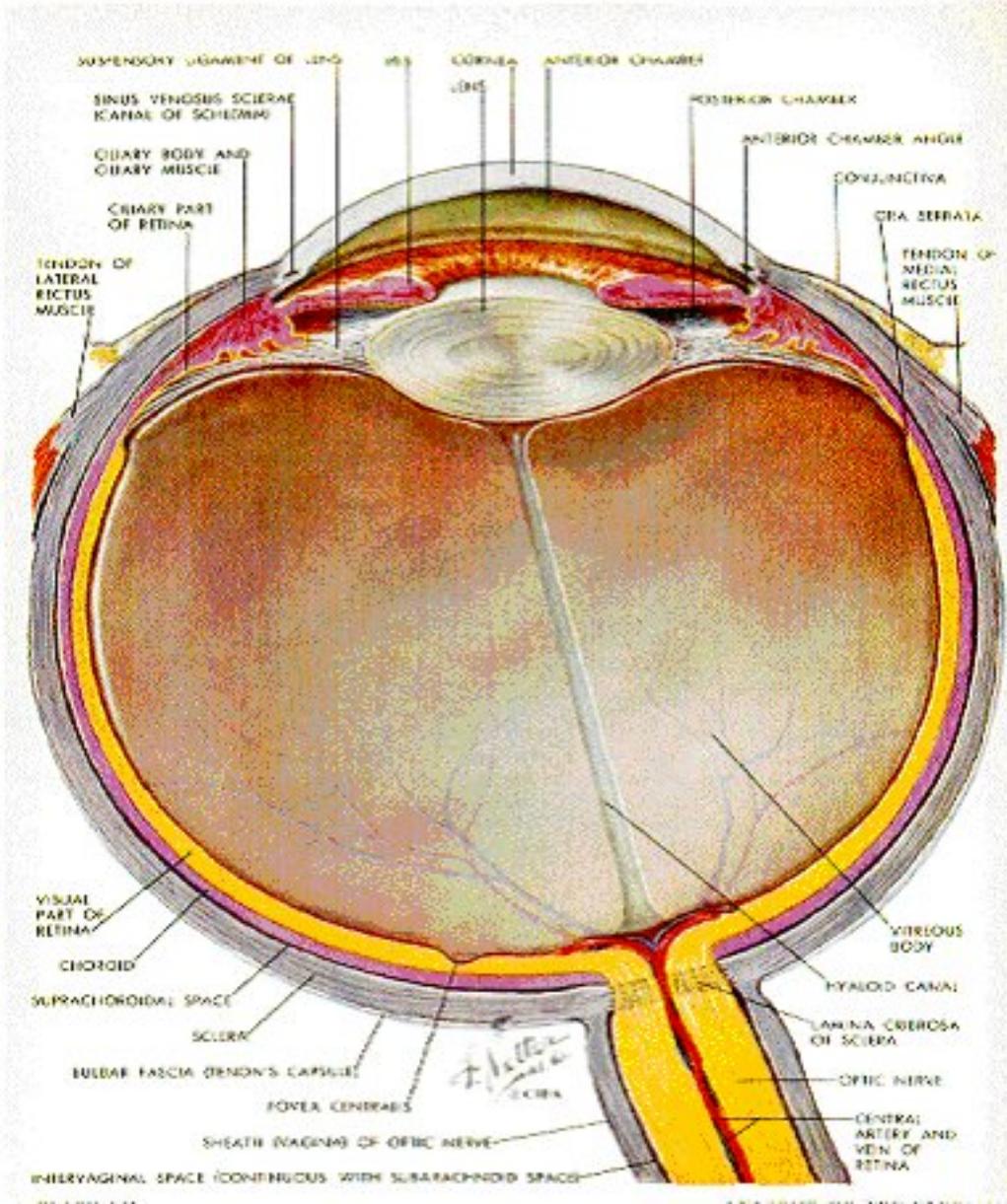
- Capa o túnica vascular, o úvea. Se compone, de atrás a adelante, de coroides, cuerpo ciliar e iris.
- Capa interna o túnica nerviosa. Es la retina.

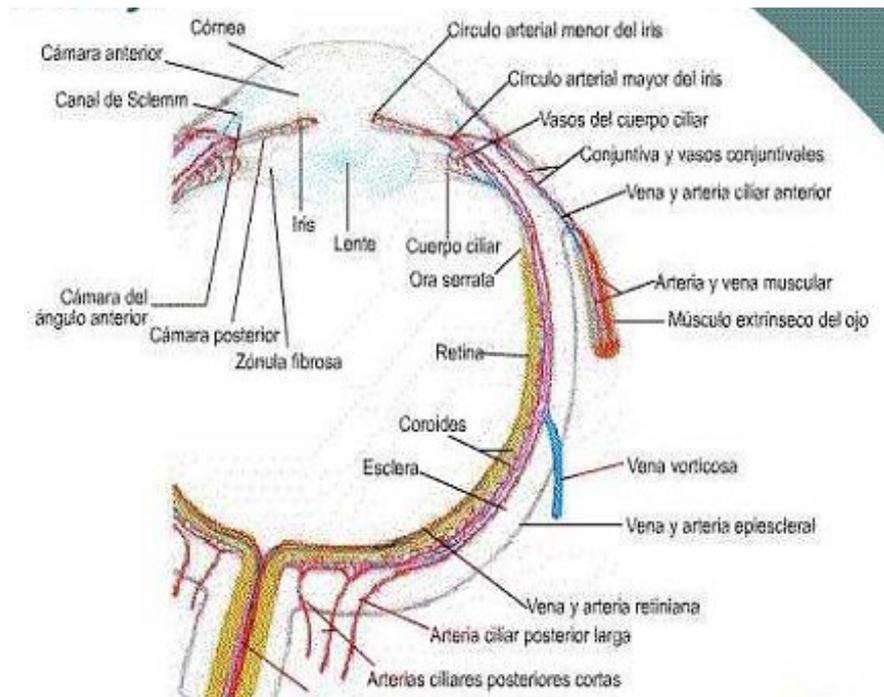
Cámaras. Hay tres cámaras, que ordenadas de la parte anterior a la posterior del ojo, son:

- Cámara anterior. Entre córnea e iris. Está rellena por el humor acuoso.
- Cámara posterior. Comprendida entre el iris y el cristalino. También bañada en humor acuoso.
- Cámara vítrea. Es la zona entre el cristalino y la retina. Rellena de un gel transparente y avascular llamado **humor vítreo**.

Completando la estructura del ojo, además de las capas del globo ocular, tendremos en cuenta los medios refringentes del mismo: **lágrima**, **córnea** (pertenece a la capa fibrosa), **humor acuoso**, **cristalino** y **humor vítreo**.

El globo ocular, para su perfecta función, necesita además de un conjunto de órganos y estructuras accesorias al mismo (el término "accesorio" no implica en absoluto "poco importante"). Entre estas estructuras están los **músculos extrínsecos** o **extraoculares** (rectos superior, inferior, medial y lateral; oblicuos mayor y menor; y músculo elevador del párpado superior) y los llamados **anejos oculares** (cejas, párpados, conjuntiva, aparato lagrimal y otros elementos presentes en la órbita y otros elementos presentes en la órbita y relacionados directamente con el globo ocular).





1.2 El ojo humano. Sistema óptico.

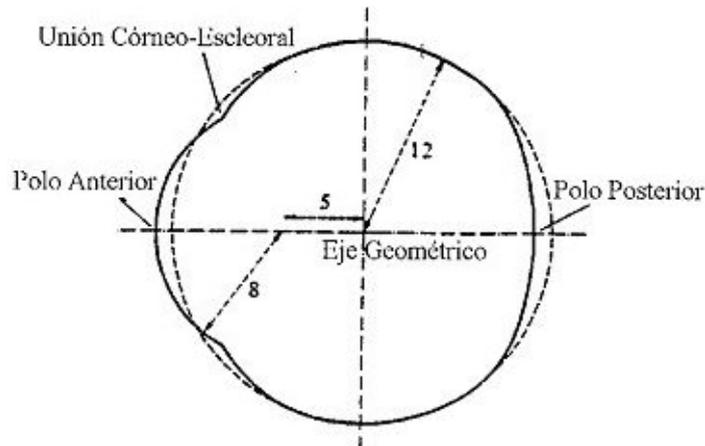
- Córnea.
- Cámara anterior.
- Iris y pupila.
- Cristalino.
- Retina.

En este tema comenzaremos el estudio del ojo humano como sistema formador de imágenes, centrándonos en el conocimiento de los parámetros ópticos del ojo:

- Su forma y dimensiones globales.
- Los radios de curvatura de las distintas superficies refractivas que en él se distinguen.
- Las distancias entre ellas.
- Los índices de refracción de los distintos medios.

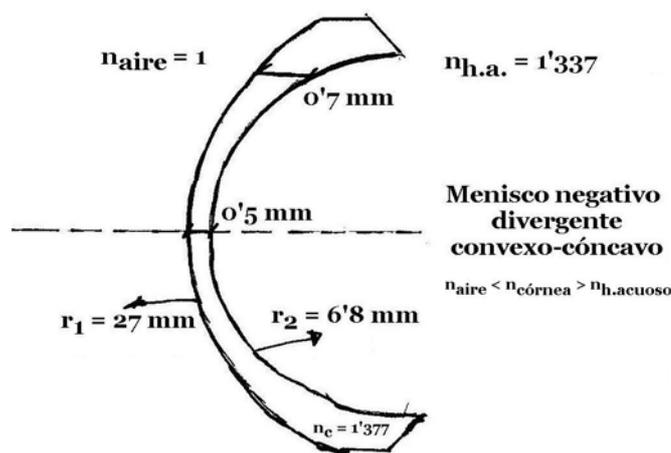
La córnea.

Mayor curvatura que el globo ocular. Menos radio equivale a más curvatura.



Forma elíptica con diámetro vertical (11'5 mm.) ligeramente menor que el horizontal (12 mm.). Cierta astigmatismo corneal directo (radio vertical menor que radio horizontal) atribuido a la presión del parpadeo sobre el eje vertical.

Estructura transparente en forma de menisco. Lente más gruesa en el borde que en el centro.



El índice de refracción del aire es 1, y el índice de refracción del humor acuoso es 1'337, luego el ojo se comporta como un sistema convergente.

La cara anterior de la córnea está bañada por la película lagrimal. Se caracteriza por un aumento progresivo del radio de curvatura según nos acercamos al limbo esclerocorneal. La córnea se aplanar al alejarnos del centro, que resulta en una disminución de la potencia hacia la periferia.

$$n = -n' \quad (1/s') + (1/s) = 2/r = 1/f' \quad \beta = y'/y = -s'/s$$

$$\beta = y' / y \approx -r / 2s \quad \text{luego } r = -2sy' / y \quad (y \gg y')$$

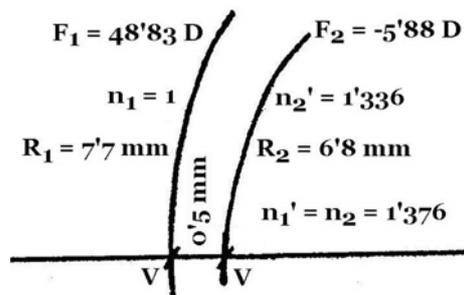
Para calcular el radio fotografiamos por reflexión la imagen corneal de un objeto de tamaño conocido.

Imágenes de Purkinje: imágenes por reflexión sobre las distintas superficies refractivas del ojo.

Primera imagen de Purkinje: imagen por reflexión sobre la primera superficie de la córnea (cara anterior). Es una imagen virtual, derecha y más pequeña.

Potencia refractiva de la córnea.

El sistema óptico de la córnea consiste en dos superficies esféricas que separan 3 medios ópticamente distintos (distinto índice de refracción), que son el aire, la córnea y el humor acuoso.



Dioptrios esféricos:

$$D = 1 / f' \quad F' = n' / f' \quad f' = (n' \cdot r) / (n' - n) \quad F' = (n' - n) / r_{(m)}$$

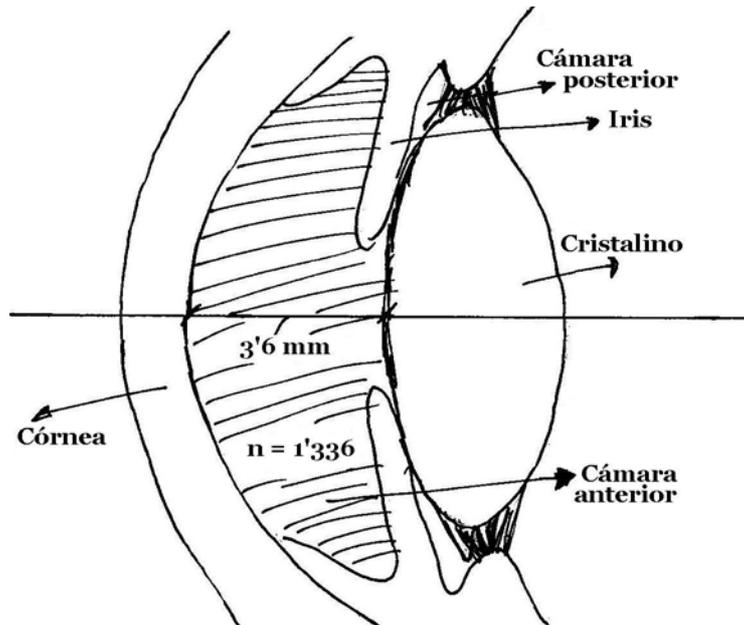
$$F_c = F_1' + F_2' - (e / n_1') \cdot F_1' \cdot F_2' = 48,83 - 5,88 - (-0,1) = + 43,05 \text{ D}$$

Si los dos dioptrios estuviesen en el aire formarían un sistema divergente, pero la relación de los índices de refracción de los medios que separan hace que resulte un sistema convergente.

La cámara anterior.

Situada entre cara posterior de la córnea y cara anterior del iris y el cristalino.

Rellena de un líquido incoloro denominado **humor acuoso** con un contenido del 98% de agua. Es muy homogéneo y su índice de refracción está bien definido.



Su profundidad es de entre 3 y 4'5 mm., con un valor medio de 3'6 mm.

Una reducción de 1 mm. en el espesor de la cámara supone un incremento de 1'4 dioptrías en la potencia total del ojo.

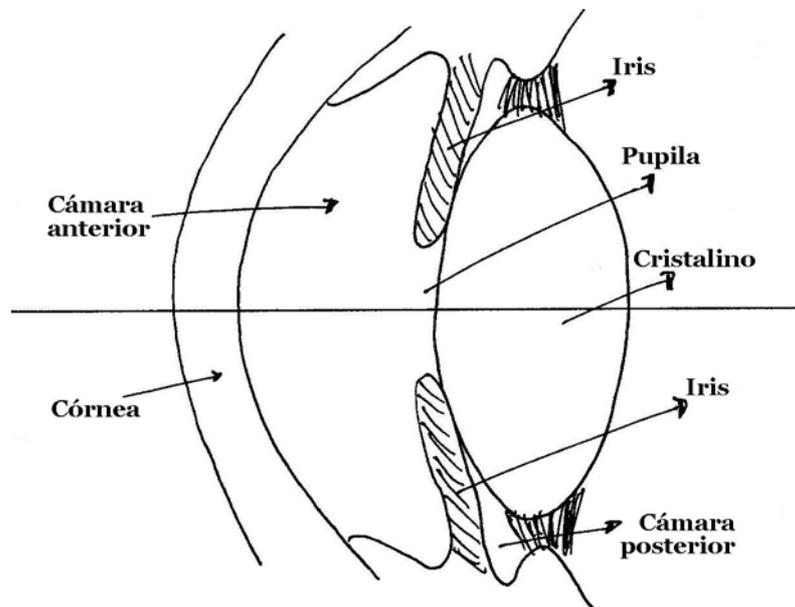
El iris y la pupila.

El borde libre del iris está situado ligeramente tangencial a la primera superficie del cristalino.

Su función es regular la cantidad de luz que pasa hacia la retina a través de la pupila.

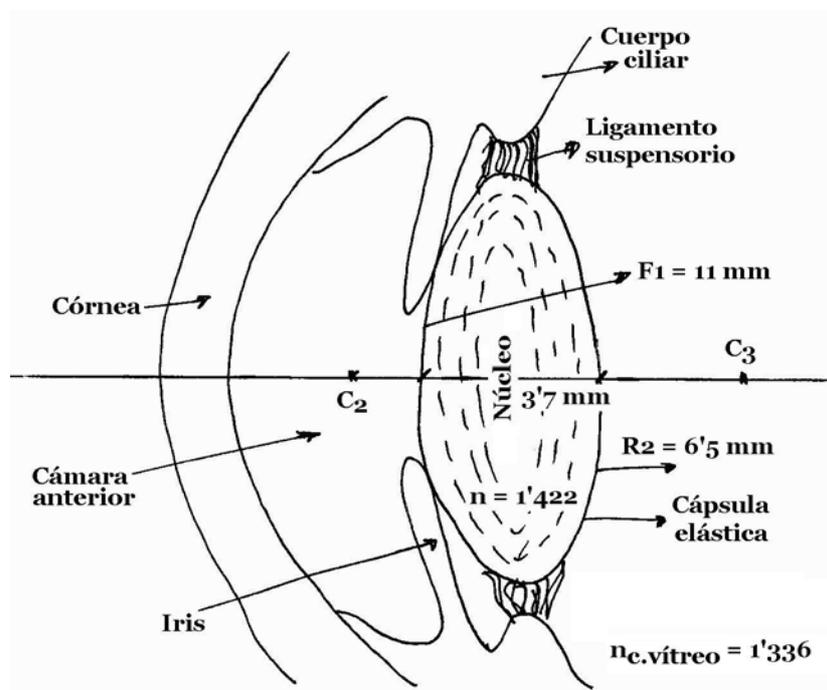
La pupila es la abertura central circular que varía de diámetro en función del nivel de iluminación: entre 2 y 3 mm. con luz brillante, 8 mm. en oscuridad.

El tamaño de la pupila define la calidad de su imagen retiniana y disminuye con la edad.



El cristalino.

Lente biconvexa de potencia dióptrica variable que puede enfocar a diferentes distancias gracias al mecanismo de acomodación.



Su cara anterior, en contacto con la cara posterior del iris, está bañada por el humor acuoso. La cara posterior está en contacto con el humor vítreo un gel transparente que ocupa la cámara vítrea en el segmento posterior del ojo. Su índice de refracción es 1'336, igual que el del humor acuoso.

El espesor central en un ojo adulto, sin acomodar, es de aproximadamente 3'7 mm. y aumenta con la edad.

La curvatura de la superficie anterior del cristalino en reposo es más plana que la de la cara posterior: $r_1=11 \text{ mm}$. y $r_2=6.5 \text{ mm}$.

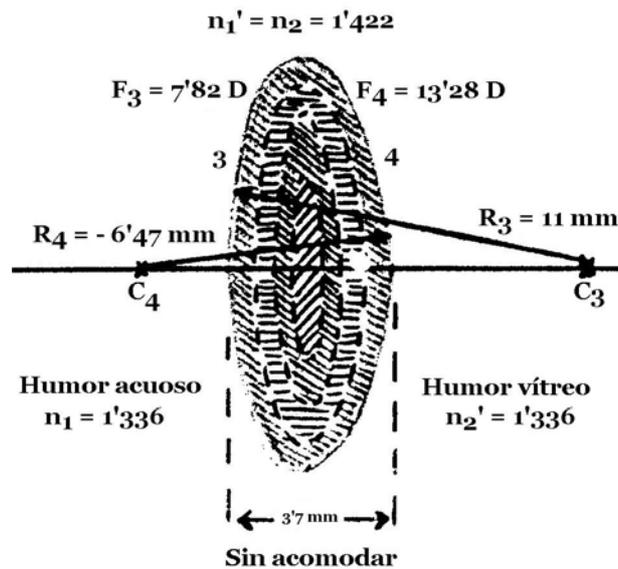
El índice de refracción del cristalino varía dentro de su estructura debido a su heterogeneidad. En el centro (núcleo del cristalino) es 1'41 y en la periferia es 1'38.

Para realizar el estudio óptico del cristalino, consideramos sus dos superficies como esféricas y un índice de refracción efectivo de $n=1.42$, de forma que la potencia refractiva aproximada del cristalino es de +21 D.

Tiene una gran heterogeneidad física y óptica (estructura en capas).

Los ligamentos suspensorios o **zónula de Zinn** sostienen la lente y controlan la curvatura de sus superficies a través de las variaciones de la tensión de la zónula producida por la acción del músculo ciliar.

El cristalino tiene una estructura en capas muy compleja que a lo largo de la vida continúa su crecimiento en grosor mediante la superposición de nuevas capas. El resultado es una pérdida de flexibilidad y transparencia.



$$D = 1 / f' \quad f' = (n' \cdot r) / (n' - n) \quad \Gamma' = n' / f' = (n' - n) / r_{(m)}$$

$$F_L = F_3 + F_4 - (e / n_1') \cdot F_3 \cdot F_4 = 7.82 \text{ D} + 13.28 \text{ D} - 0.27 \text{ D} = +20.83 \text{ D}$$

La retina.

Se extiende sobre la superficie interna de la parte posterior del globo ocular.

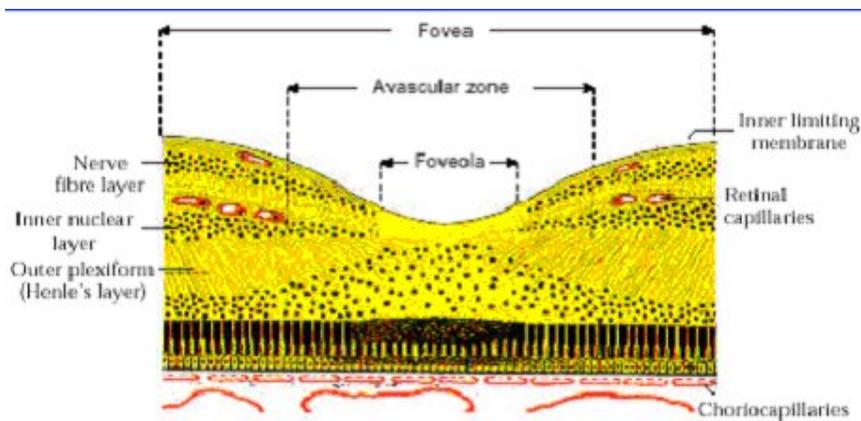
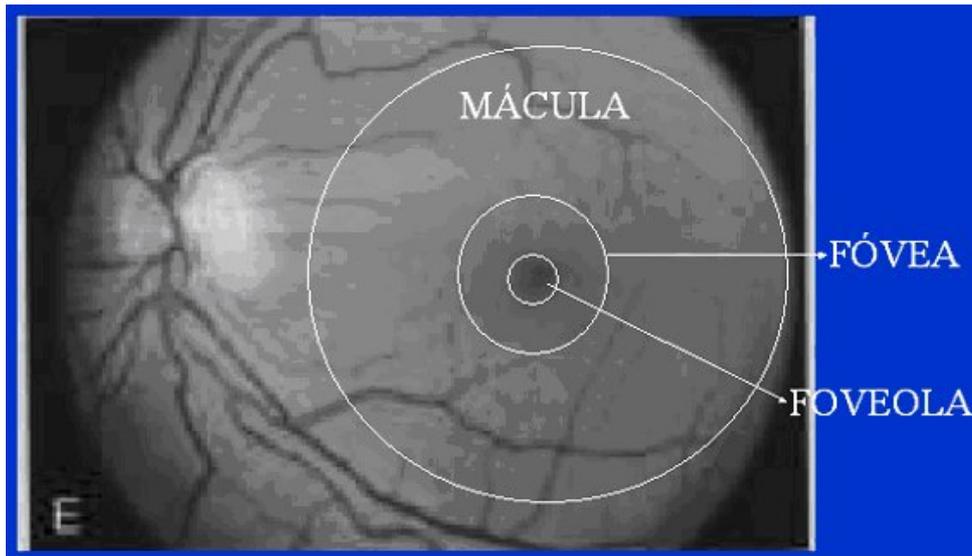
Su cara interna está en contacto con el vítreo y se relaciona con la coroides externamente.

Su estructura es muy compleja tanto anatómica como funcionalmente, ya que se trata de una prolongación del sistema nervioso central, donde comienza el análisis de la información luminosa.

Contiene 2 tipos de fotorreceptores: **conos**, responsables de la visión diurna o "fotópica", y **bastones**, responsables de la visión nocturna o "escotópica".

La mácula, en la que se encuentran la fovea y la foveola, es la zona de la retina con mayor densidad de conos y por tanto con mayor sensibilidad para los detalles. Cuando los ojos dirigen su mirada hacia un objeto, su imagen se sitúa sobre cada una de las foveas.

Desde el punto de vista óptico, la retina es la pantalla sobre la que se forma la imagen. Es una superficie esférica cóncava con un radio de 12 mm. Esta curvatura se aproxima a las condiciones ópticas ideales para obtener una mayor eficacia de la visión periférica.



Dimensiones promedio de un ojo humano estándar (Bennett y Rabbetts)

Radios de curvatura	1. Córnea: Superficie anterior	+ 7'7 mm
	2. Córnea: Superficie posterior	+ 6'8 mm
	3. Cristalino: Superficie anterior	+ 11'0 mm
	4. Cristalino: Superficie posterior	- 6'5 mm
Separaciones axiales	Espesor axial de la córnea	0'5 mm
	Profundidad de la cámara anterior	3'6 mm
	Espesor del cristalino (sin compensar)	3'7 mm
	Profundidad del cuerpo vítreo	16'79 mm
	Longitud axial total	24'09 mm
Indices refractivos	Humor acuoso	1'336
	Cristalino	1'422
	Humor vítreo	1'336
	Córnea	1'376

Imágenes de Purkinje-Sanson

La luz que se refleja a nivel de los diferentes dioptrios oculares da origen a las imágenes de Purkinje, que son las imágenes que los objetos luminosos forman por reflexión sobre las superficies ópticas del ojo.

Fueron observadas por primera vez por el checo Purkinje en 1821. Sanson en 1837 fue quien primero las utilizó con fines diagnósticos.

Se observan en cámara oscura e iluminando el ojo del sujeto con una fuente luminosa triangular o alargada, situada a 35° del eje visual y a una distancia de entre 50 cm. y 1 metro de dicho ojo.

Las imágenes son cuatro, dos corneales y dos cristalinas.

1. La primera imagen se produce por reflexión sobre la cara anterior de la córnea que actúa como un espejo convexo.

- Da lugar a una imagen virtual y derecha de la fuente luminosa.
- Es la imagen más intensa debido a la gran diferencia de índices de refracción entre el aire ($n=1$) y la córnea ($n=1.3771$).
- Está situada aproximadamente a nivel del plano pupilar, y tiene un tamaño intermedio entre las imágenes que producen las dos superficies del cristalino.
- Esta imagen se conoce también como "reflejo luminoso corneal".

2. La segunda imagen se produce sobre la cara posterior de la córnea.

- Es de escasa intensidad debido a que la diferencia entre los índices de refracción de la córnea (1.3771) y el humor acuoso (1.3374) es muy pequeña.
- Está enmascarada por la primera imagen que se forma muy próxima a ella ya que el radio de curvatura de la cara posterior es ligeramente inferior al de la cara anterior.
- Su tamaño también es ligeramente menor.
- Todo ello hace que sea prácticamente imperceptible.

3. La tercera imagen de Purkinje-Sanson se forma sobre la cara anterior del cristalino que también actúa como un espejo convexo.

- Es la mayor de todas debido a que el radio de curvatura de la cara anterior del cristalino es mayor que los de la córnea.
- Es una imagen derecha y virtual.
- Su intensidad luminosa es la más débil debido al mayor tamaño de la imagen, la escasa diferencia entre índices y la heterogeneidad del cristalino que le confiere un aspecto borroso.
- Durante la acomodación, esta imagen se hace más pequeña, ya que disminuye el radio de curvatura, es decir, aumenta la curvatura de la cara anterior del cristalino.

4. La cuarta imagen se forma por reflexión sobre la cara posterior del cristalino, que actúa como un espejo cóncavo, por lo que se produce una imagen real e invertida.

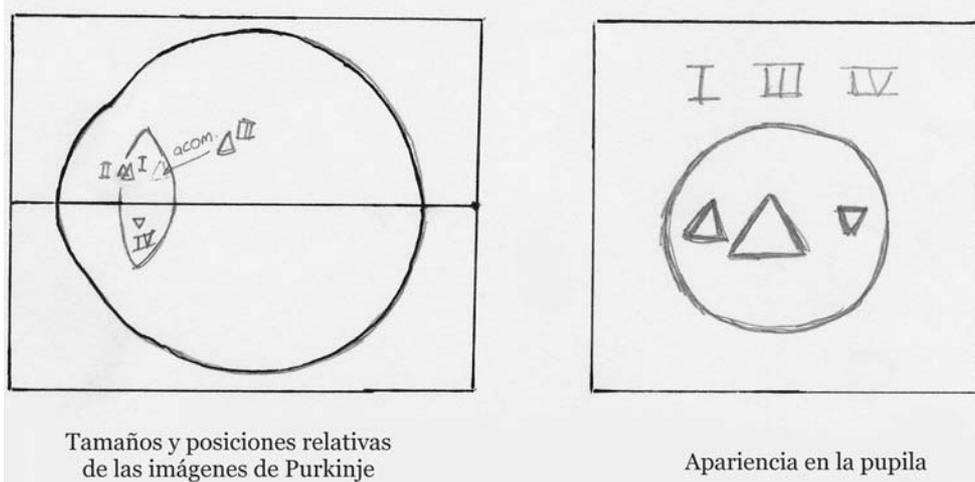
- Su intensidad es mayor que la de la tercera imagen.
- Su tamaño es inferior que el de la primera.
- Durante la acomodación se modifica poco.

En resumen, la imagen de mayor tamaño es la de la superficie anterior del cristalino, luego la de la superficie anterior de la córnea y por último la de la superficie posterior del cristalino.

En cuanto a la intensidad luminosa, la imagen más intensa es la primera, luego la cuarta y después la tercera.

Durante la acomodación las imágenes corneales no se modifican, muy poco la cuarta imagen y la tercera imagen sufre grandes modificaciones tanto en tamaño como en posición.

Sirven para calcular la posición exacta y radio de curvatura de las superficies reflejantes.



Imágenes de Purkinje - Problema

Calcular la posición y tamaño del reflejo corneal en el modelo de ojo desacomodado de LeGrand de un objeto de 25 cm. situado a 0'5 m. de la cara anterior de la córnea.
¿Cuál es el factor de reflexión?.

$$y = 25 \text{ cm} = 250 \text{ mm} \quad s = -0'5 \text{ m} = -500 \text{ mm} \quad r_c = 7'8 \text{ mm}$$

$$y' = ? \quad s' = ?$$

$$\begin{aligned} 1/s + 1/s' &= 2/r_c \\ 1/(-500) + 1/s' &= 2/7'8 \quad 1/s' = 2/7'8 + 1/500 \\ 1/s' &= 0'26 \quad \mathbf{s' = 3'85 \text{ mm}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta = y'/y &= -s'/s \\ y'/250 &= -3'85/-500 \quad \mathbf{y' = 1'93 \text{ mm}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R &= [(n - n') / (n + n')]^2 \cdot 100 \\ R &= [(1 - 1'3771) / (1 + 1'3771)]^2 \cdot 100 \quad \mathbf{R = 2'52 \%} \end{aligned}$$