

# **BIOFISICA DE LA AUDICIÓN**

Esp. Bioq. **Pedro Catania**

Para comprender y estudiar la **percepción de ondas sonoras** necesariamente se deben articular conocimientos de:

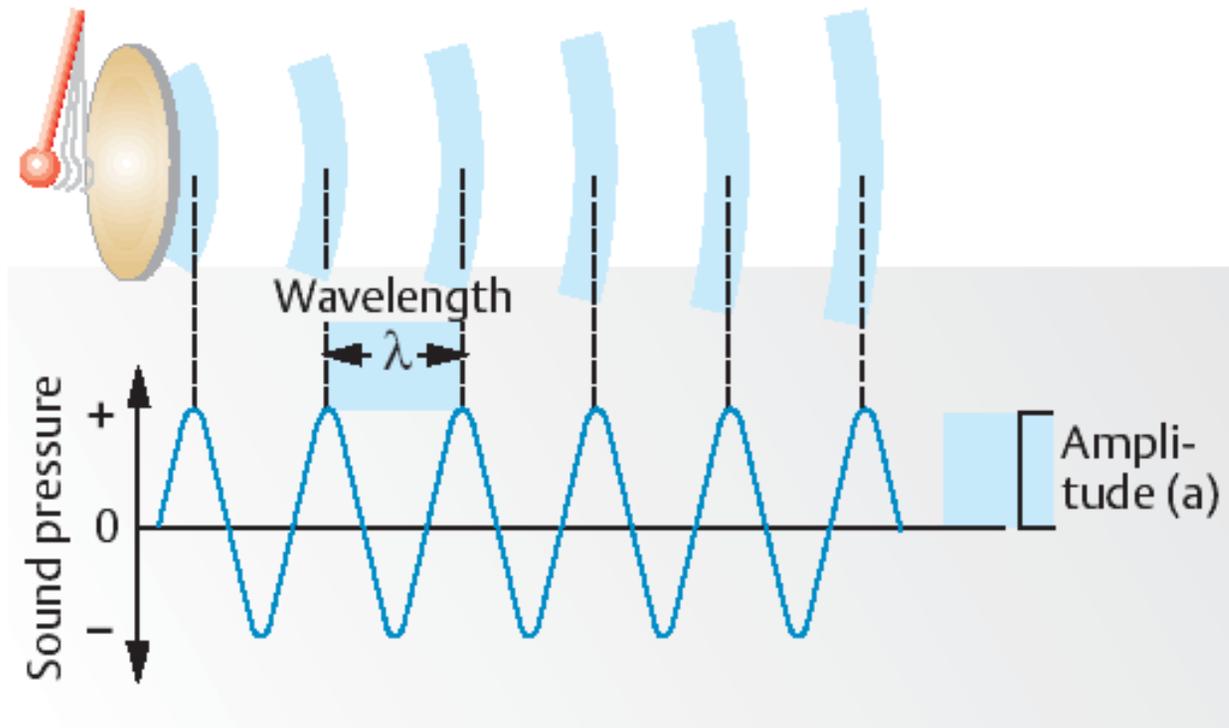
**física,**

**anatomía,**

**histología y**

**fisiología.**

**¿Qué es el sonido?**



El **sonido** es una **onda mecánica**, generada por la **vibración de un cuerpo** a una determinada frecuencia, la cual hace vibrar a su vez el aire circundante.

Las moléculas de aire se acercan y la presión se incrementa (**compresión**) y cuando se alejan la presión disminuye (**rarefacción**).

Debido a que la onda sonora depende de esta interacción de moléculas, **el sonido no pueden transmitirse en el vacío.**

Para que una **onda sonora** se propague en un **medio**, éste debe ser **elástico**.

El **aire** es un medio con otras características relevantes para la propagación del sonido:

1- **la propagación es lineal**, que quiere decir que diferentes ondas sonoras pueden propagarse por el mismo espacio al mismo tiempo sin afectarse mutuamente.

2- **es un medio no dispersivo**, por lo que las ondas se propagan a la misma velocidad independientemente de su frecuencia o amplitud.

3- **es un medio homogéneo**, de manera que el sonido se propaga en todas las direcciones, generando un **campo sonoro**.

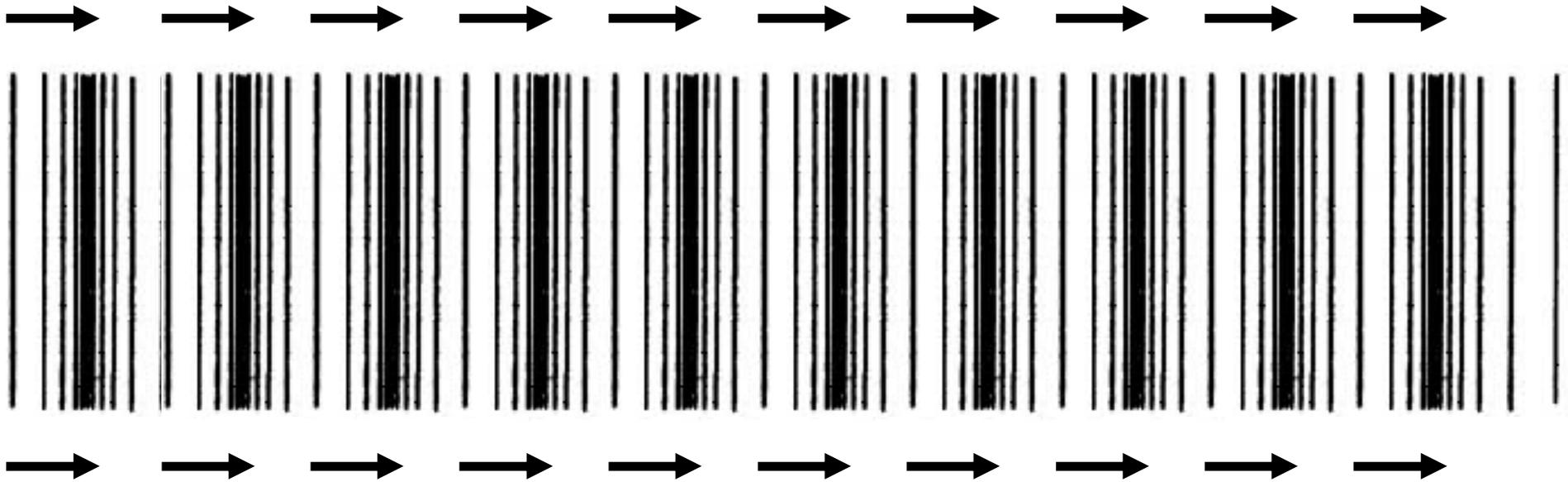
Entre la **fente** sonora y el **receptor** hay una **transmisión de energía pero no un traslado de materia**.

No son las moléculas de aire que rodean a la fuente sonora las que hacen entrar en movimiento al **tímpano**, sino las que están junto al mismo, que fueron puestas en movimiento a medida que la onda se fue propagando en el medio.

El pequeño desplazamiento oscilatorio que sufren las distintas moléculas de aire genera zonas en las que hay una mayor concentración de moléculas, **zonas de condensación**, y zonas en las que hay una menor concentración de moléculas, **zonas de rarefacción**.

**Esas zonas** de mayor o menor densidad **generan una variación alterna en la presión** estática del aire (la presión del aire en ausencia de sonido). Es lo que se conoce como **presión sonora**.

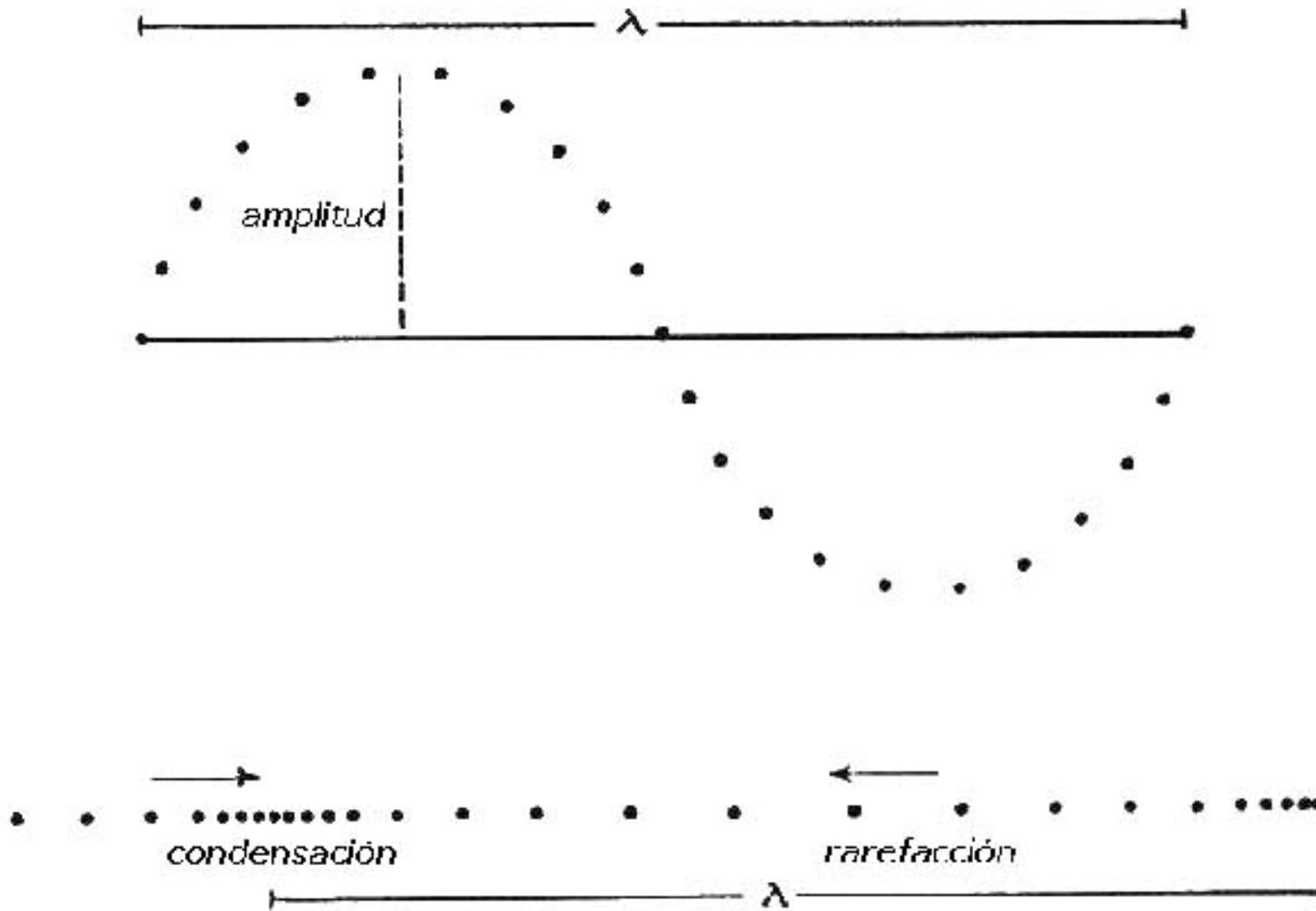
El aire se **comprime** y se **distiende**, pero las moléculas, pasada la alteración, **se mantienen en su sitio original**.



No confundir la **velocidad de la onda** con la **velocidad de las partículas**.

Las **partículas** tienen un **movimiento oscilatorio** muy rápido, cuya velocidad es distinta a la velocidad de propagación de la onda. Por lo tanto **la velocidad de propagación de la onda sonora** depende de las características del **medio**.

Si el cuerpo que genera la oscilación realiza un **movimiento armónico simple**, las variaciones de la presión en el aire pueden representarse por medio de una **onda sinusoidal**.



**¿A qué velocidad viaja el sonido?**

**¿La velocidad del sonido es una  
constante física?**

La velocidad del sonido **depende de las características del medio.**

En el caso de un gas (como el aire) **es directamente** proporcional a **su temperatura y a su presión e inversamente proporcional a su densidad.**

En general, se propaga a mayor velocidad en líquidos y sólidos que en gases.

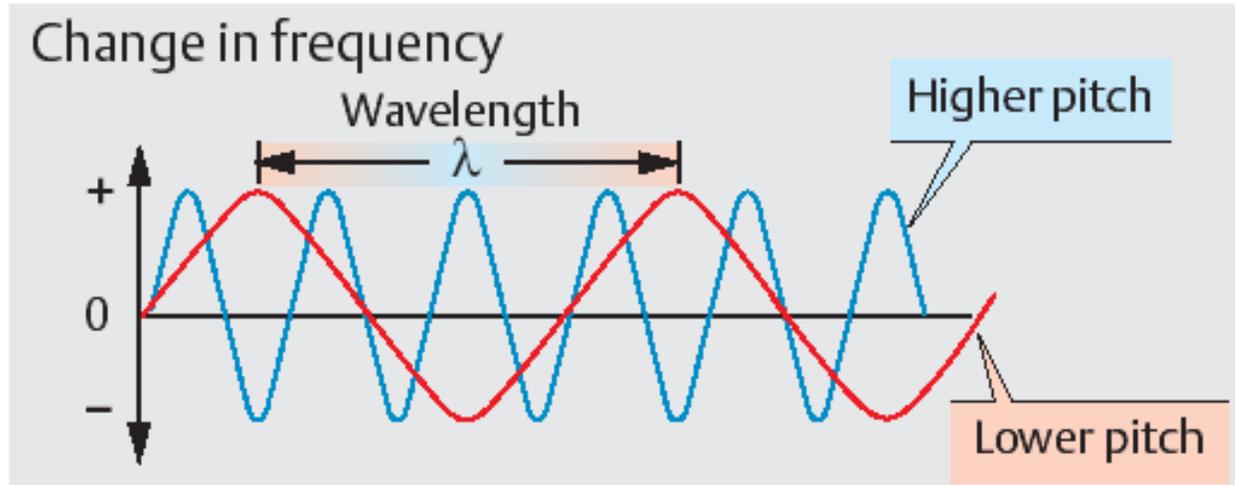
**Para un gas determinado** que si varía la presión, varía también la densidad del gas, la velocidad de propagación **permanece constante ante los cambios de presión.**

Pero la velocidad del sonido sí varía ante los cambios de temperatura del aire (medio). Cuanto mayor es la temperatura del aire mayor es la velocidad de propagación. **La velocidad del sonido en el aire aumenta 0,6 m/s por cada 1° C de aumento en la temperatura.**

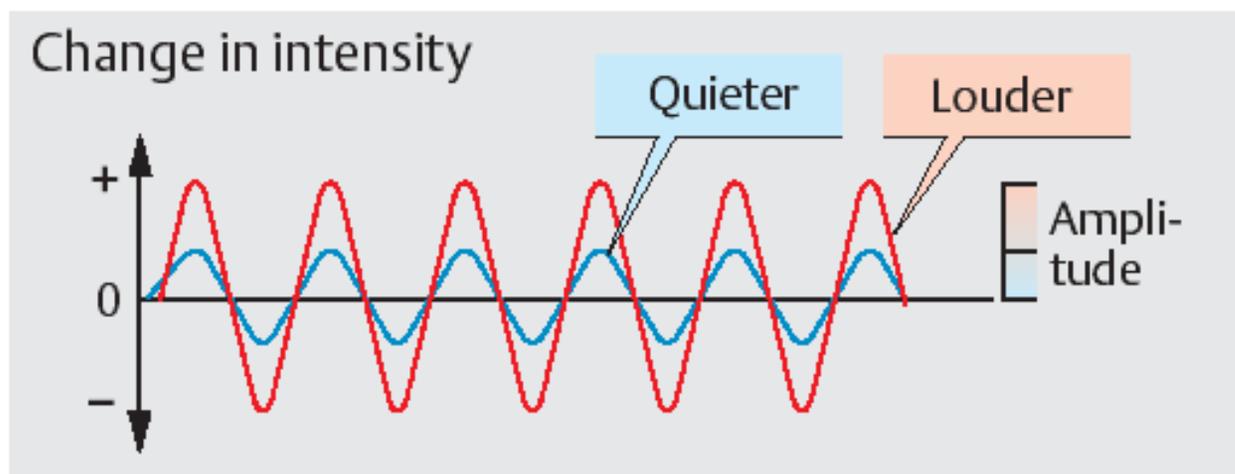
**La velocidad del sonido en el aire es de aproximadamente 344 m/s a 20° C,** lo que equivale a unos 1.200 km/h.

Es decir que necesita unos **3 s para recorrer 1 km.**

Velocidad del sonido		
	Medio	Velocidad (m/s)
Gas	Aire (0°C)	331
	Aire (20°C)	344
	Helio	965
Líquido	Agua (0°C)	1402
	Agua (20°C)	1482
	Agua marina	1522
Sólido	Aluminio	6420
	Acero	5941
	Granito	6000



Los sonidos se distinguen por su **tono** (frecuencia)

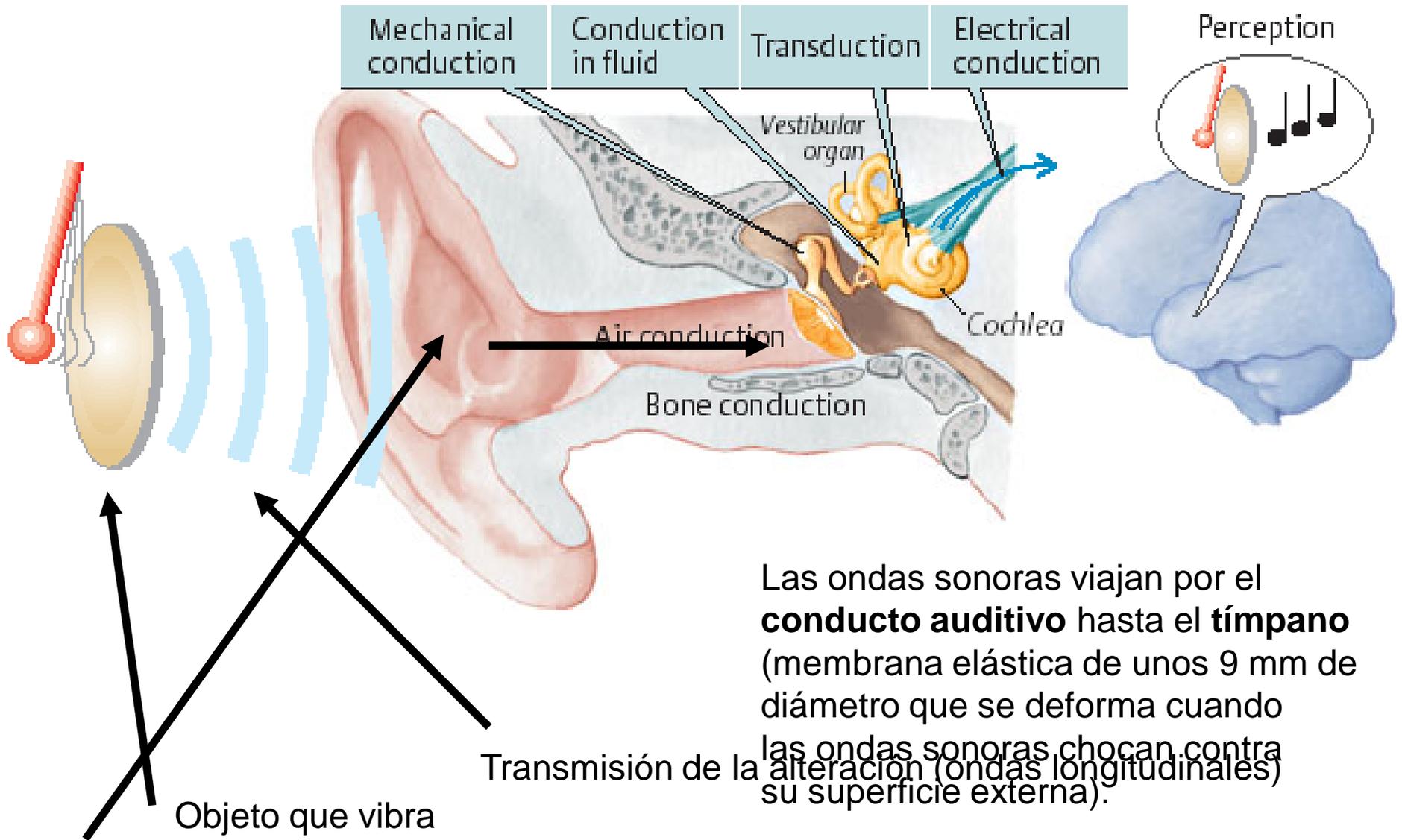


y su **intensidad** (amplitud)

El oído humano sólo puede percibir un rango de frecuencias entre **20** y **20.000 Hz**

**¿Qué etapas se suceden desde que se produce un estímulo sonoro hasta que el cerebro percibe el sonido?**

# Reception and conduction of sound stimuli

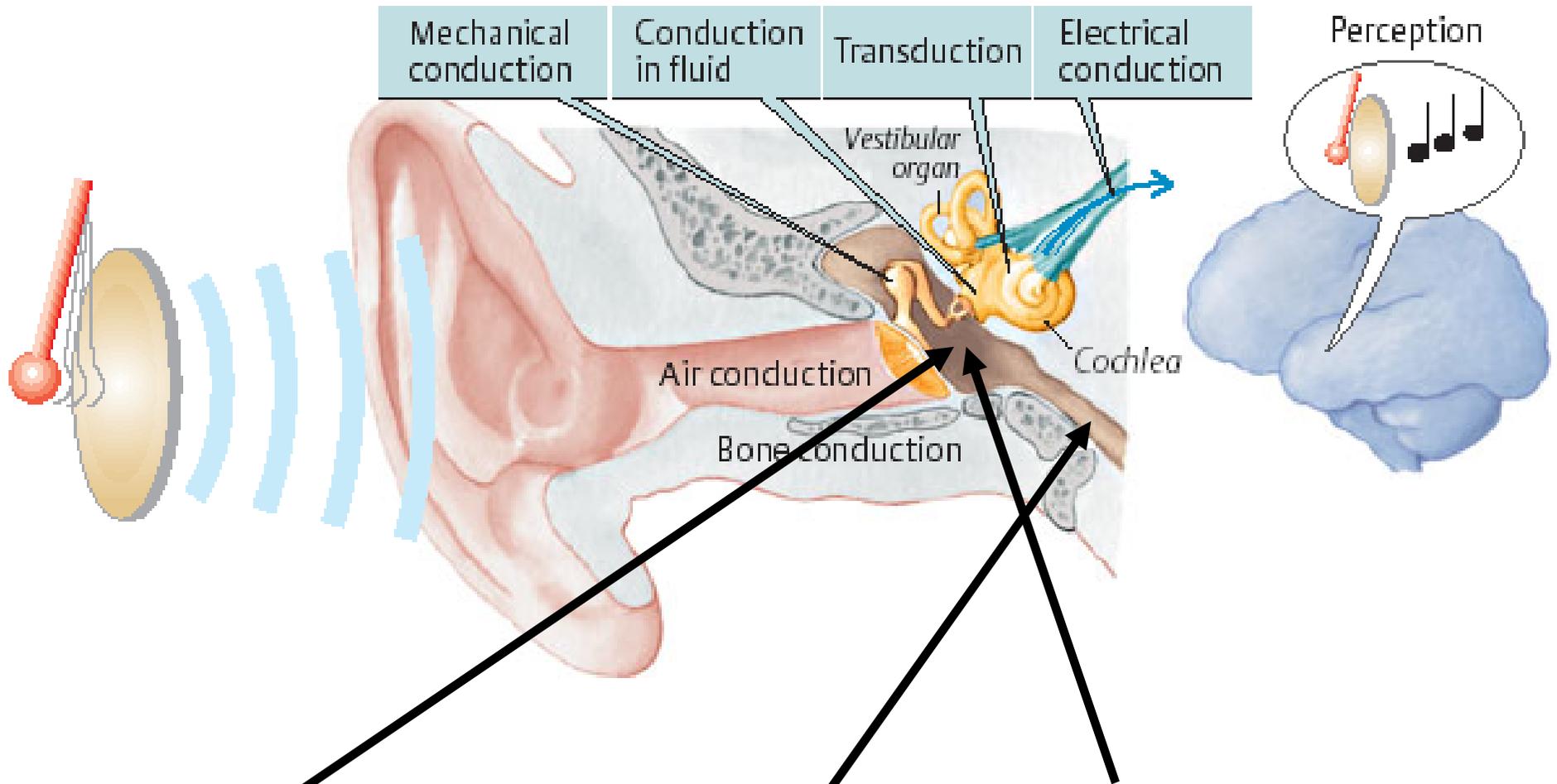


Las ondas sonoras viajan por el **conducto auditivo** hasta el **tímpano** (membrana elástica de unos 9 mm de diámetro que se deforma cuando las ondas sonoras chocan contra su superficie externa).

Objeto que vibra

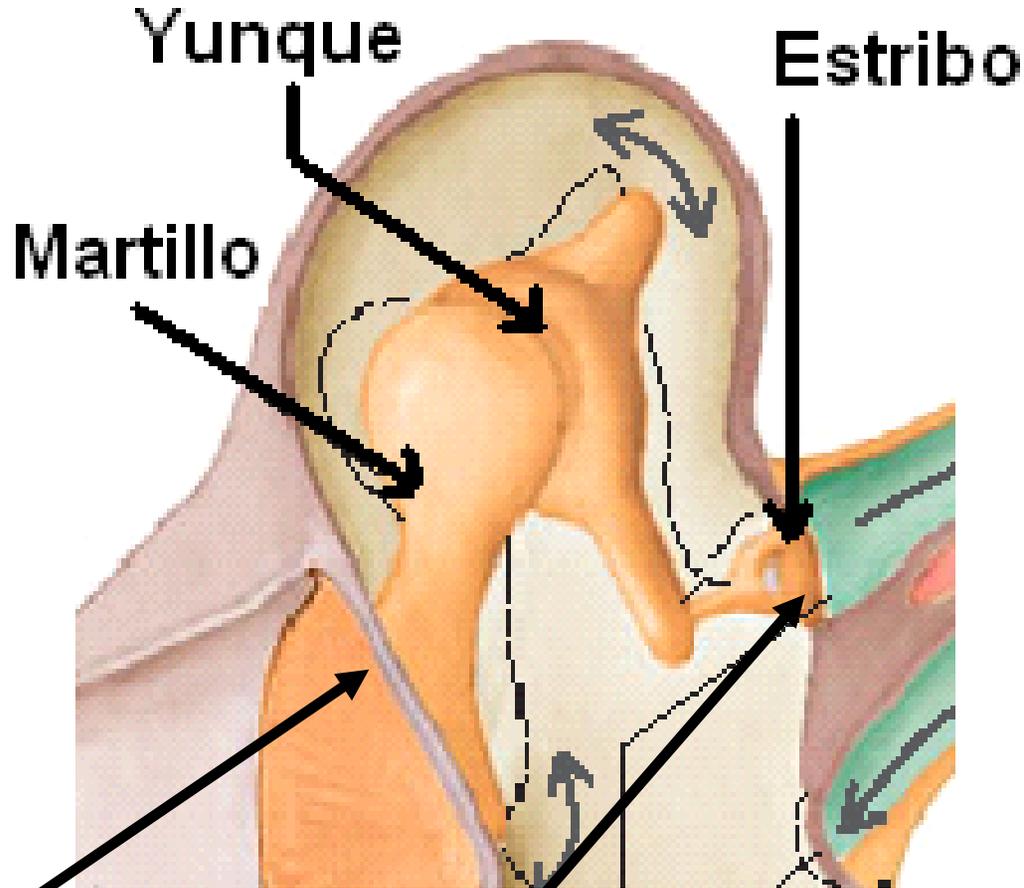
Las **orejas** dirigen las ondas sonoras al **orificio auditivo externo**

## Reception and conduction of sound stimuli



El **oído medio** es una cavidad llena de aire dentro del **hueso temporal**, que se abre a la **nasofaringe** por la **trompa de Eustaquio**

En el **oído medio** se encuentran **3** huesos pequeños

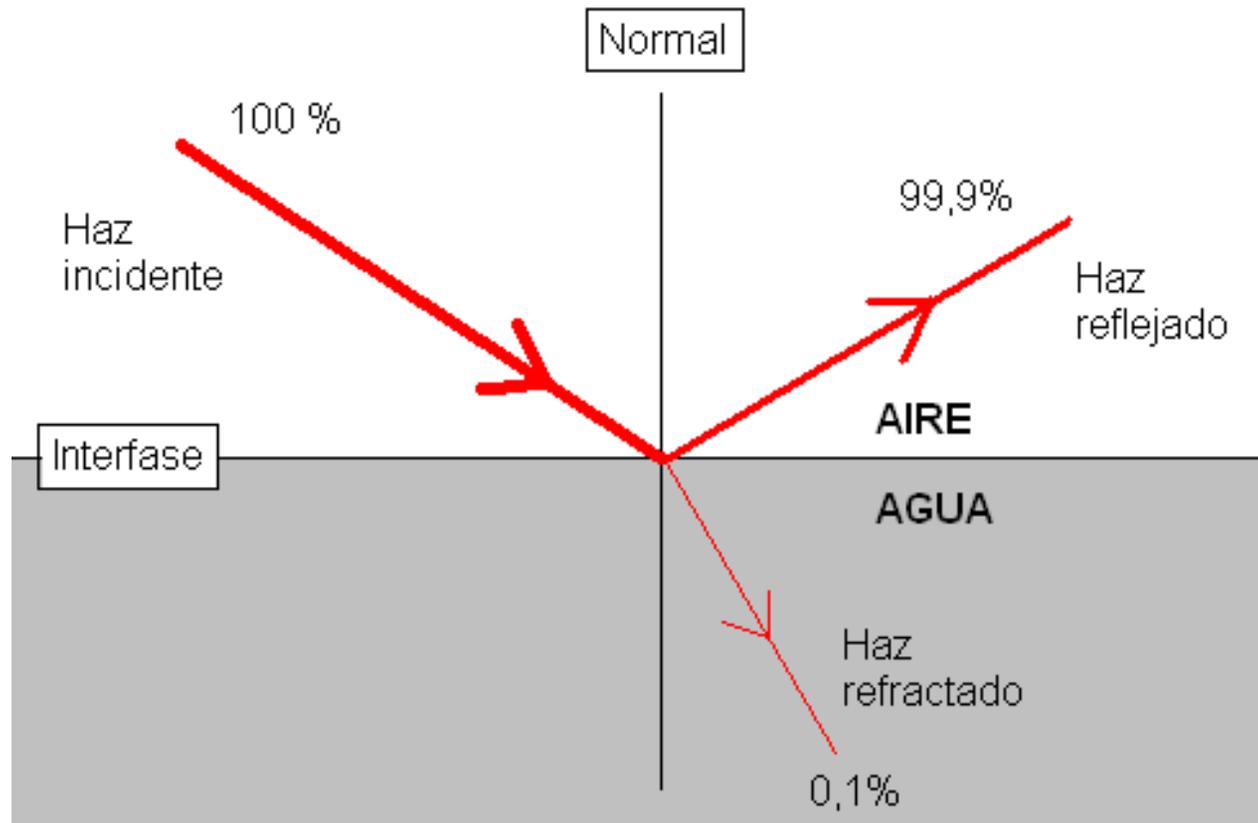


La **base del estribo** está unida a la **ventana oval**

El **mango del martillo** está adherido a la **cara interna** de la **membrana timpánica**

**¿Por qué el oído externo  
no se relaciona directamente  
con el oído interno?**

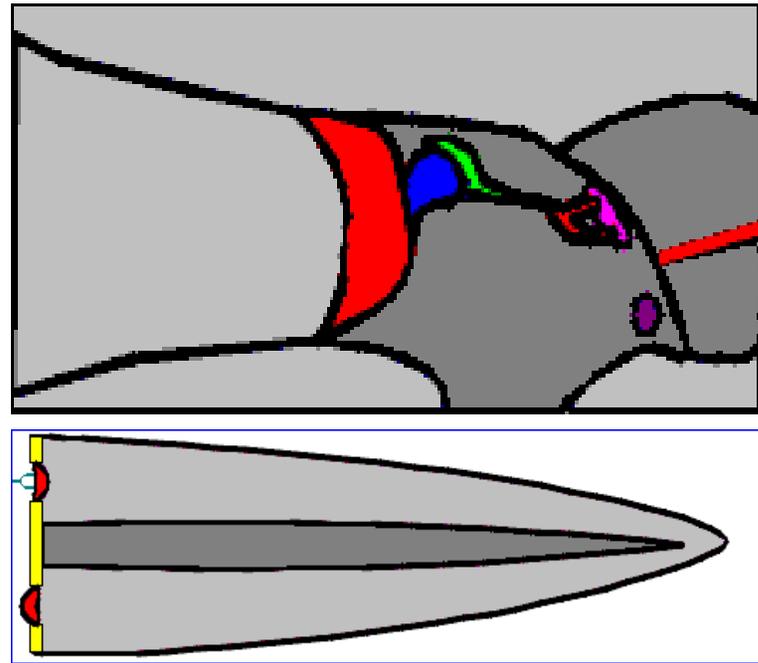
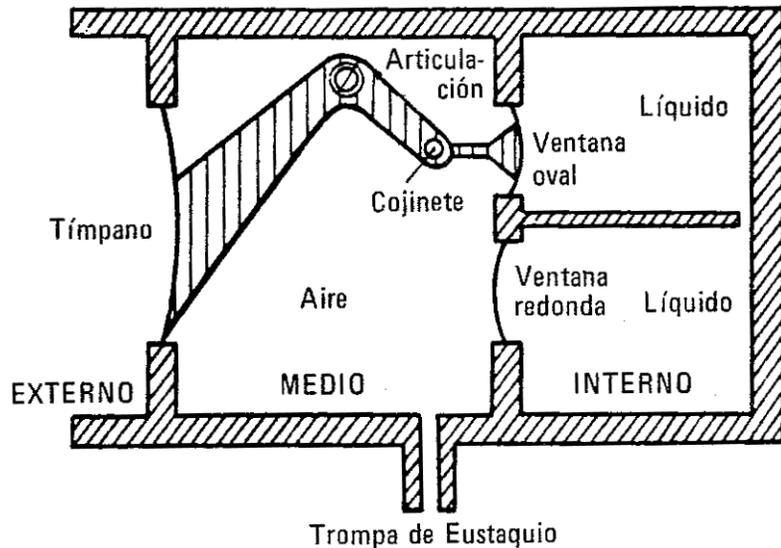
**¿Qué función cumplen los huesos  
martillo, yunque y estribo?**



Debido a que el oído interno está lleno de **líquido**, mientras que el oído medio está lleno de **aire**, se produce una pérdida de energía por la **diferencia de impedancias**

En el pasaje del aire al agua en general sólo el **0,1%** de la energía de la onda penetra en el agua, mientras que el 99,9% de la misma es reflejada.

En el caso del oído esto significaría una pérdida de transmisión de unos 30 dB.



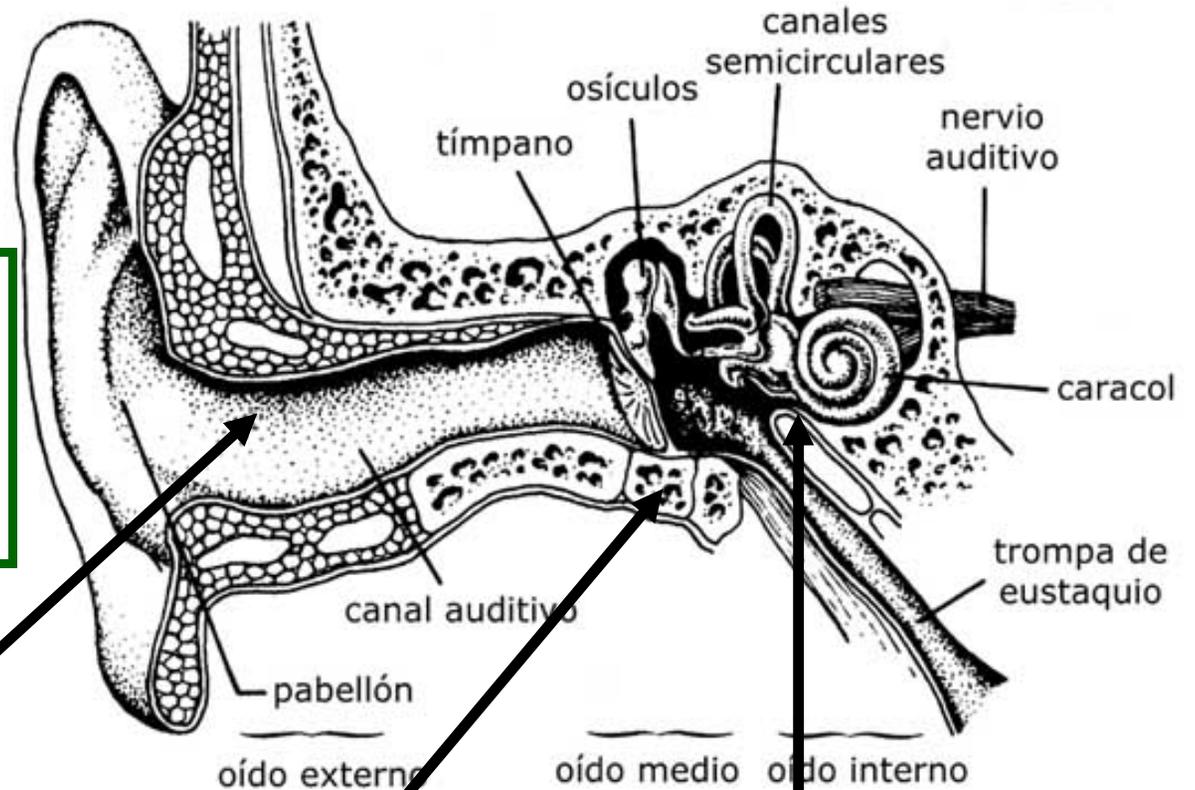
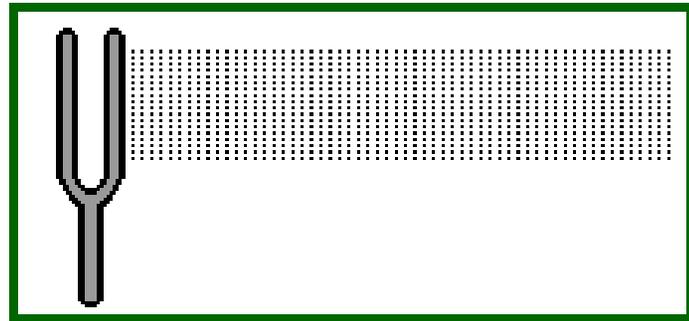
El oído interno compensa las diferencias de impedancias por dos vías complementarias:

Por un lado el **tímpano** tiene un **área** vibrante efectiva de unos **43 mm<sup>2</sup>** mientras que el estribo empuja la **ventana oval** cuya área es de **3,2 mm<sup>2</sup>**. Por lo tanto **la presión** (fuerza por unidad de superficie) **se incrementa unas 13,5 veces** ( $43 / 3,2 = 13,4375$ ).

Por otra parte el **martillo** y el **yunque** funcionan como un mecanismo de **palanca** y la relación entre ambos brazos de la palanca es de 1,31 a 1. La **ganancia mecánica** de este mecanismo de palanca **es de 1,3**.

La **combinación de ambos efectos** hace que el incremento total de la presión sea de unas **17,4 veces** ( $13,4375 \times 1,3 = 17,46875$ ).

0 1 2 3 cm

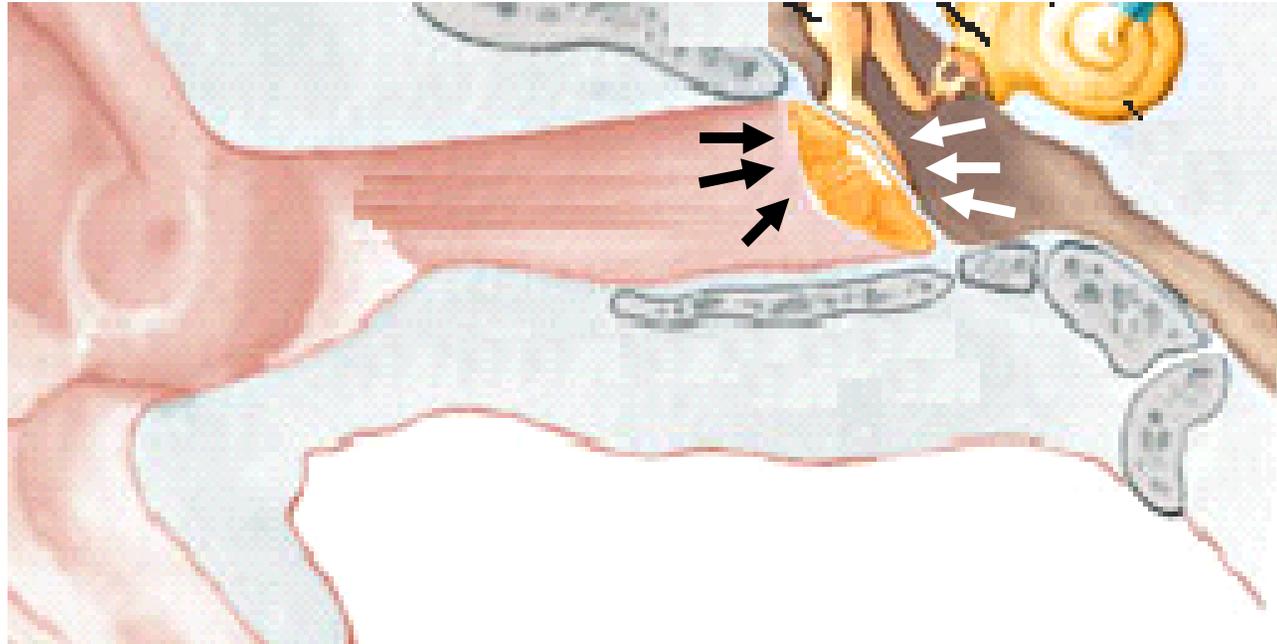


En el **oído externo** se **canaliza** la energía acústica.

En el **oído medio** se la **transforma** en energía mecánica.

En el **oído interno** se **transforma** en **impulsos eléctricos**.

**¿Qué función cumple  
la trompa de Eustaquio?**

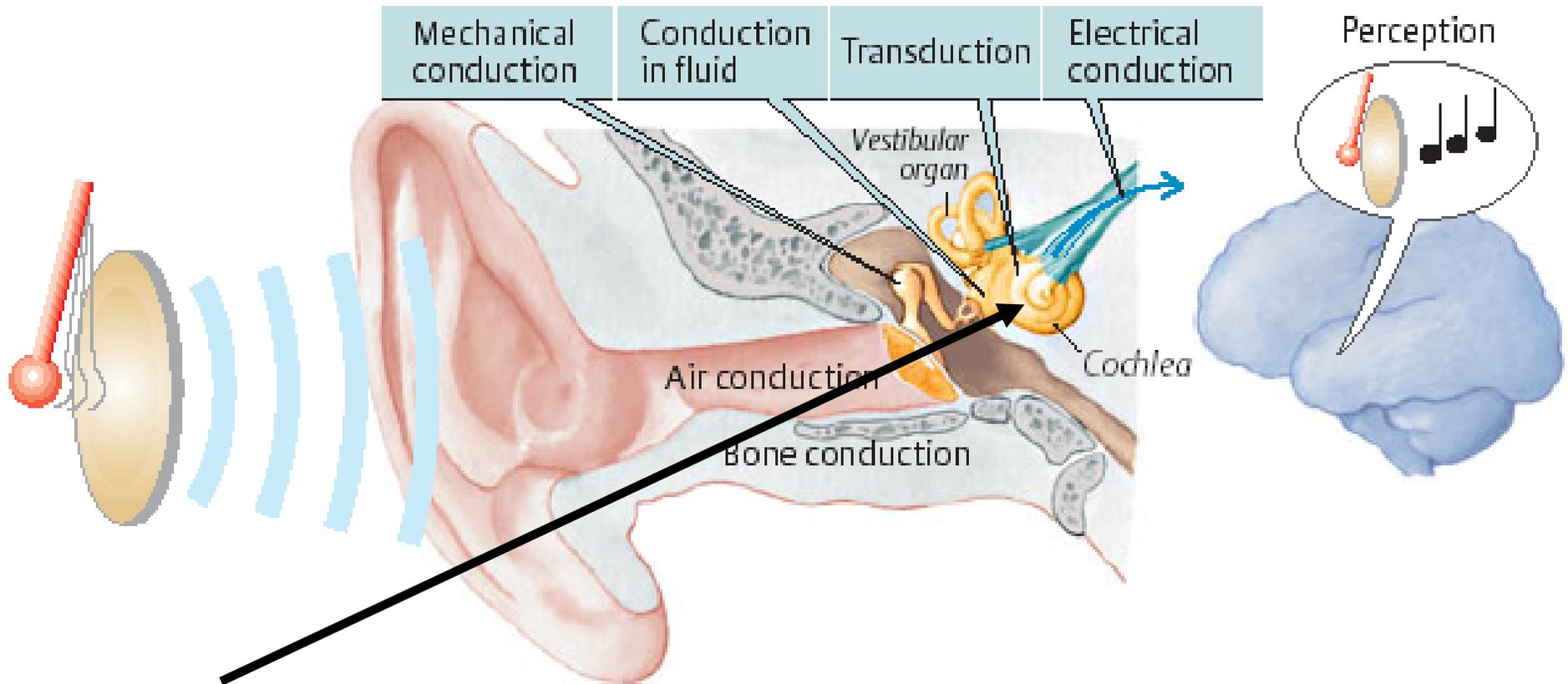


Para que el tímpano pueda vibrar y para que los huesecillos puedan moverse y cumplir con su función, el **oído medio debe mantener una presión igual a la atmosférica**, lo cual se logra a través de la **trompa de Eustaquio** que comunica la pared anterior del oído medio con la cavidad nasal, equilibrando las presiones.

Cualquier elemento extraño, como **líquido** o **pus**, que obstaculicen el movimiento libre del sistema tímpano-huesecillos u obstruya la **trompa de Eustaquio** puede alterar la transmisión de la onda sonora.

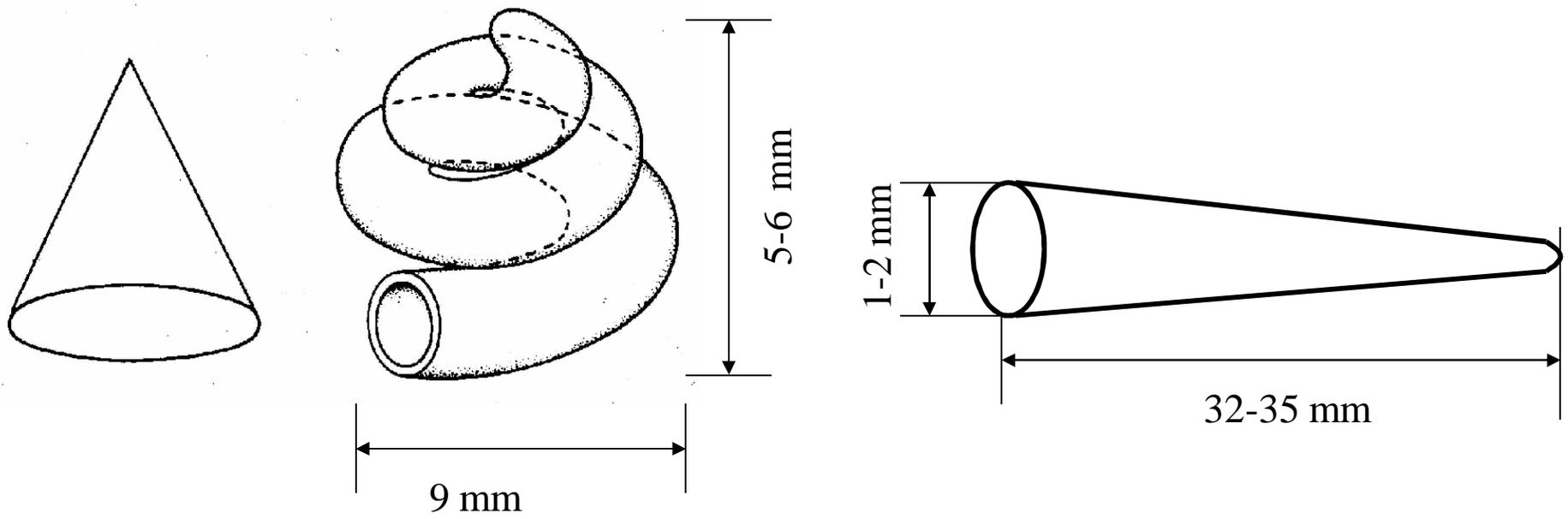
**¿Cómo está constituido  
el oído interno?**

## Reception and conduction of sound stimuli

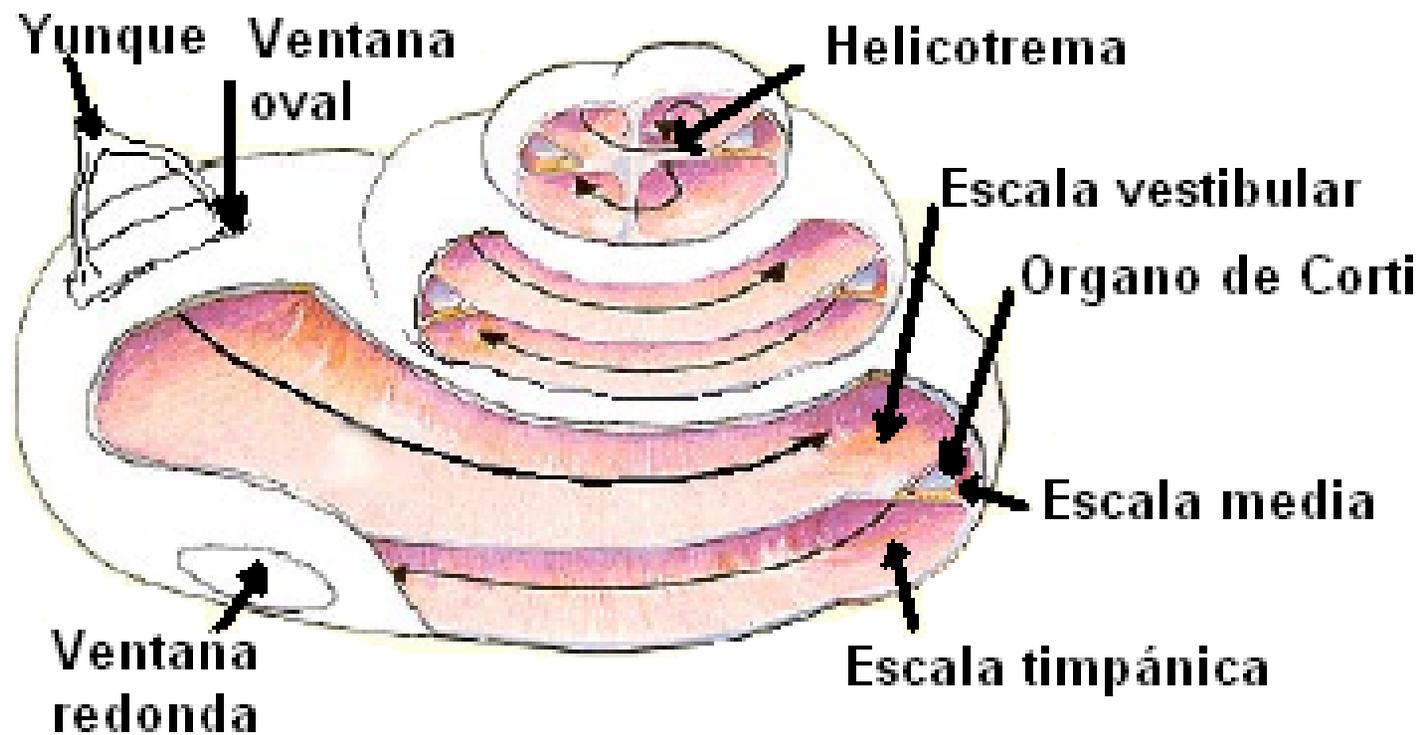


El **oído interno** se compone de dos partes, una dentro de la otra: El **laberinto óseo** alberga al **laberinto membranoso** (rodeado por el **perilinf**a cuya composición es muy similar a la del **liquido extracelular**) .

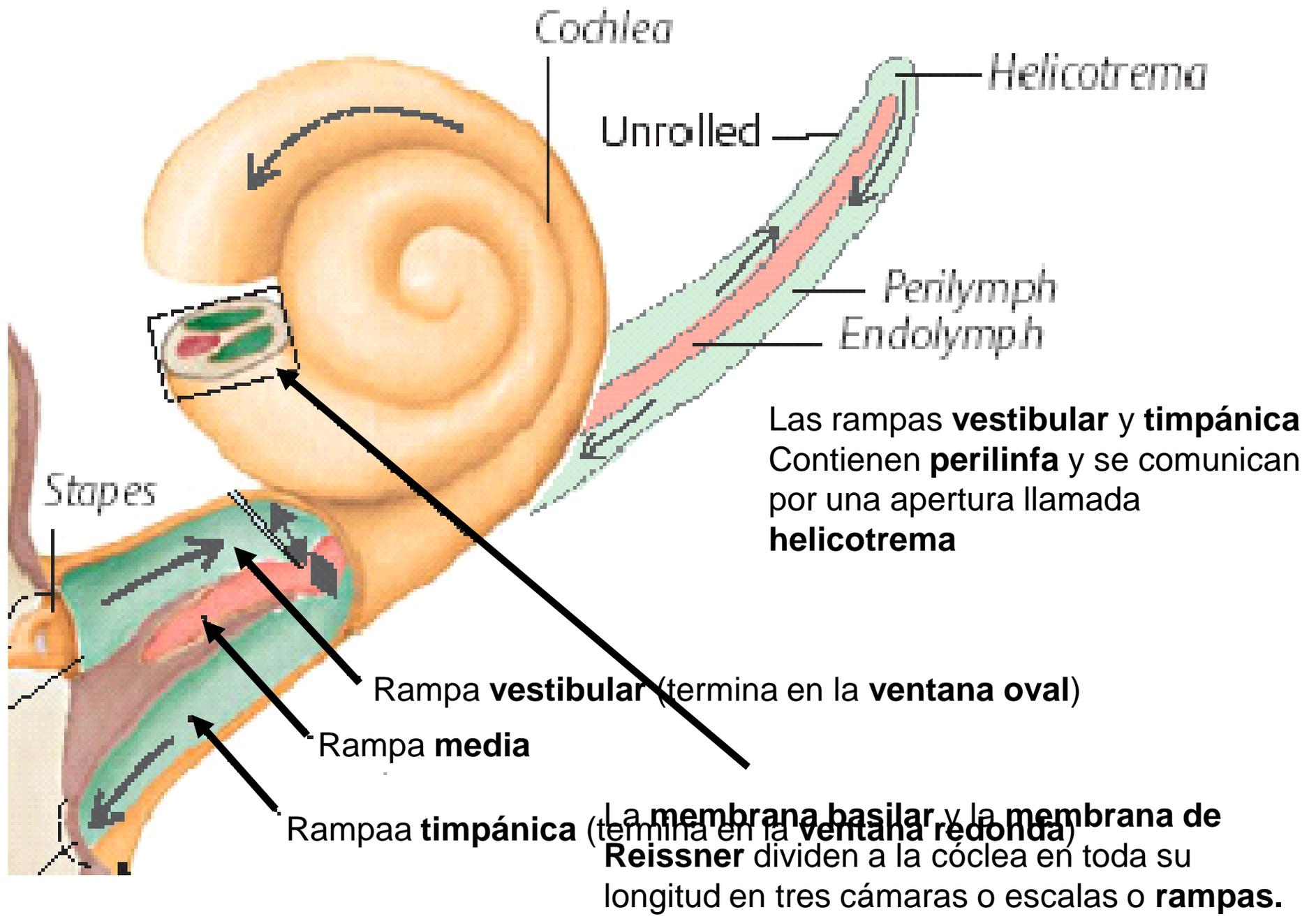
El **laberinto membranoso** contiene **endolinf**a más similar al **líquido intracelular**.

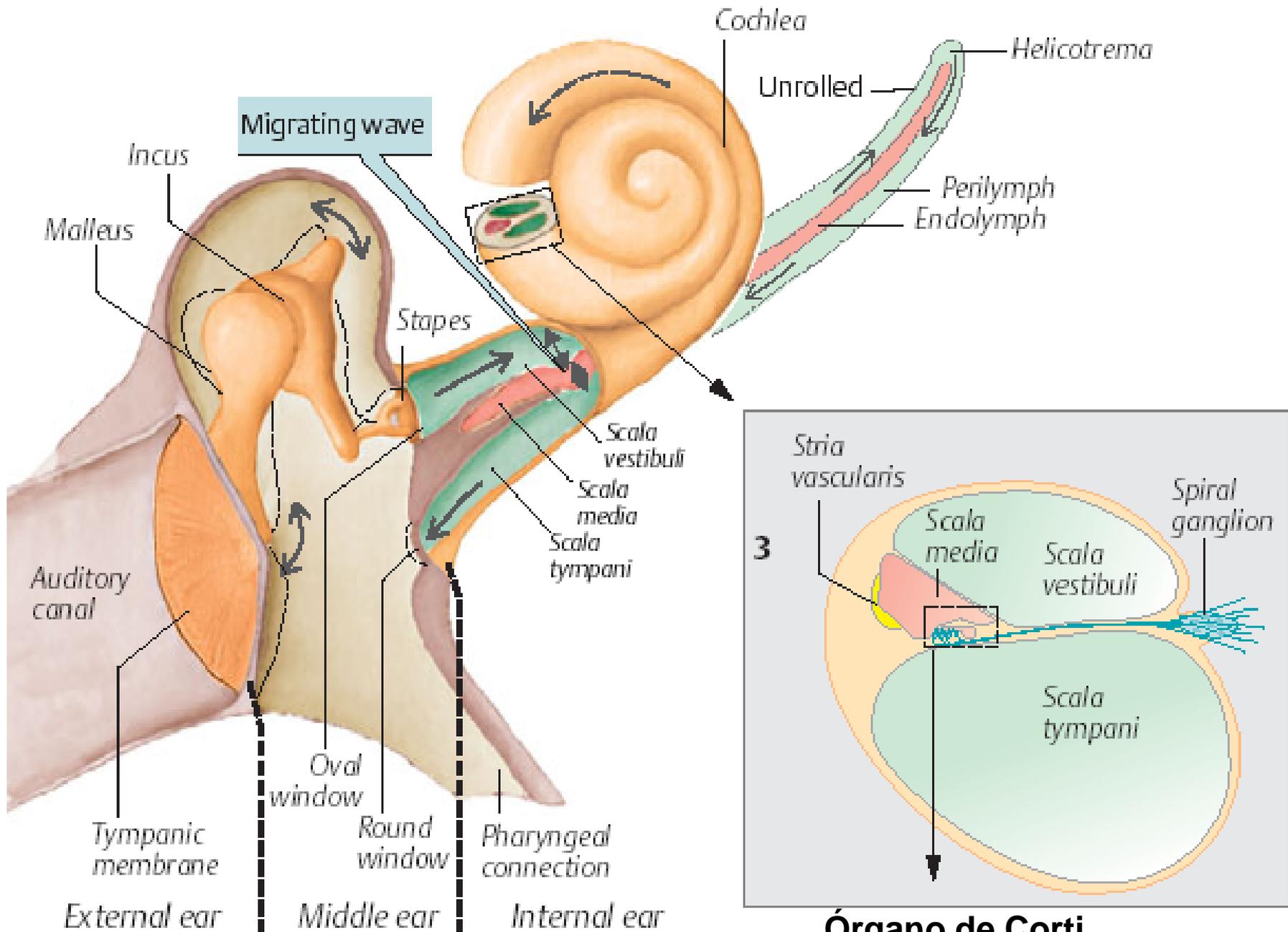


La **cóclea** del laberinto es un tubo enrollado **2,5 vueltas** y de unos **35 mm** de longitud.

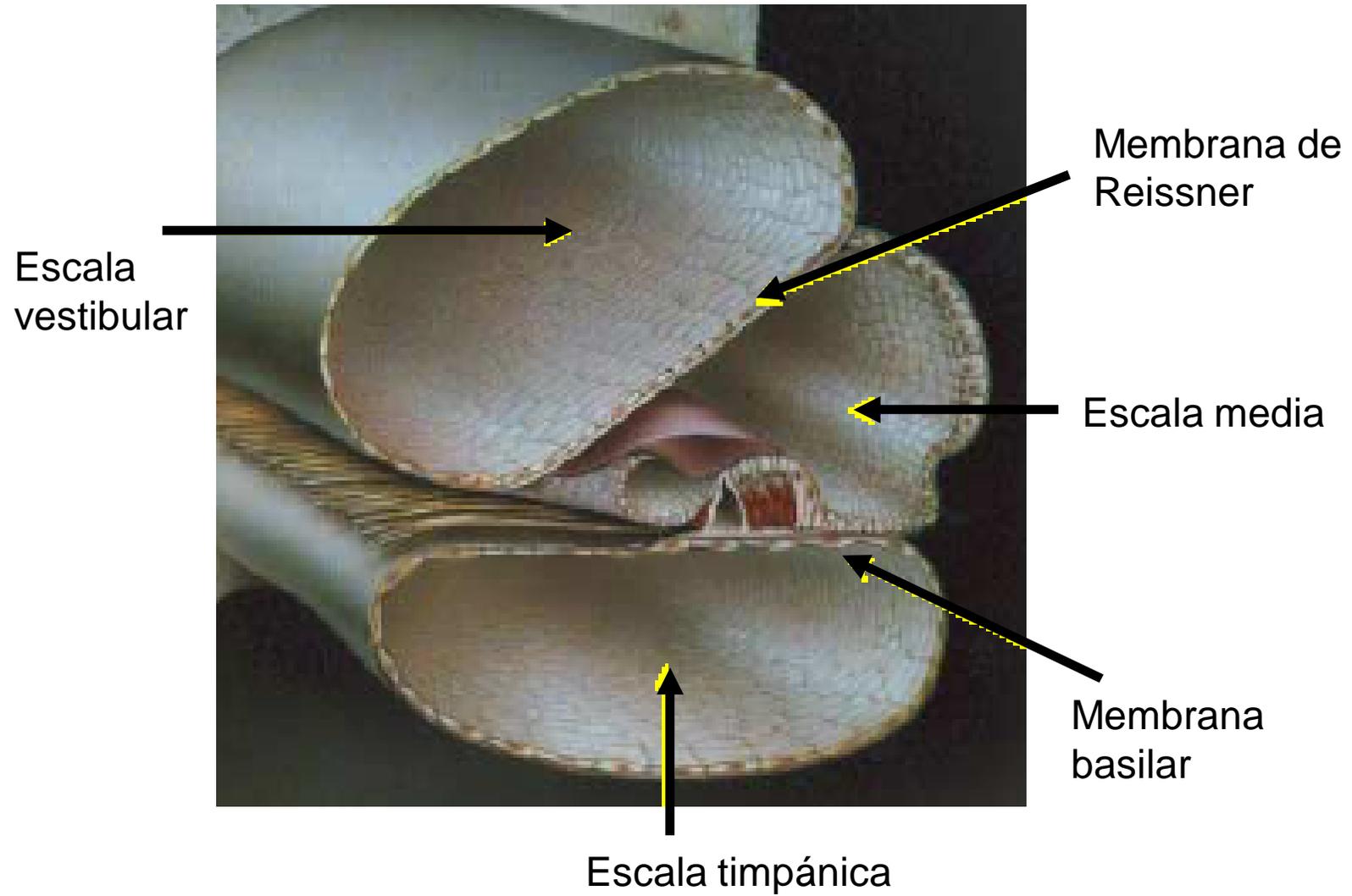


La **ventana oval** es el inicio de la rampa vestibular, mientras que la rampa timpánica termina en la **ventana redonda**, estructura sellada por una membrana elástica (tímpano secundario), la cual puede desplazarse siguiendo los movimientos de la **perilinf**a.



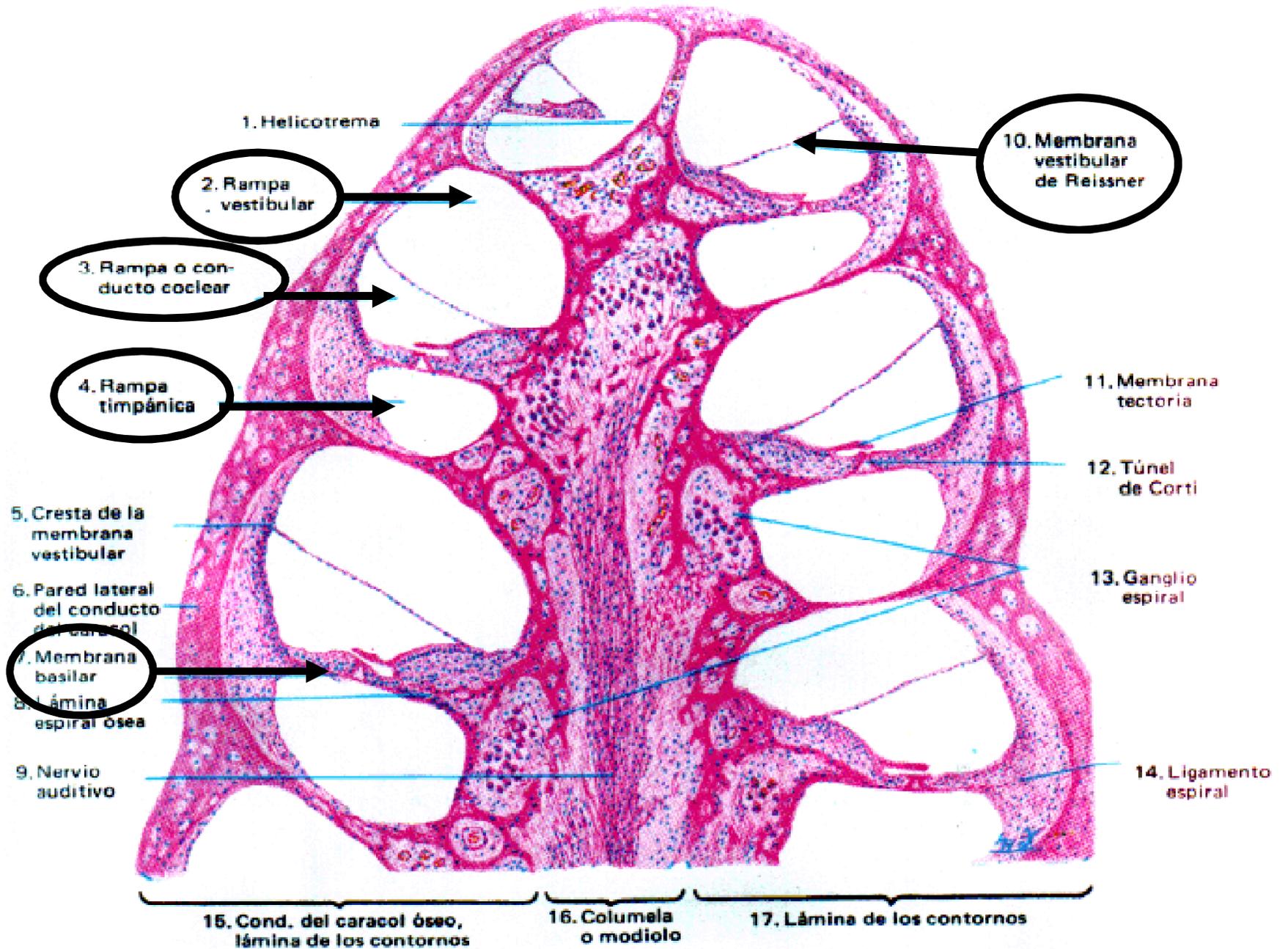


**Órgano de Corti**  
(sobre la membrana basilar)

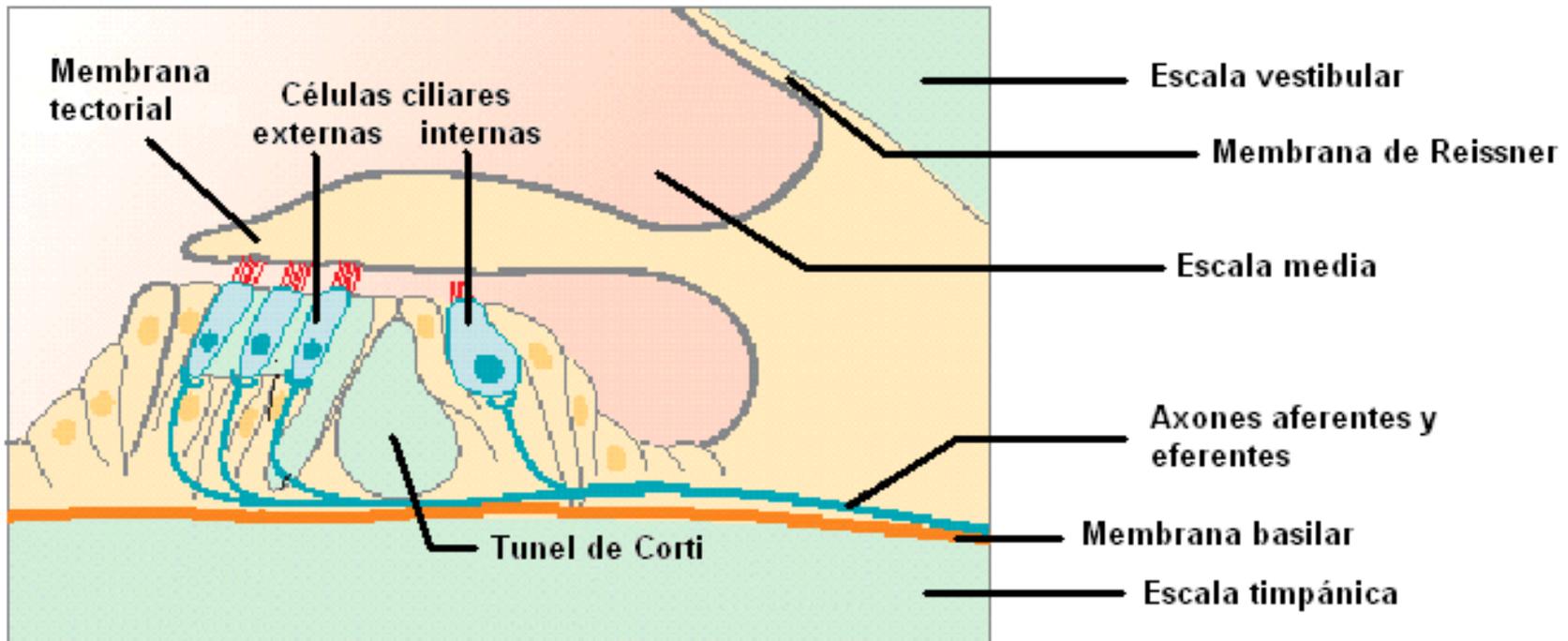


Las tres rampas o escalas son, en resumen, sacos llenos de líquido incompresible.

# OIDO INTERNO

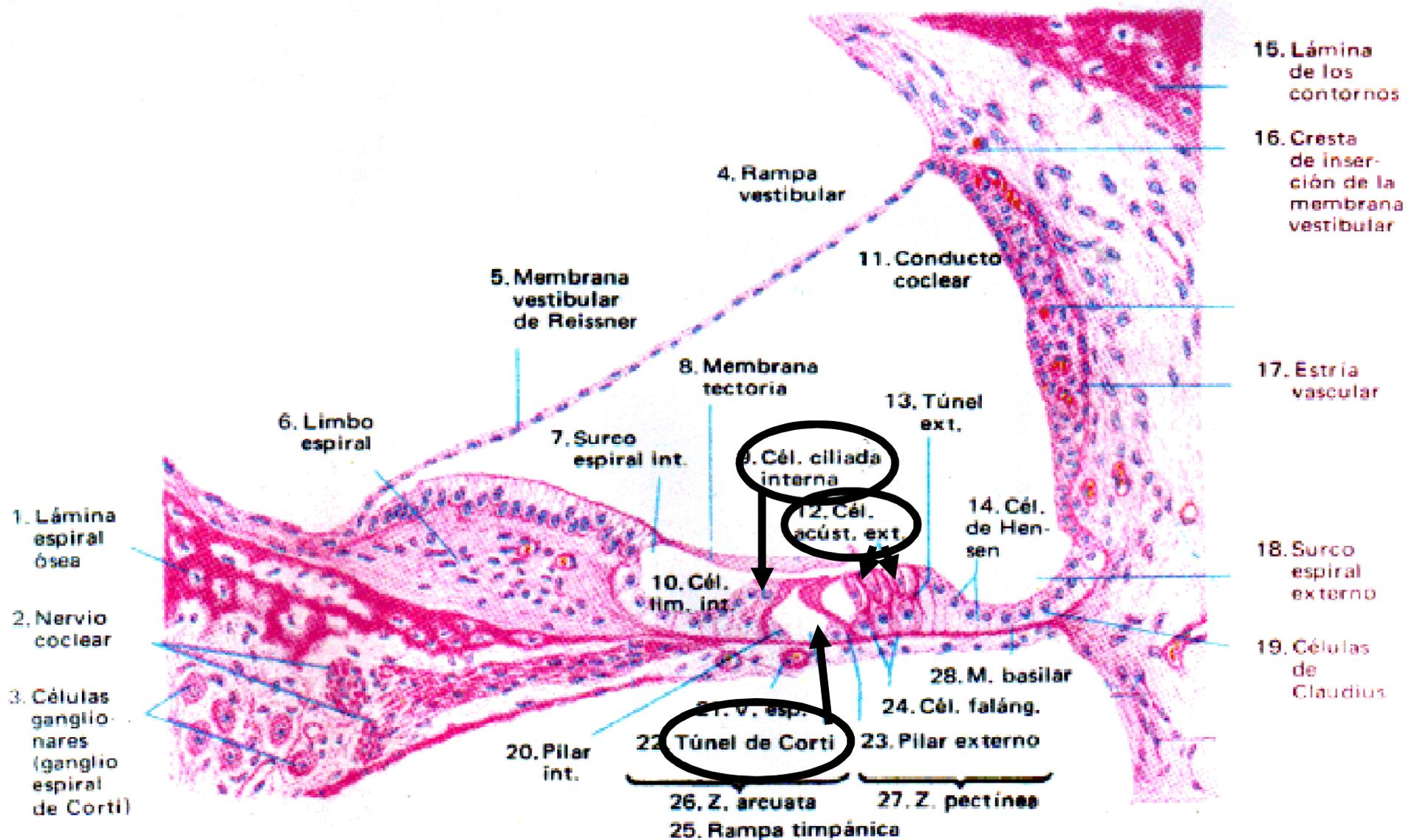


**¿Qué es el órgano de Corti?**



Sobre la membrana basilar se encuentra el **órgano de Corti**, donde se ubican los receptores auditivos, las **células ciliares o pilosas (CP)**; que son de dos tipos, externas e internas (CPE y CPI), denominadas así de acuerdo a su localización con respecto al **modiolo** (eje de la cóclea); se disponen en 4 hileras (3 externas y 1 interna) y se llaman pilosas porque en su superficie tienen **estereocilios de actina**, también poseen un **cinocilio**, de mayor longitud que los estereocilios.

Hay alrededor de **20.000 CPE** y **3.500 CPI** en cada oído. Las CP se orientan en forma variable, pero **todas exponen sus cilios hacia la rampa media**; por encima de ellas se ubica la **membrana tectorial**.

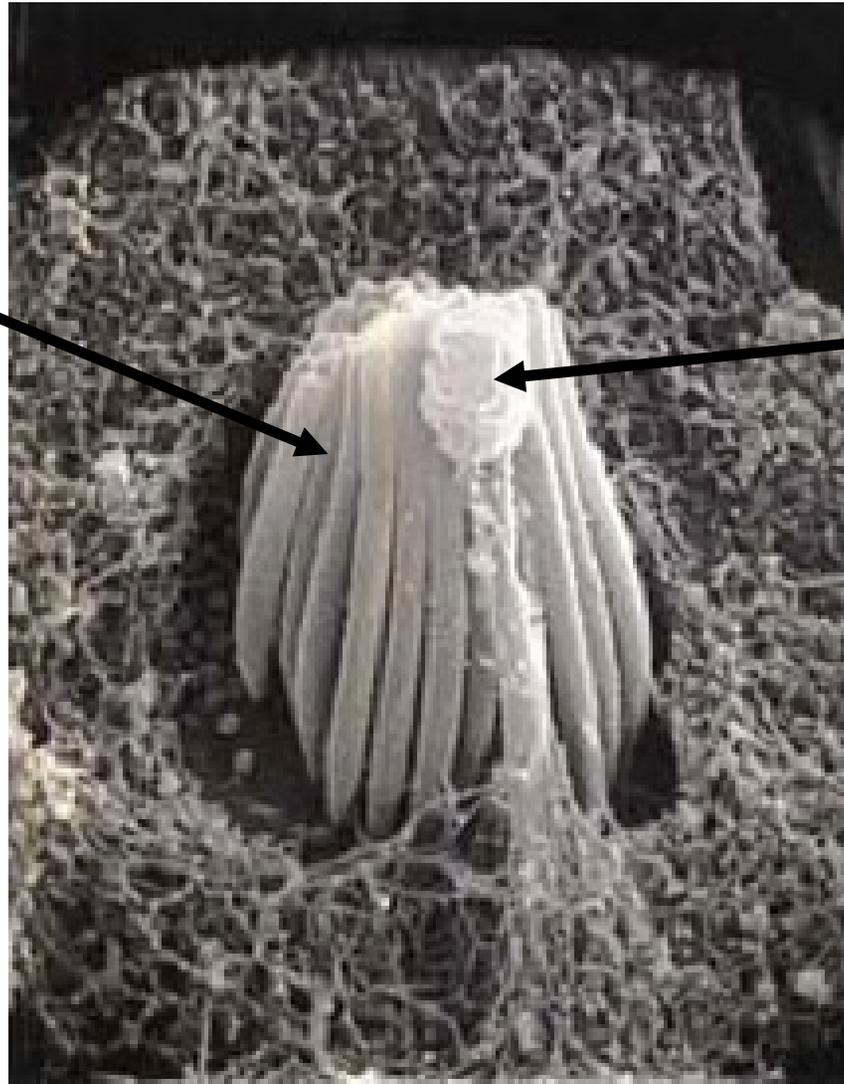


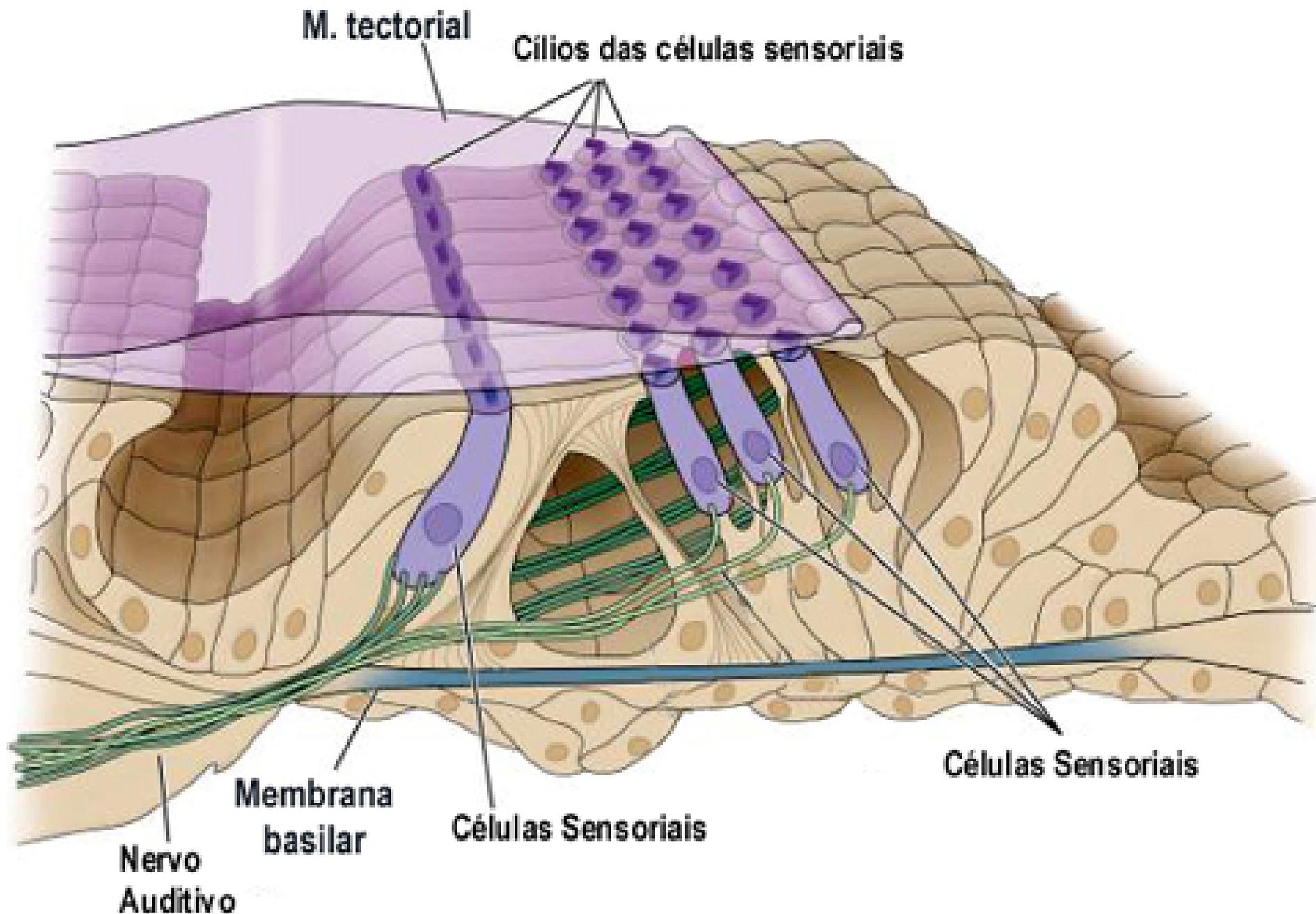
## Imagen de una célula pilosa al microscopio electrónico

Estereocilios



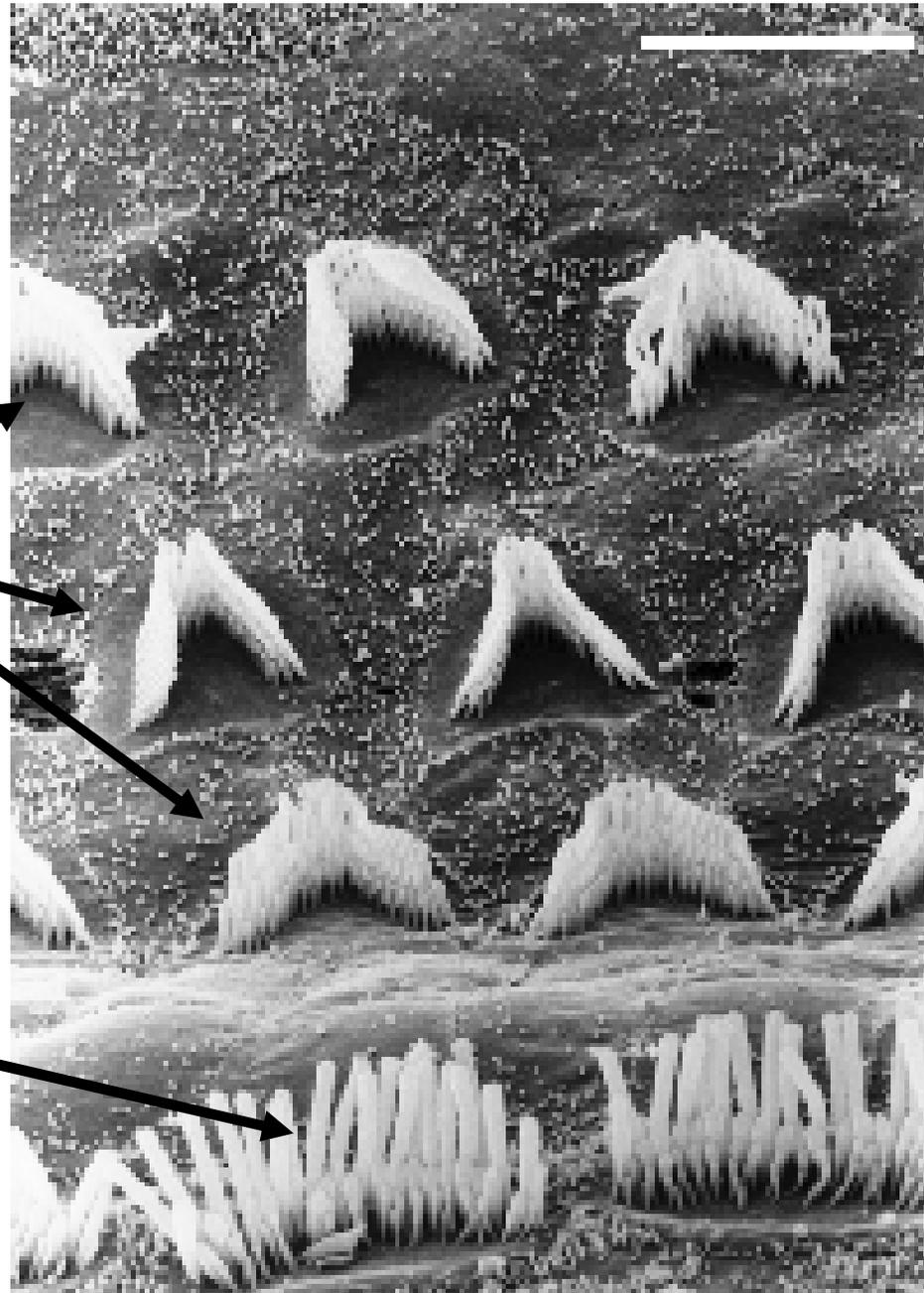
Cinocilio



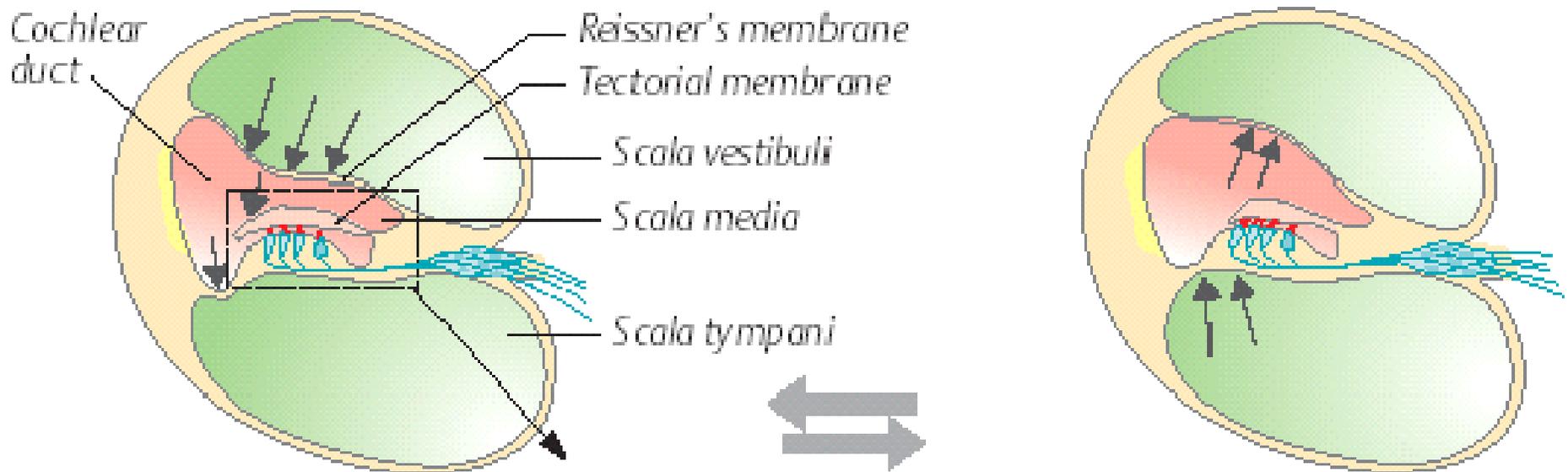


Cilios de las  
CPE

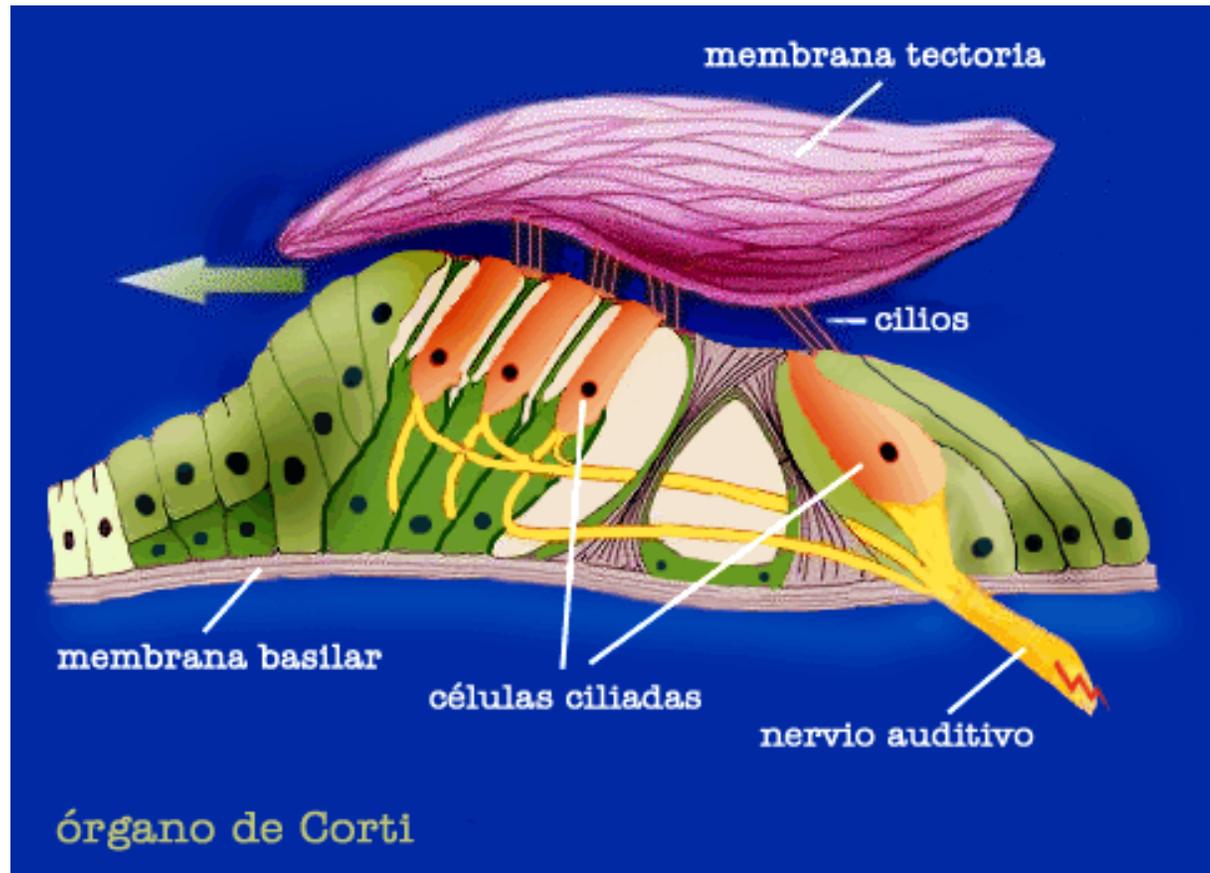
Cilios de las  
CPI



**¿Qué ocurre cuando el estribo  
golpea sobre la ventana oval?**

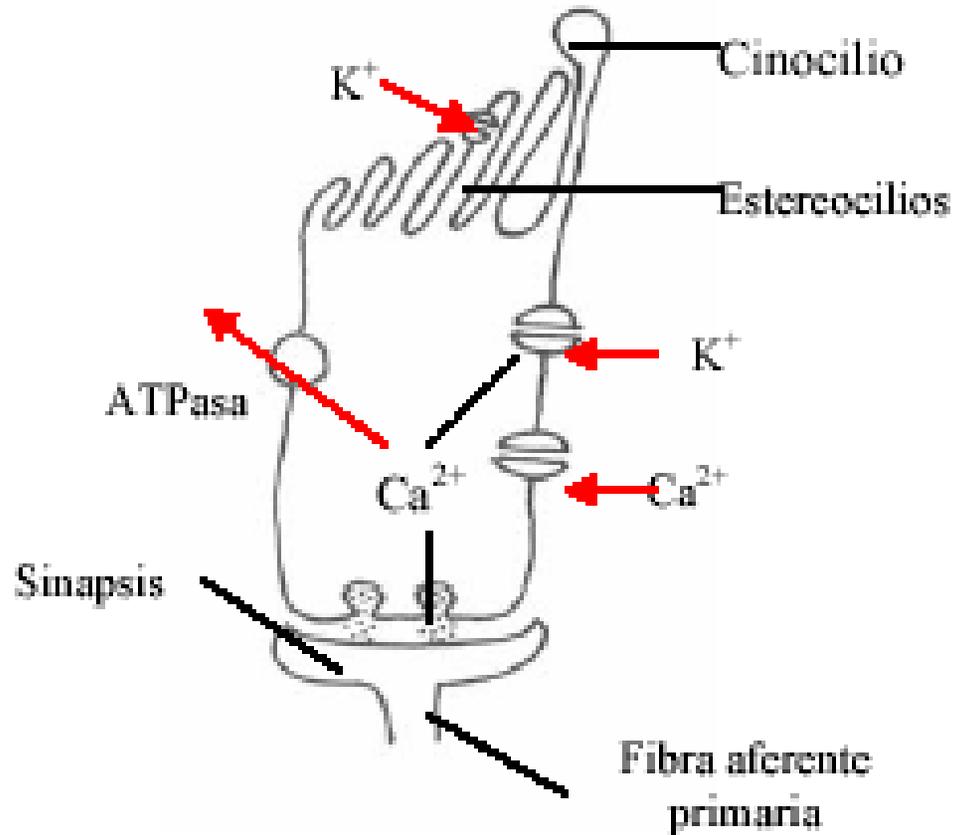


- 1- Cuando el **estribo** se desplaza, mueve a la **perilinf**a de la **rampa vestibular**.
- 2- El movimiento de la **perilinf**a genera movimientos en la **membrana de Reissner**.
- 3- El movimiento de la **membrana de Reissner** se transmite a la **endolinf**a de la **rampa media** y por lo tanto a la **membrana basilar**
- 4- **La membrana basilar** transmite el movimiento a la **perilinf**a de la **rampa timpánica** y al **tímpano secundario** en la **ventana redonda**.



Cuando se mueve la **membrana basilar**, las **células pilosas** son desplazadas hacia la **membrana tectorial** y sus cilios chocan contra ésta.

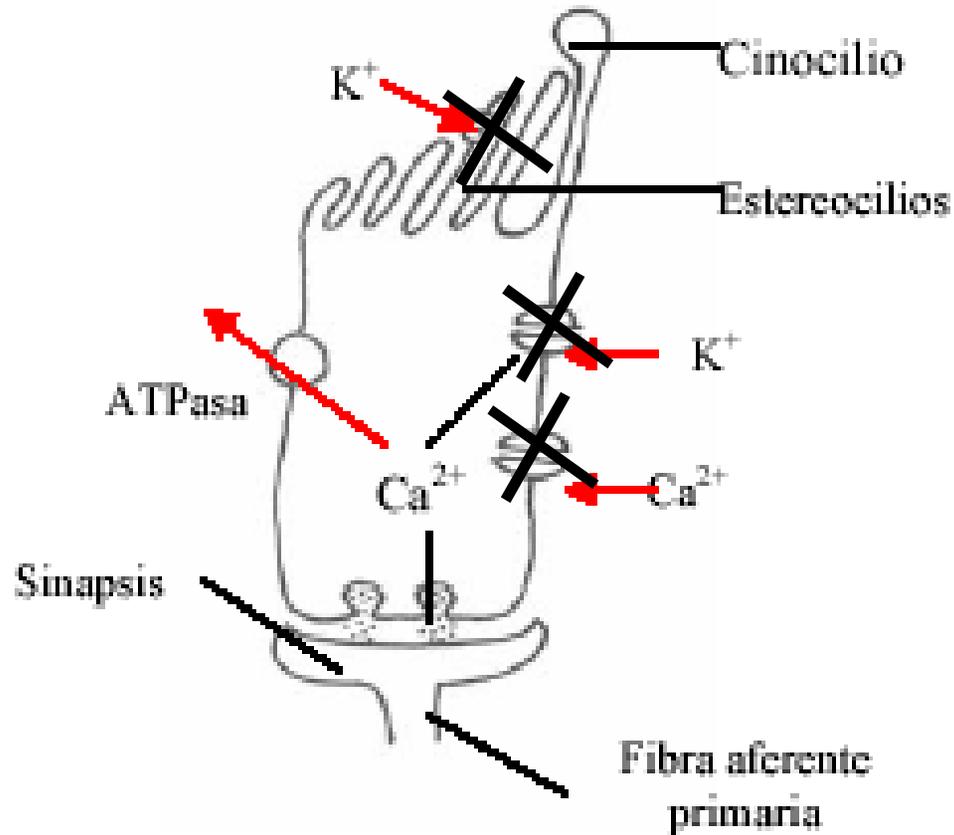
Debido a este roce mecánico los **cilios** de las **células pilosas** se deforman, generando **cambios en la tensión de la membrana plasmática**, lo cual **modifica la conductancia de los canales iónicos sensibles a la distensión** (canales para  $K^+$ ,  $Na^+$  y  $Ca^{2+}$ ), generando cambios en el potencial de membrana de las células pilosas.



En reposo, el potencial de membrana de la **células pilosas** es de unos **-60 mV**.

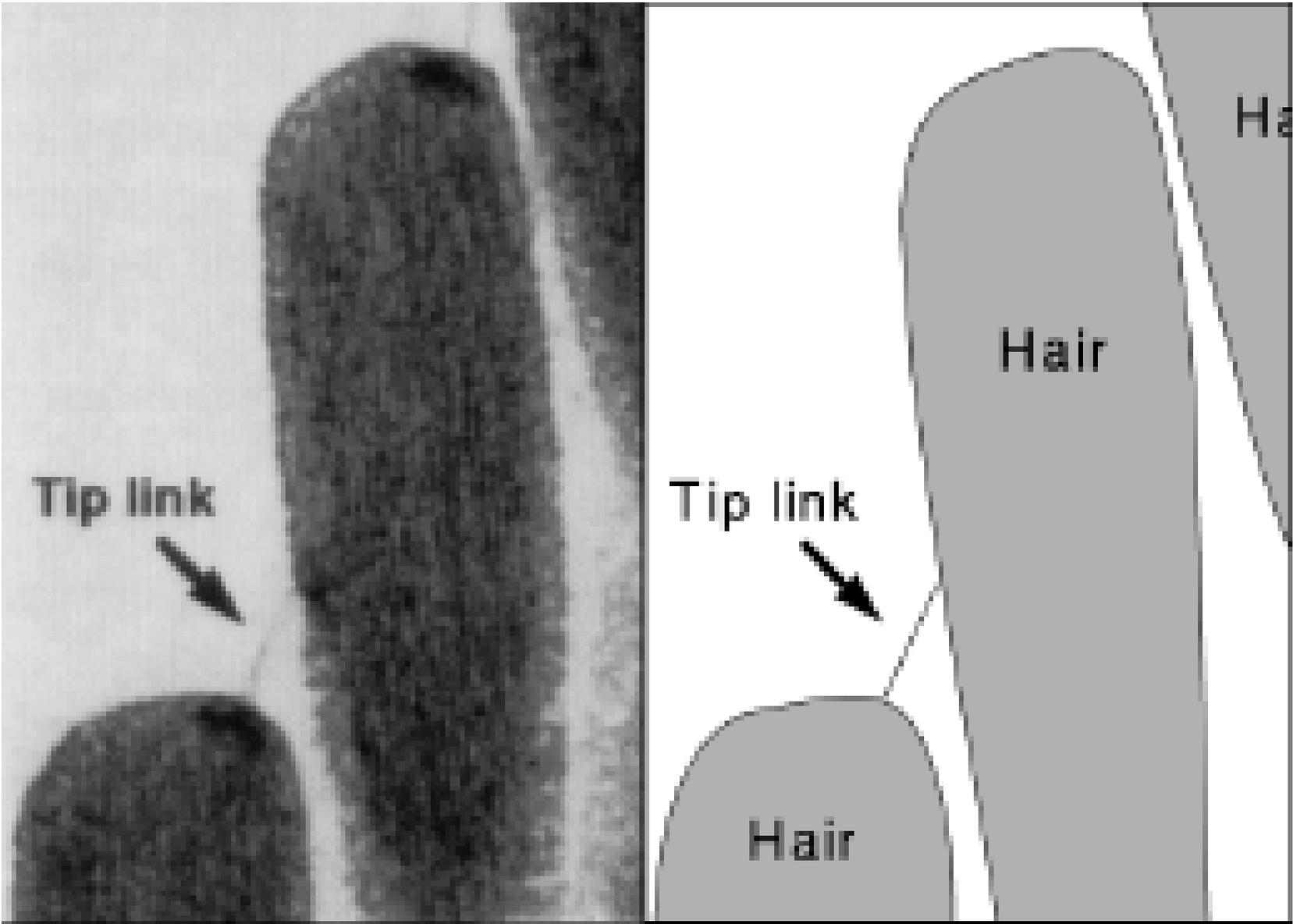
Debido a que el  $K^+$  predomina en **perilinf** cuando los canales se abren fluye al interior de la célula produciendo una **despolarización** de la membrana celular.

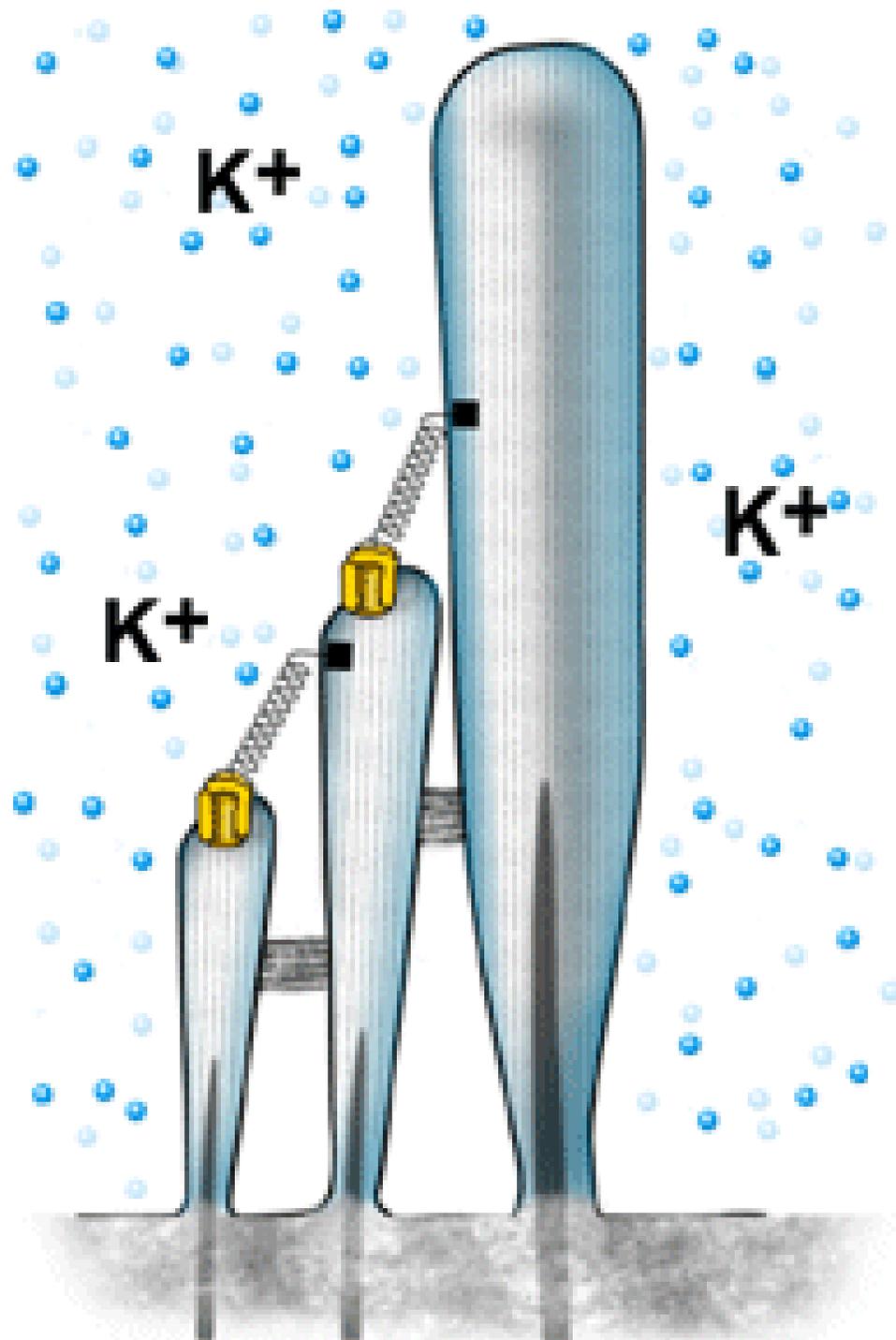
Esto a su vez, **abre canales de  $Ca^{2+}$  sensibles a voltaje** y con la entrada de  $Ca^{2+}$  a la célula estimula la **liberación de un neurotransmisor**, el cual es liberado en la sinapsis con la primera neurona aferente.



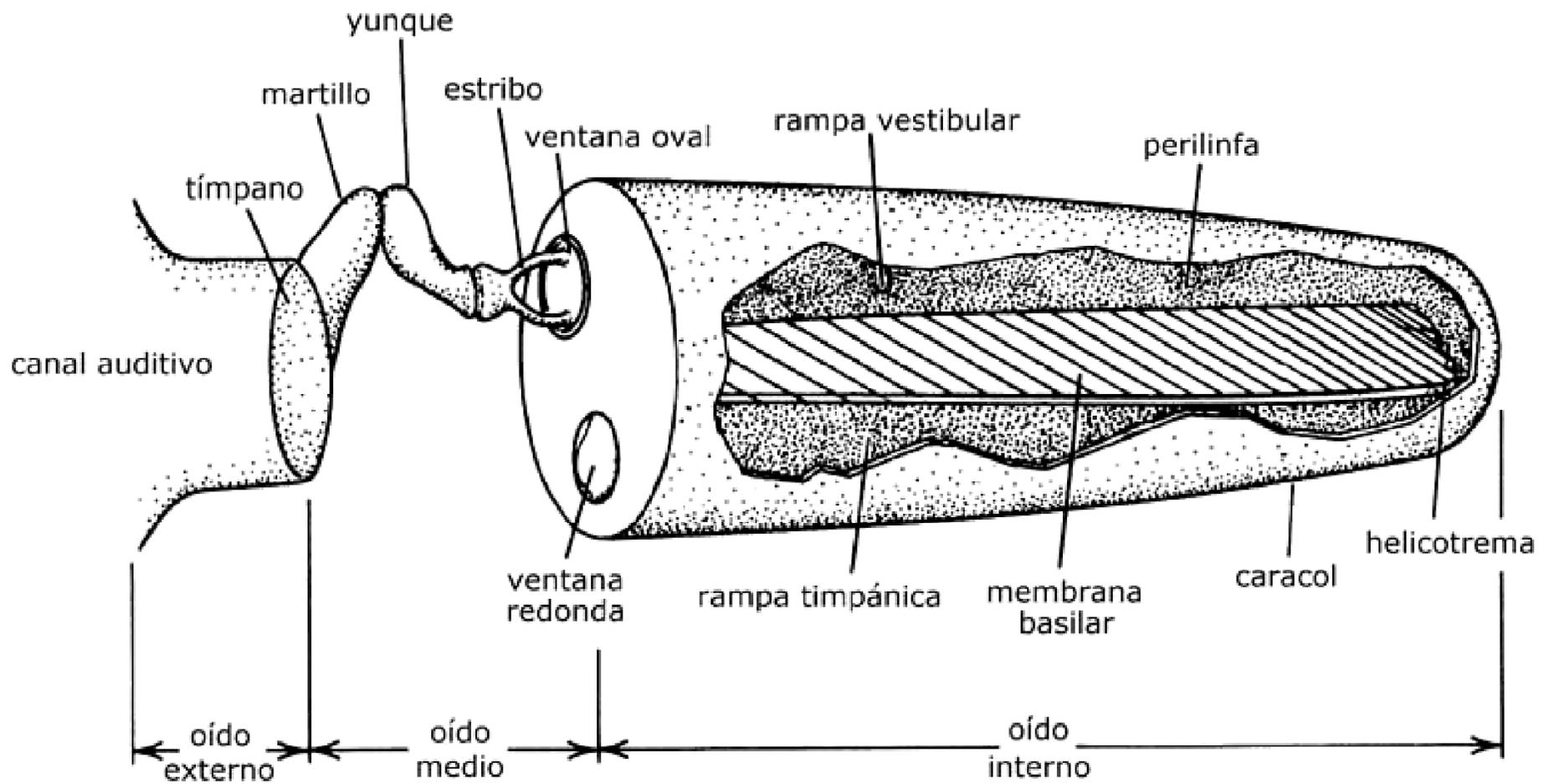
Cuando los **estereocilios** se inclinan en la **dirección contraria** se produce el **cierre** de los canales abiertos y la membrana se **hiperpolariza**.

En cuanto a la naturaleza del **neurotransmisor liberado**, existe evidencia de que es probablemente **glutamato**.

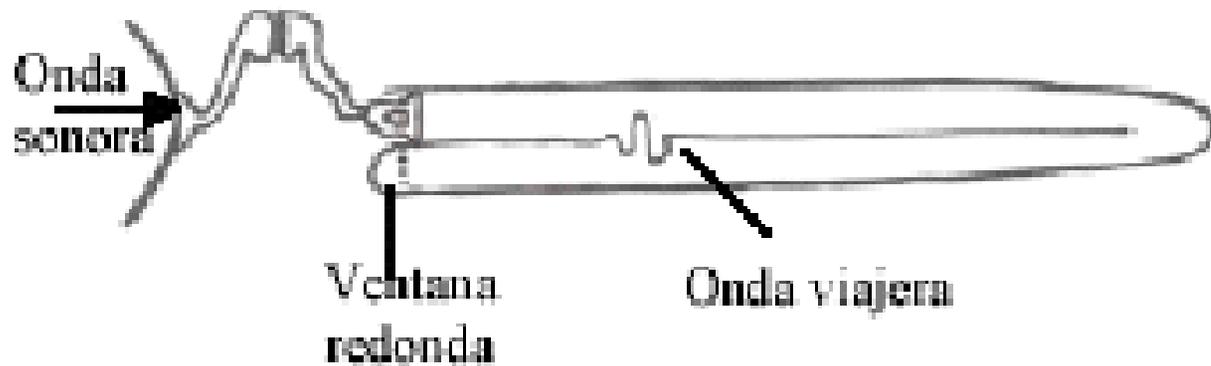




**¿Cómo discrimina el órgano de Corti  
la frecuencia de la onda sonora?**



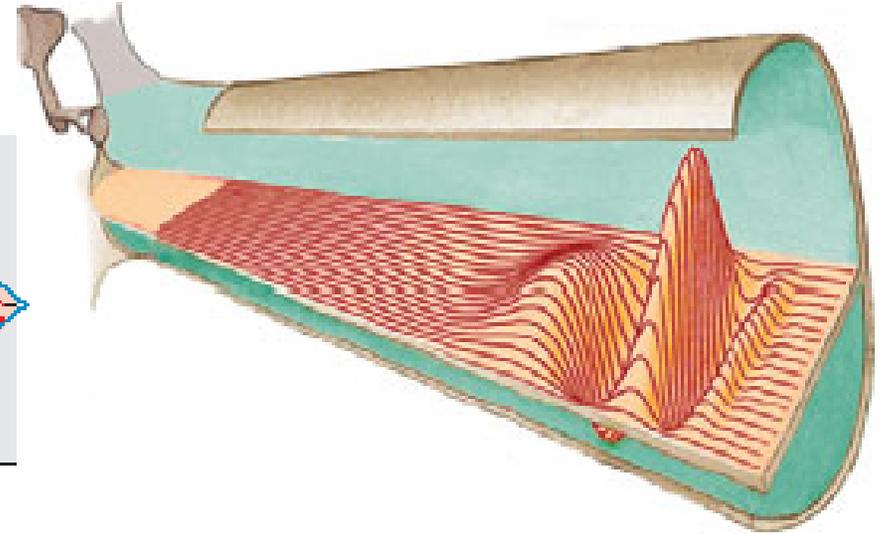
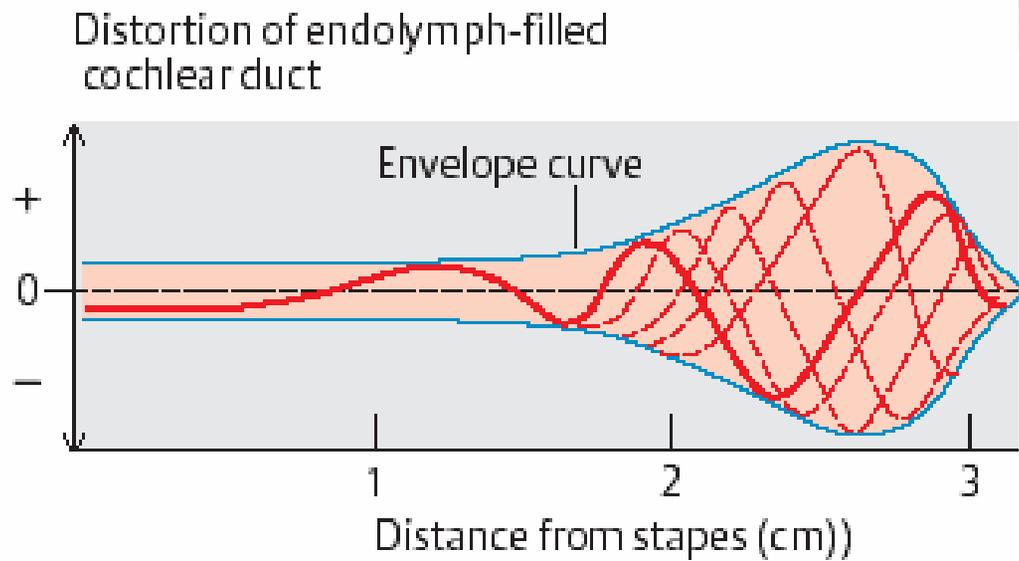
Por razones didácticas se puede esquematizar la cóclea desenrollada.



Cuando el estribo golpea sobre la ventana oval y se transmite la onda a perilinfa y endolinfa, **la membrana basilar vibra sinusoidalmente.**

Pero la **amplitud** de la vibración **irá en aumento a medida que se aleja de la ventana oval** (debido a la variación en la velocidad de propagación), hasta llegar a un punto en el cual **la deformación será máxima.** de modo que la amplitud de la vibración y, por ende, **la transmisión de la energía de la onda al fluido de la rama timpánica será máxima en dicho punto.**

A partir de esa región, la onda no puede propagarse eficientemente y la amplitud de **la vibración se atenúa muy rápidamente** a medida que se acerca al **helicotrema.**

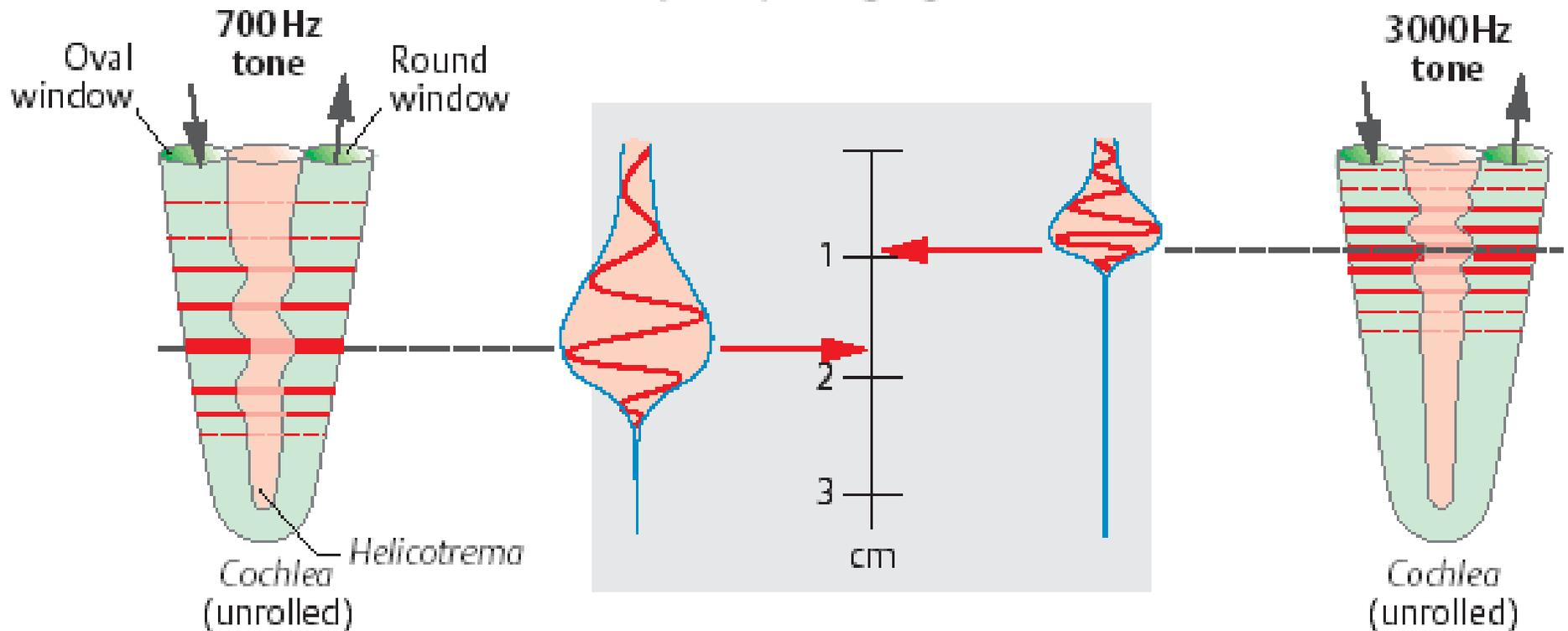


Las ondas sonoras al ser transmitidas al oído interno se comportan como una “**onda viajera**”, es decir, una onda determinada producirá preferencialmente movimiento de un segmento de la membrana basilar, de acuerdo a su frecuencia.

Sonidos de **diferentes frecuencias** estimulan **zonas diferentes** del órgano de Corti

**¿Qué es la tonotopía?**

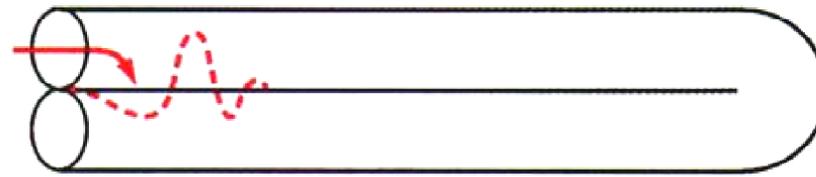
## Frequency imaging in cochlea



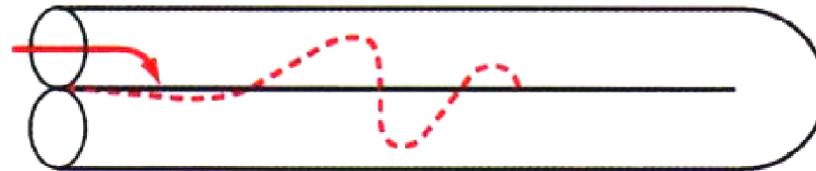
Sonidos de **frecuencias altas** producen vibración de la membrana basilar **cercana a la base** y los de **frecuencias bajas** hacen vibrar la membrana basilar **cercana al ápice**.

Esto se debe a que las características de la membrana basilar son diferentes en cada segmento.

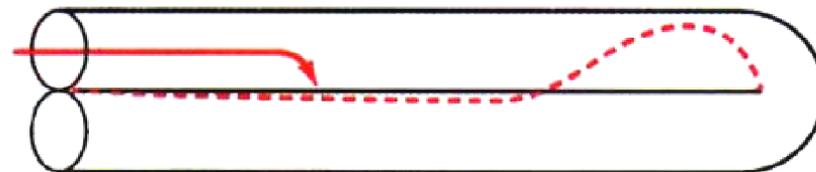
Esta **vibración selectiva** de acuerdo a la frecuencia del sonido es conocida como **tonotopía**.



Alta frecuencia



Media frecuencia

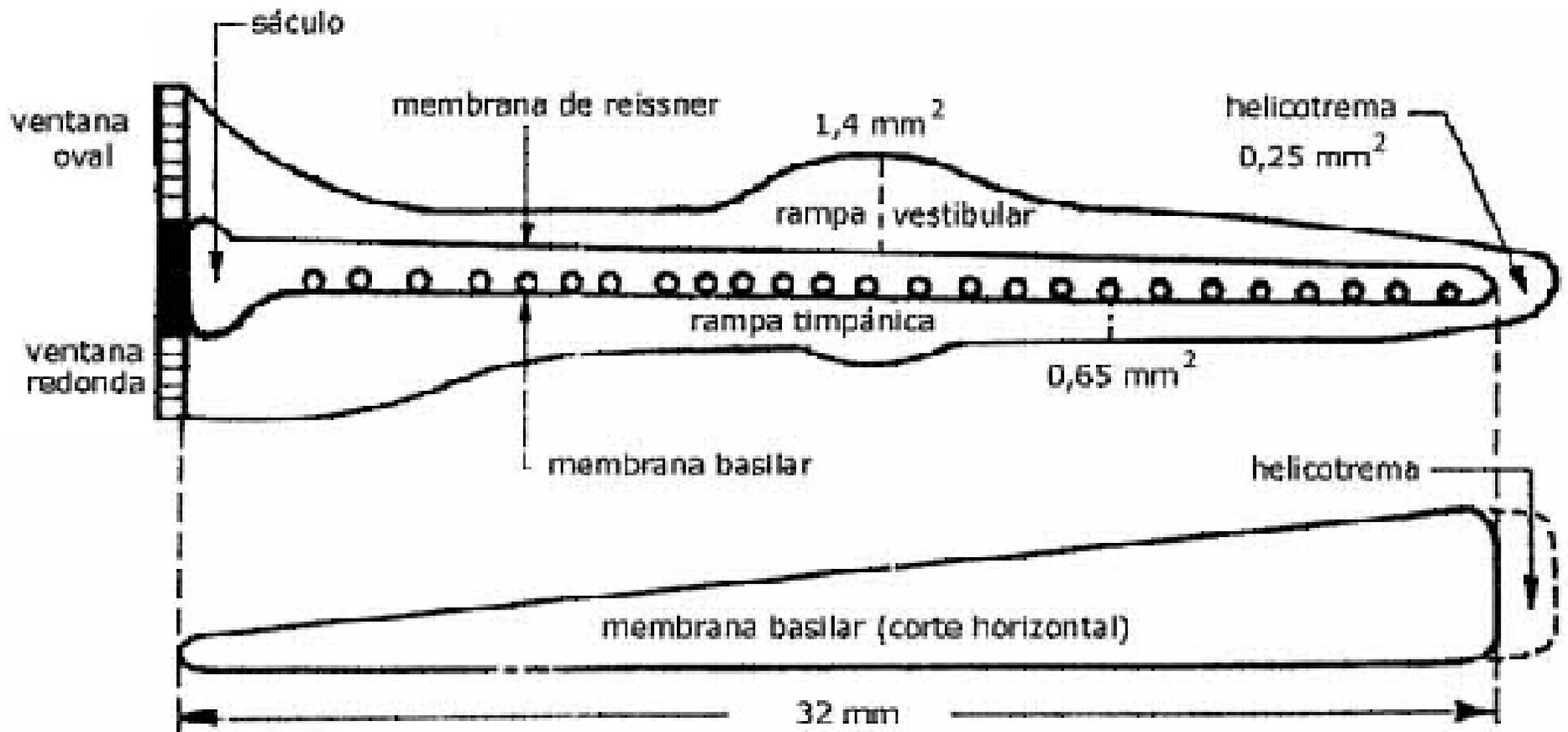


Baja frecuencia

Cada onda parece bastante débil al principio pero **se fortalece cuando llega a la porción de la membrana basilar que tiene una frecuencia natural de resonancia igual a la frecuencia sonora correspondiente.**

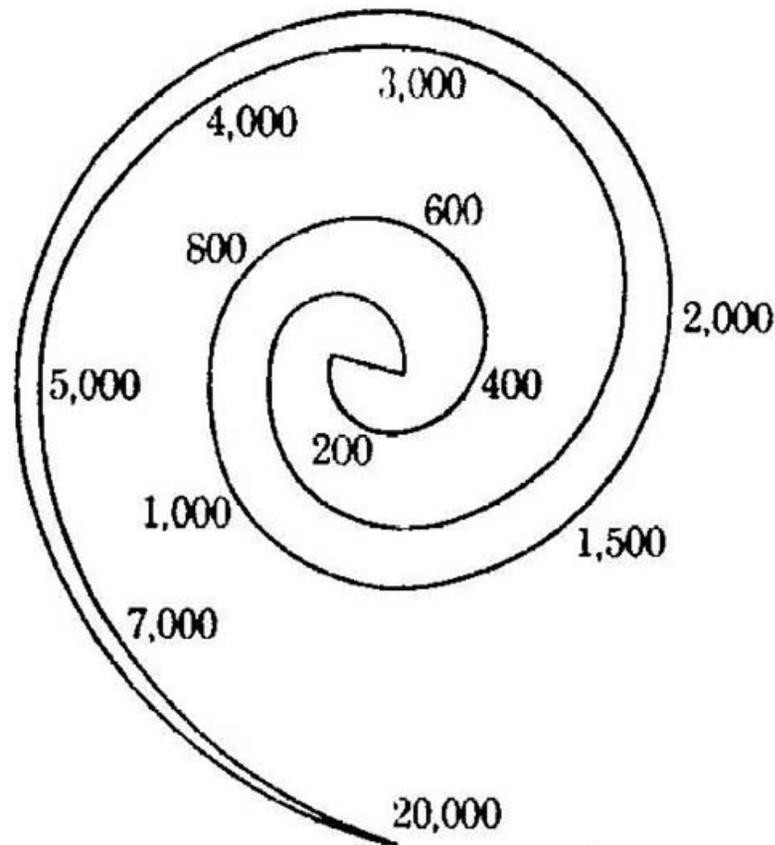
En este punto la membrana basilar la energía de la onda se disipa. La onda se extingue en este punto **y ya no recorre la distancia restante de la membrana basilar.**

**¿Por qué la membrana basilar tiene zonas con distintas frecuencias naturales de resonancia?**



La **tonotopía** se debe a que **membrana basilar** es:

- más **angosta, gruesa** y **rígida** en la **base de la cóclea** y
- es más **ancha, delgada** y **flexible** cerca del **helicotrema**.



### **Ubicación de la zona de respuesta de frecuencias sobre la membrana basilar**

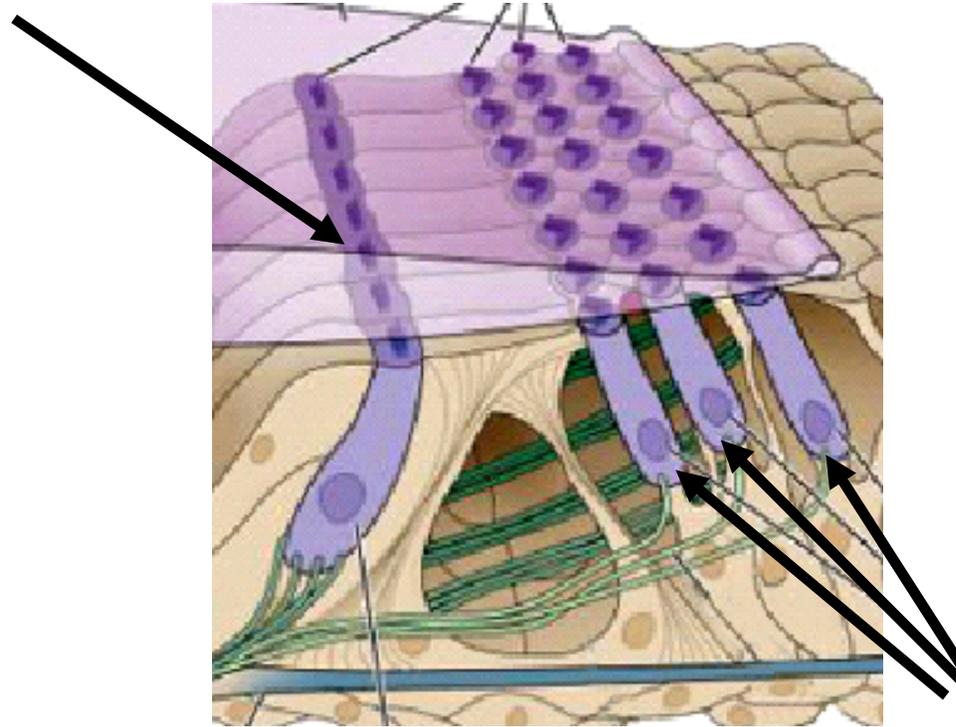
Cuanto **menor** sea la **frecuencia**, **mayor** será la **distancia** que viaje la onda a lo largo de la membrana antes de ser atenuada, y viceversa.

De esta forma, la membrana basilar dispersa las distintas componentes de una señal de espectro complejo en posiciones bien definidas respecto a la ventana oval.

**¿Por qué hay distintas  
células pilosas:  
las internas y las externas?**

**¿Tienen distintas funciones?**

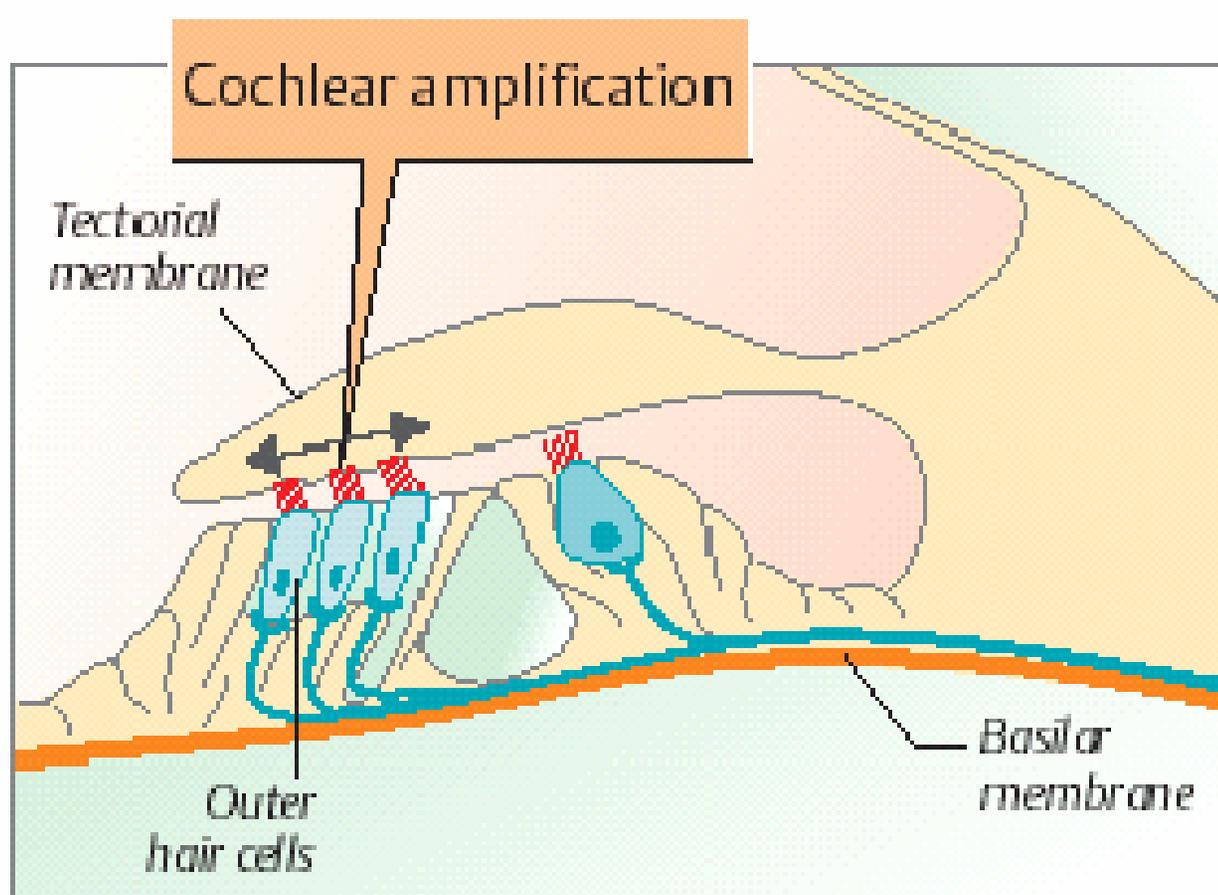
Las **células pilosas internas** son los **verdaderos "sensores"** del oído ya que están conectadas mayormente con las fibras aferentes.



Recientemente se ha comprobado que las **células pilosas externas** operan como elementos móviles que **pueden modificar las oscilaciones en la membrana basilar**.

Cuando los niveles de señal son bajos, los desplazamientos de los cilios de las células internas son muy pequeños para activarlas; en este caso, **las células externas se "alargan", aumentando la magnitud de la oscilación**.

Este es un proceso de realimentación positiva de la energía mecánica, de modo que las **células pilosas externas actúan aumentando la sensibilidad del oído**.



Este nuevo modelo del mecanismo de transducción nos indica que el conjunto formado por la membrana basilar y sus estructuras anexas forman un **sistema activo**.

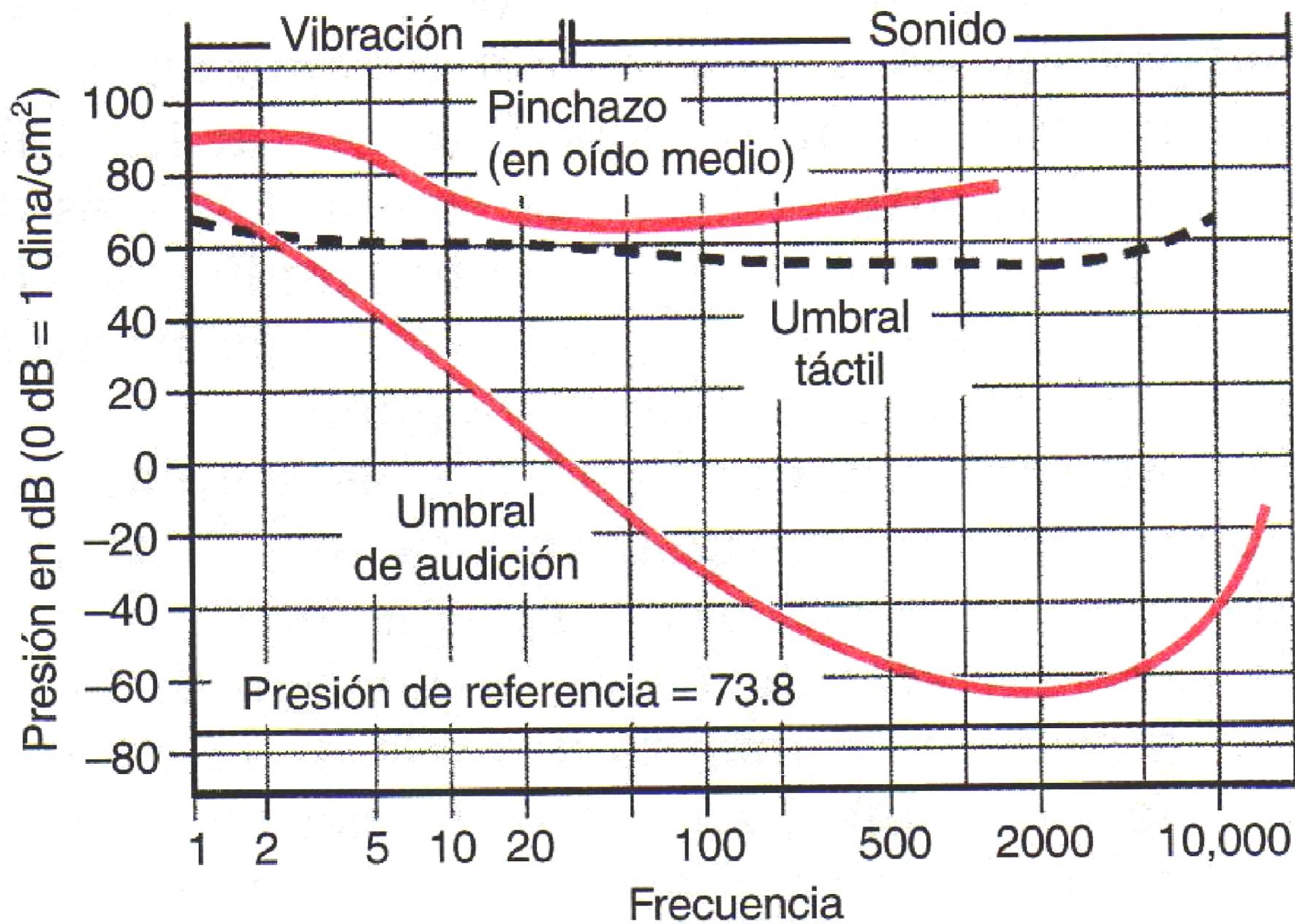
**¿Cómo discrimina el órgano de Corti  
la amplitud de la onda sonora?**

## DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN

El sistema auditivo determina el volumen al menos de **2 formas**:

1- Conforme el sonido se hace más fuerte, **umenta la amplitud de la vibración de la membrana basilar y las células ciliadas**, de modo que estas últimas excitan las terminaciones nerviosas con más rapidez.

2- A medida que la amplitud de la vibración aumenta hace que **se estimulen más las células ciliadas a los márgenes de la porción resonante de la membrana basilar**, lo que produce una **sumatoria espacial de impulsos**, es decir, la transmisión a través de muchas fibras nerviosas en vez de unas pocas.



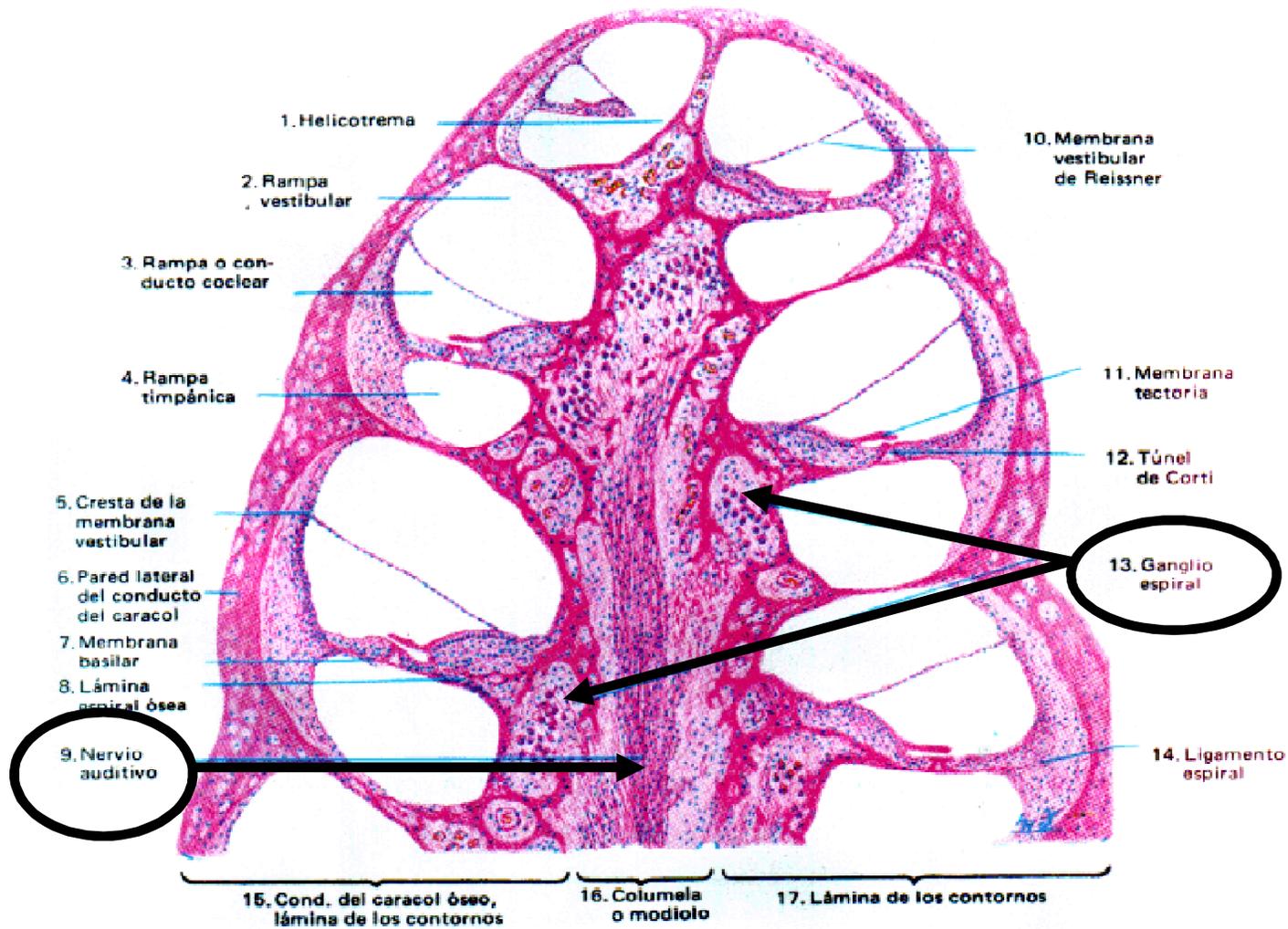
## VÍAS AUDITIVAS

Cada **CPI** puede estar en contacto con varias fibras aferentes de modo que las **3.500 CPI** existentes contactan con aproximadamente **20.000 fibras aferentes primarias** (*divergencia*),

Por otro lado, **varias CPE contactan con una sola fibra aferente**, de modo que **20.000 CPE** están en contacto con solamente **1.000 fibras aferentes primarias** (*convergencia*).

Los **cuerpos celulares** de las **neuronas aferentes primarias** se encuentran en el **ganglio espiral**, ubicado a lo largo del eje central de la cóclea y **son típicas neuronas bipolares**, es decir, su axón se bifurca en 2, dividiéndose en una fibra centrífuga que es la que va a inervar las células pilosas y una fibra centrípeta que va hacia el tallo cerebral a establecer sinapsis en los **núcleos cocleares**.

## OIDO INTERNO



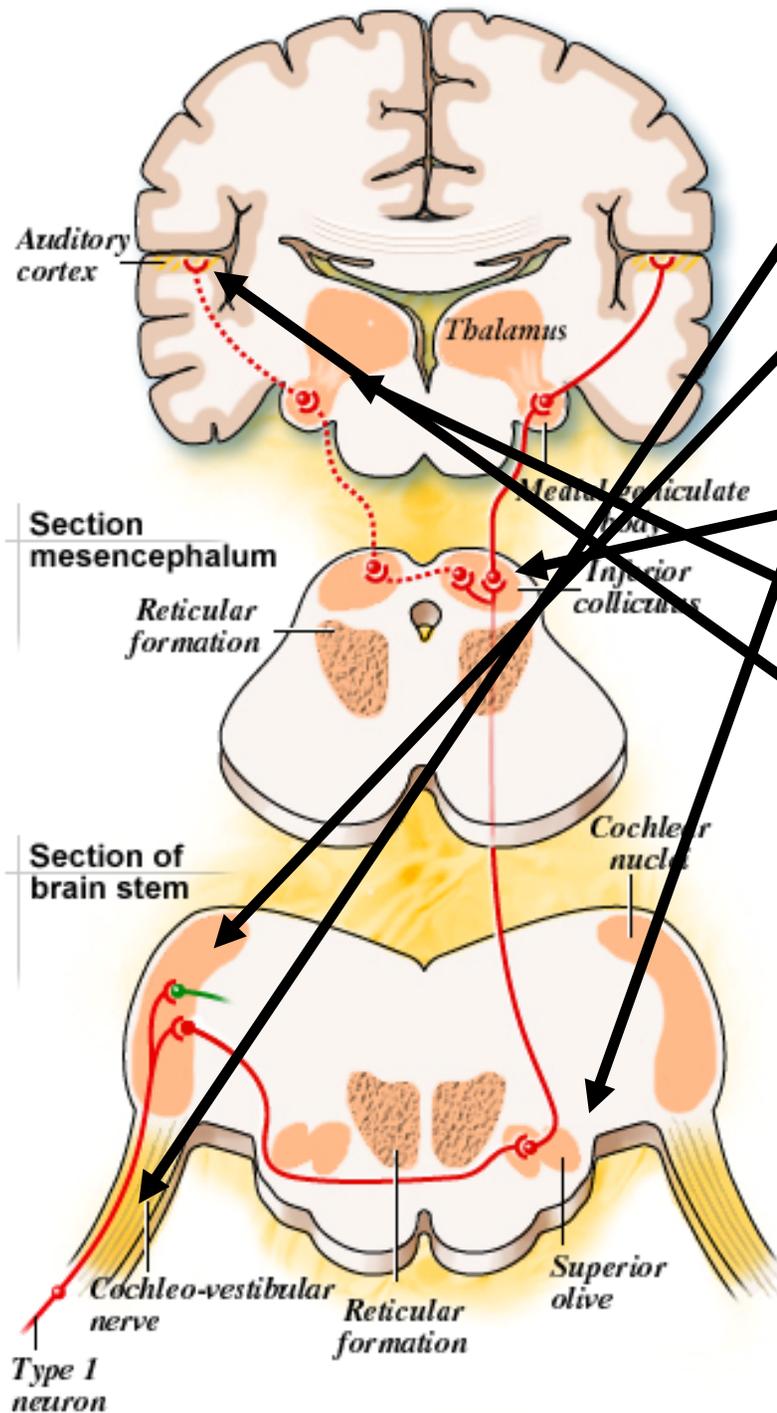
Las fibras **centrípetas** de las neuronas del **ganglio espiral** se reúnen para formar el **nervio auditivo**.

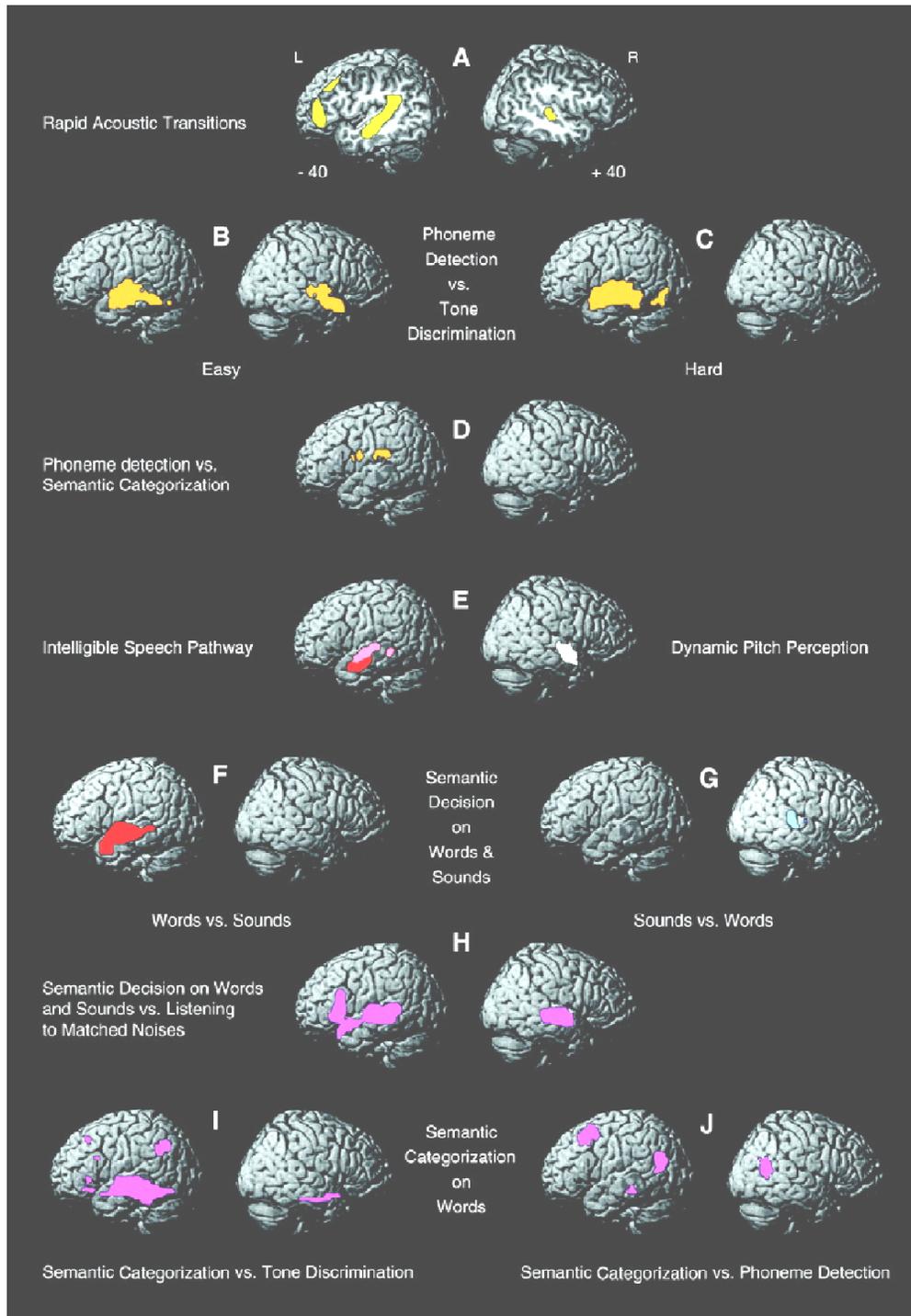
Las vías auditivas continúan de este modo:

- **nervio auditivo**
- **núcleos cocleares (tallo cerebral)**
- **oliva superior**
- **colículo inferior (mesencéfalo)**
- **núcleo geniculado medial (tálamo)**
- **corteza auditiva primaria (corteza temporal áreas de Brodmann 41, 42 y 22)**

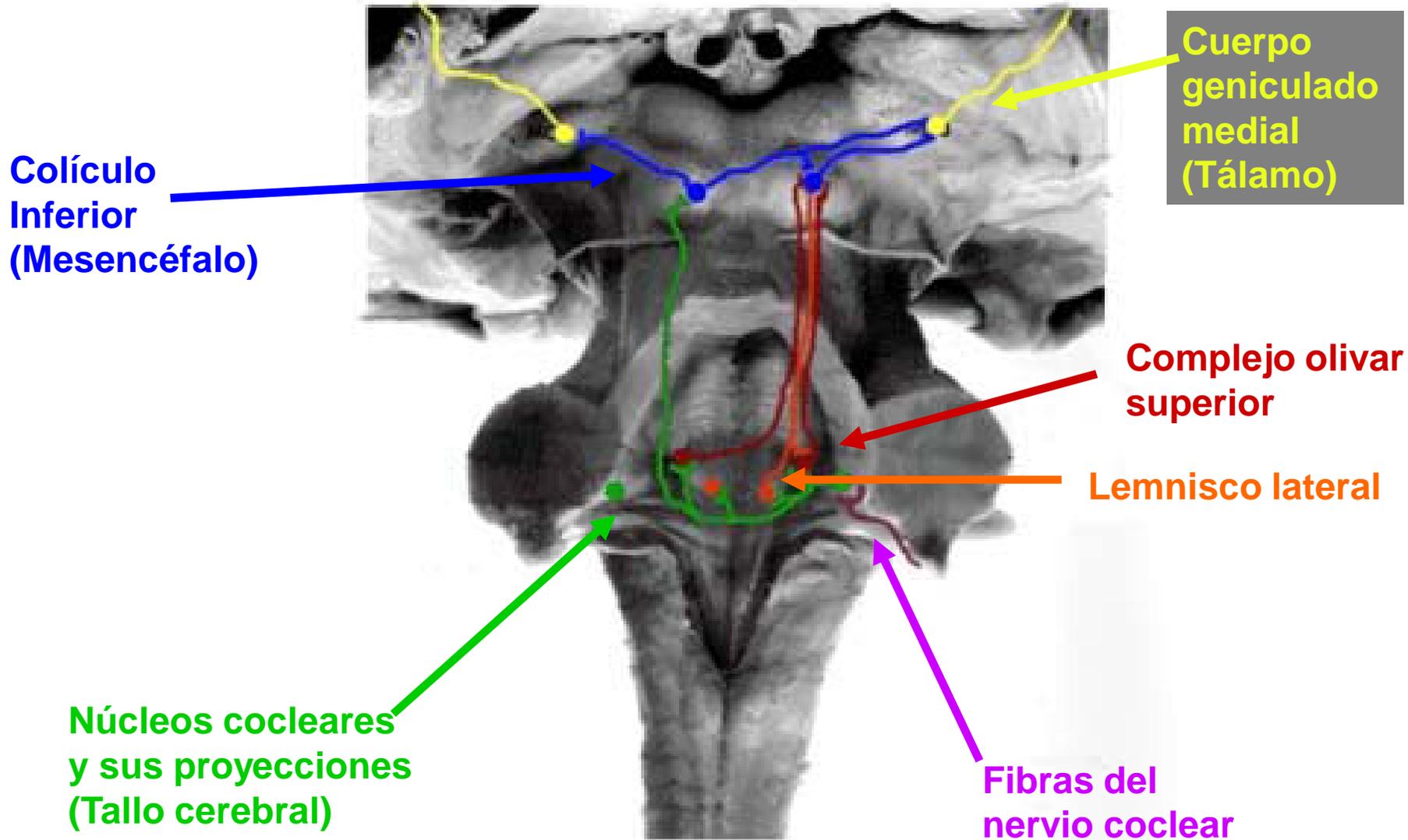
Toda la información auditiva es **bilateral a nivel central**, es decir, las neuronas del ganglio espiral envían información a los núcleos del tallo cerebral de ambos lados.

Esta bilateralidad es muy importante en el procesamiento espacial de la señal auditiva, mediante comparación de los mensajes procedentes de ambos oídos.

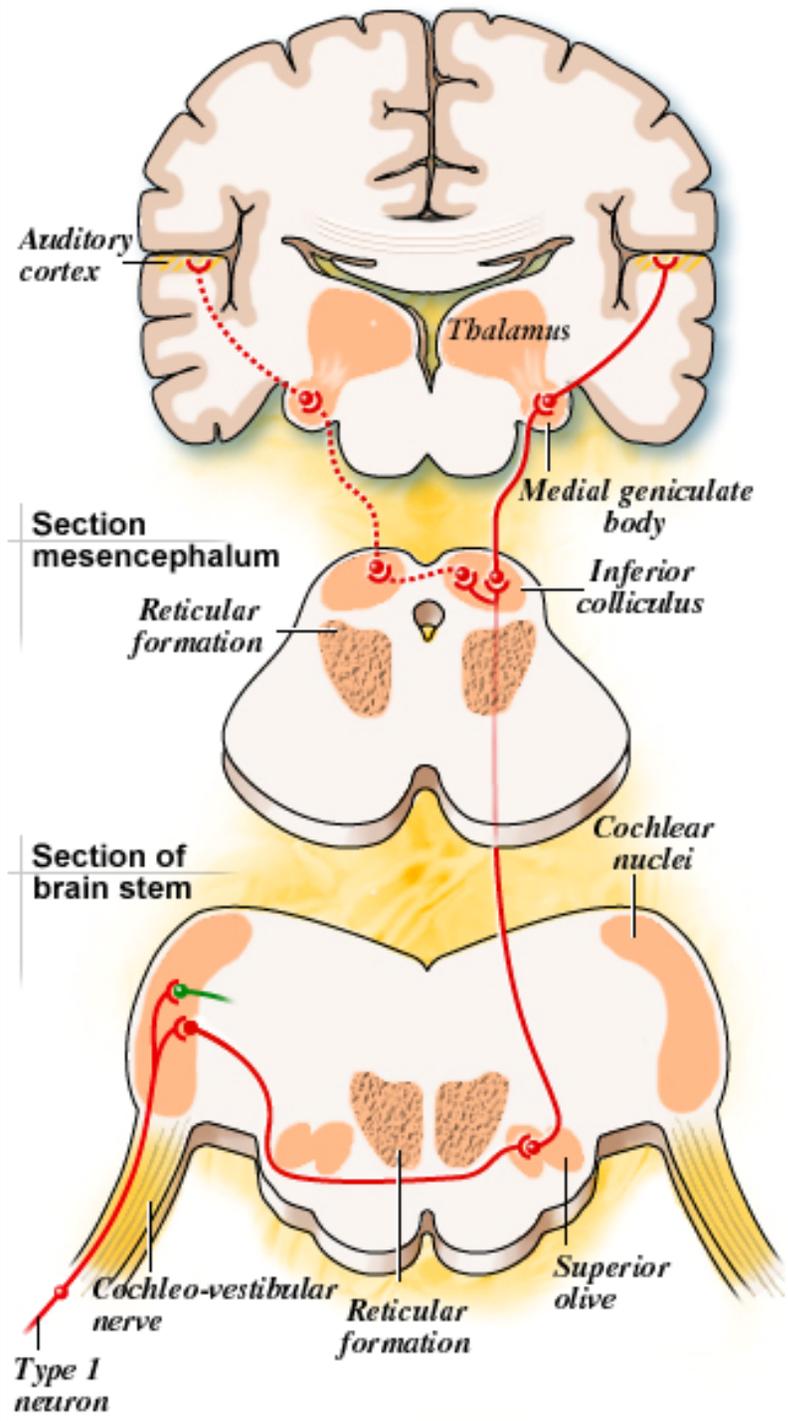




La **tonotopía** se conserva a lo largo de toda la vía auditiva y han sido demostradas **áreas de representación** de los diferentes segmentos del órgano de Corti en los diferentes núcleos de relevo y en las áreas centrales.



**Estaciones del sistema auditivo a nivel del tronco encefálico**



La magnitud del movimiento de la **membrana basilar** dependerá de la intensidad del sonido que originó la onda.

Originalmente el **umbral** de audibilidad había sido definido como la **mínima presión necesaria** para percibir un **sonido senoidal de 1 kHz**.

La presión necesaria para ello es de  **$2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$**  (o una intensidad de  **$1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$** ), valor tomado además como referencia para la determinación de valores absolutos.

La unidad utilizada para medir el nivel de intensidad relativa son los **decibeles** (dB).

De acuerdo a la equivalencia

$$\beta = 20 \log (P/P_0)$$

donde **P** es la presión del sonido que está siendo medido y **P<sub>0</sub>** es la presión de referencia que es la mínima presión del sonido audible por el oído humano ( $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ ), el cual corresponde al umbral de audibilidad es de 0 dB.

El máximo nivel de intensidad audible es de 120 dB.

# HIPOACUSIA NEUROSENSORIAL INDUCIDA POR SUSTANCIAS QUÍMICAS (OTOTOXICIDAD)

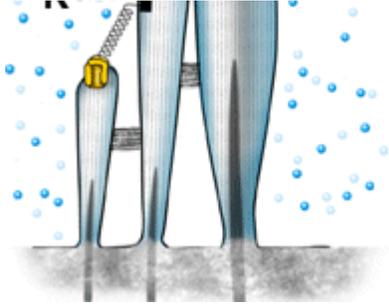
## ¿Qué es la ototoxicidad?

La ototoxicidad es la capacidad que presentan algunas sustancias químicas para dañar la función auditiva, ya sea de forma definitiva o transitoria. Aunque hay fármacos cuyo efecto ototóxico se conoce desde un principio, en otros medicamentos se va descubriendo a lo largo del tiempo, ampliándose progresivamente la lista de ototóxicos.

## ¿Cuáles son los principales ototóxicos?

De manera general les podemos resumir en el siguiente esquema:

Aminoglucósidos	Macrólidos	AINE	Antineoplásicos	Fármacos tópicos	Otros
Neomicina	Eritromicina	Ibuprofeno	Cisplatino	Neomicina	Quinina
Amikacina		Ácido acetilsalicílico	Carboplatino	Gentamicina	Diuréticos del asa
Kanamicina		Naproxeno	Mostazas nitrogenadas	Tobramicina	Vancomicina
Tobramicina		Ácido mefenámico	Vimblastina	Cloranfenicol	Minociclina
Estreptomicina		Diclofenaco	Vincristina	Polimixina	Viomicina
Dihidroestreptomicina		Acetilsalicilato de lisina	Metotrexato	Ácido acético	Monóxido de carbono
Netilmicina			Bleomicina	Povidona yodada	Cloroquina
Sisomicina				Mercurocromo	Anilinas
Gentamicina				Cresilacetato	Arsénico
				Alcohol	Fósforo
				Clorhexidina	Plomo
					Mercurio
					Sales de plata
					Sales de oro
					Tabaco



La célula aferente primaria dispara constantemente con frecuencias variables, por tal razón se considera que son células tónicas. Se considera entonces que la CP produce oscilaciones permanentes de su potencial de membrana, lo cual a su vez se refleja en oscilaciones en la liberación de glutamato hacia la terminal pos-sináptica en la fibra aferente, seguidas de oscilaciones en la tasa de disparo de estas neuronas; es decir, en términos generales el sistema se comporta como un resonador eléctrico, de donde el sistema nervioso central puede obtener información acerca de los sonidos.