

Psicoacústica

PERCEPCIÓN DE LA ALTURA TONAL

Pitch perception

Resumen

La psicoacústica es una rama de la psicofísica que aborda todos los procesos implicados en la percepción de los estímulos auditivos y la percepción de los mismos en el ser humano. Si bien suele estudiarse en el entorno de disciplinas como la psicología de la percepción, la física del sonido o la medicina, es en el marco de la teoría musical donde muchos de los fenómenos psicoacústicos toman un especial relieve y adquieren una particular interpretación. De todas las cualidades del sonido, la altura es la que tiene una importancia musical mayor. Así pues, este artículo pretende acercar al lector a las principales teorías a propósito del procesamiento auditivo, explicando las estructuras anatómicas y los procesos fisiológicos más relevantes de la audición, si bien desde el punto de vista psicoacústico más que desde el musical.

Palabras clave: Audición, tono, percepción, cóclea.

Abstract

Psychoacoustics is a branch of Psychophysics which covers all the processes which are implied in perception of auditory stimulus and perception of them in the human being. Though it is usually studied in the environment orderliness as Psychology of perception, Sound Physics or Medicine it is in the Musical Theory setting where many of the psychoacoustic phenomena are best remarked and gets a particular reading. Out of all sound features, pitch is the most musically valuable one. So this report intends to make the reader closer to the main theories of hearing process, explaining the most important anatomic structures and physiological processes in hearing, always from the psychoacoustic point of view better than the musical one.

Keywords: Pitch, perception, hearing, cochlea.

PERCEPCIÓN DE LA ALTURA TONAL

Para un músico conocer la naturaleza del sonido y de qué forma lo percibimos, debería formar parte ineludible de su formación como tal, aunque solo fuera por la simple satisfacción que puede proporcionar el saber que muchos de los hechos que podrían mostrarse como exclusivamente musicales, guardan un estrecho vínculo con una realidad física y biológica. El estudio de la acústica y la psicoacústica nos conecta con la esencia misma de los componentes sonoros, aún al margen incluso de lo musical, a la vez que traza una ligazón entre el arte y la ciencia que viene a enriquecer el bagaje de todo músico profesional. Es sabido que si hay un arte que conjugue mejor que ningún otro lo material y lo espiritual, ese es el arte musical, de forma que la más intangible de las ideas puede ser traducida a música, pero siempre en base al conocimiento y aplicación de una técnica compleja.

La Acústica, como parte de la Física, es por definición, objetiva y sus principios pretenden justificarse en las relaciones matemáticas. Pero dentro

de la Acústica se distinguen otras disciplinas no tan precisas, tales como la Psicoacústica. Ésta estudia todo lo concerniente a la percepción del sonido por el sistema auditivo humano, en el marco musical o fuera de él. Se centra en la relación entre el estímulo sonoro y la respuesta fisiológica y psicológica que éste produce, y aborda en qué manera llegamos a percibir cada una de las propiedades del sonido; la altura, la intensidad, el timbre y las relaciones temporales. Estas propiedades son el “ecosistema” en el que habitan todos los sucesos musicales, desde los más triviales a los más elaborados. Al estar basada en la percepción, la Psicoacústica ha de manejar muchos datos subjetivos puesto que los mecanismos de los que dependen las sensaciones que nos llegan desde los sentidos son mecanismos biológicos muy alejados de las ciencias exactas. Es mediante mediciones experimentales con seres humanos como se puede obtener la mayoría de la información en la que se basa la Psicoacústica. Hay pocas verdades absolutamente irrefutables en ella pero es precisamente esa falibilidad y la circunstancia de tener que funcionar con hechos probabilísticos y con continuas variables, la que la enriquecen.

Uno de los grandes temas de estudio de la Psicoacústica es en qué forma percibimos si un sonido es más o menos grave o agudo, cuál es el proceso fisiológico del que depende esta percepción y qué factores la condicionan. No es este un campo de estudio que esté totalmente agotado, sino que, muy al contrario, sigue aún en continuo desarrollo. Existen muchas cuestiones que no están del todo esclarecidas o que son explicadas mediante meras hipótesis. Trataremos aquí de trazar un somero recorrido por los temas más relevantes en lo que a percepción de alturas se refiere.

No es posible hablar del procesamiento del estímulo sonoro sin conocer lo esencial de la anatomía y fisiología de la audición, por lo que comenzaremos por hacer una descripción morfológica de las estructuras intervinientes en aquél.

Anatomía de la audición

Como en cualquier procesamiento perceptivo, la audición pasa por dos grandes grupos anatómico-fisiológicos: por una parte la estructura y el funcionamiento propios del órgano sensorial receptor y por otro las estructuras y procesos del sistema nervioso. Para diferenciar ambos se suele distinguir entre *audición periférica* y *audición central*. No es ésta sin embargo una denominación del todo correcta ya que los términos *periférico* y *central* se refieren ambos al sistema nervioso y no al órgano sensitivo en sí. El SN central es el compuesto por el encéfalo y la médula espinal y el SN periférico el formado por los nervios y ganglios nerviosos que llegan a todos los órganos y extremidades; por tanto, en este sentido, la audición periférica estaría relacionada con el oído, y la central con el sistema nervioso mismo.

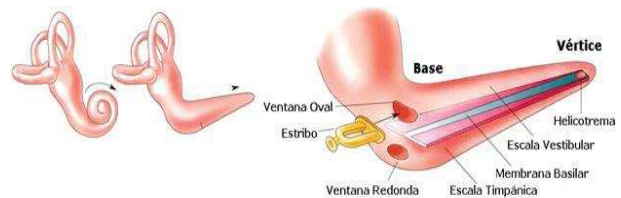
El oído se divide anatómicamente en oído externo, medio e interno. Cada uno tiene una función específica de distintos niveles de complejidad. A grandes rasgos, diremos que el oído externo recoge las ondas sonoras y las conduce al interior, y el oído medio transforma la vibración acústica para que pueda ser procesada por el oído interno. El oído interno es el que presenta una anatomía y fisiología más compleja y el que más relevancia tiene en todos los procesos psicoacústicos; en él nos centraremos. El oído interno tiene a su vez dos zonas diferenciadas anatómicamente y funcionalmente. Por una parte, el sistema vestibular,

responsable del equilibrio y por otra el caracol o cóclea que lo es de la audición. La cóclea es una estructura tubular enrollada con forma de espiral cónica parecida a la concha de un caracol.

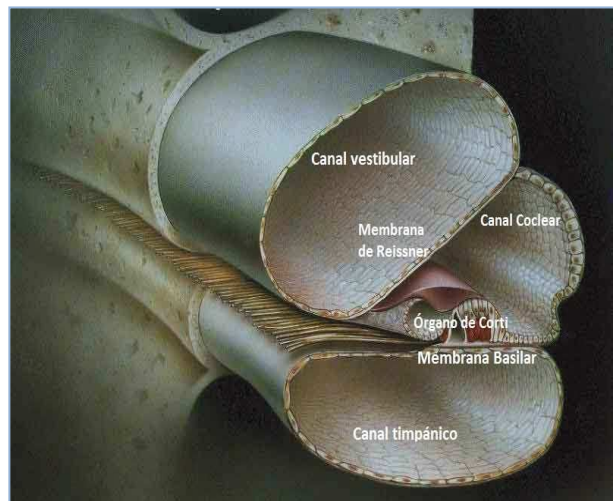


Cóclea (Imagen extraída de: <http://www1.appstate.edu/~kms/>)

Está cubierta de una capa ósea y su interior está dividido en tres secciones que conforman el canal vestibular, el coclear y el timpánico. El interior de la cóclea está lleno de líquido; concretamente, el que está en la rampa timpánica y la vestibular se denomina perilinfa, y la que hay en el interior del canal coclear endolinfa. Ambas se diferencian en su composición química y proceden de un filtrado del líquido cefalorraquídeo. Estos tres conductos están separados por dos membranas, la de Reissner y la Basilar.



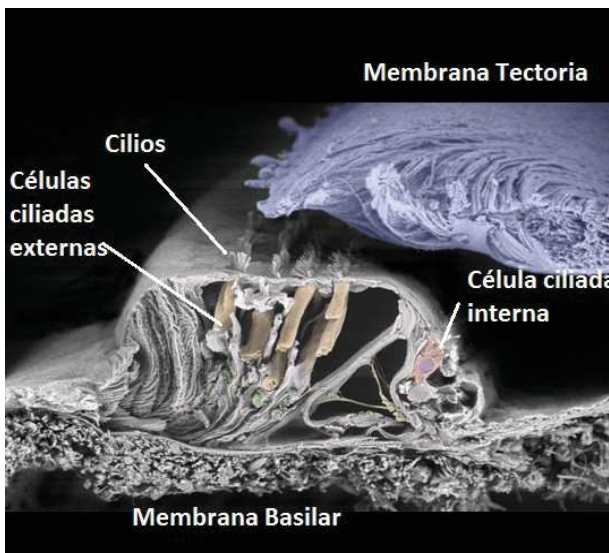
Cóclea "desenrollada" (Imagen extraída de: Facultad de Medicina. Universidad de la Frontera, Chile. Neuroanatomía. Oído interno. Membrana basilar. http://www.med.ufro.cl/Recursos/neuroanatomia/archivos/fono_oido_archivos/Page342.htm)



Sección de la cóclea (Imagen extraída de: <http://audiology.wordpress.com/la-coclea/anatomy/cochlea>)

Pero la estructura más singular y trascendente en lo que al procesamiento del estímulo sonoro se refiere es el Órgano de Corti. Está situado en el centro de la cóclea y se extiende a lo largo de ella. Se encuentra en el canal o rampa coclear, también llamado rampa media, y en él es donde se producen los procesamientos más importantes de la señal acústica en el oído. Está formado por una serie de células ciliadas, asentadas sobre la membrana basilar, y conectadas en sus extremos ciliados con la membrana tectoria. Tenemos unas 15000 células sensoriales en el órgano de Corti distribuidas en dos tipos diferentes: las internas dispuestas en una sola fila y las externas que se organizan entre tres y cinco filas. Los dos tipos tienen funciones específicas aunque complementarias. Cada una de estas células recibe los movimientos generados por la onda sonora transmitida por el oído medio y está a su vez conectada con una serie de terminaciones nerviosas que transmiten la información acústica al cerebro.

En el órgano de Corti es donde se produce la transducción que permite convertir una onda mecánica en un impulso bioeléctrico.



Órgano de Corti (Imagen extraída de: <http://www.teknat.uu.se/forskning/uu/beskrivning.php?vetenskapsid=&forskomsr=62&id=379&lang=en>)

No es objeto de este artículo abordar un estudio pormenorizado de la compleja anatomía del oído interno sino concretar las estructuras que realmente resulta imprescindible conocer para aproximarnos al proceso de la percepción de alturas. Consideraremos que las partes descritas son suficientes para nuestro fin.

Frecuencia y Tono

La señal sonora posee, como onda, una serie de magnitudes que la definen. Así, la amplitud de la onda determina la intensidad del sonido, el espectro armónico conformará su timbre y la frecuencia o número de vibraciones por segundo (hercios) definirá la altura. Sin embargo asociar la altura de un sonido con su frecuencia veremos cómo resulta ser una relación algo simplista que requiere de muchas matizaciones. Es cierto que cuanto mayor sea la frecuencia de un sonido, más agudo será su tono y viceversa. Pero nuestro oído no se comporta en modo alguno como un frecuencímetro que se limita a registrar cuántos hercios tiene un sonido. La altura no es una magnitud física sino psicofísica y por tanto sujeta a las variables fisiológicas y psicológicas del receptor. Por supuesto que, aunque sea una magnitud psicofísica, los seres humanos percibimos las cualidades sonoras de manera muy similar; tanto es así que se puede incluso trazar ecuaciones matemáticas que describen determinadas relaciones perceptivas.

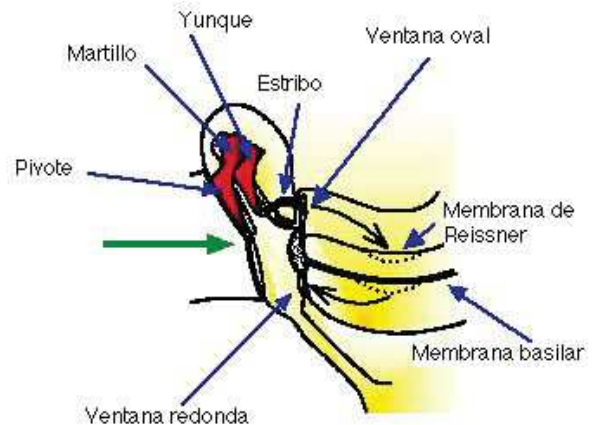
Quizás la principal circunstancia que debemos observar en cuanto a la percepción del tono es que la relación entre la altura que el sistema auditivo percibe y la frecuencia del sonido percibido no es en absoluto lineal, es decir, si bien a más hercios mayor altura, el aumento de la frecuencia del estímulo sonoro no se corresponde con el aumento de la altura del tono. De esta forma si a un estímulo de 50 Hz le “añadimos” otros 50Hz obtendremos una altura que en términos musicales supondría la octava del primer tono. Pero si a un sonido de 1000Hz le añadimos 50Hz no percibiremos ni siquiera una subida de un semitono. Necesitaremos el doble de 1000Hz para percibir la misma proporción interválica, en este caso la octava. De esto se deduce que, en el marco musical, los intervalos se definen por relaciones proporcionales entre las frecuencias y no por relaciones lineales entre frecuencia/altura; una octava es el doble de una frecuencia dada y no una cantidad fija a añadir a esa altura. Realmente no hemos hecho sino aproximarnos levemente a la relación que existe entre la frecuencia de un sonido y lo que percibimos. Veamos cómo nuestro oído procesa la información de la onda acústica.

Fisiología del oído en la percepción de alturas

El oído externo y medio se encargan de transmitir, con algunas transformaciones, las vibraciones sonoras, y el oído interno de procesarlas. Existen varias teorías sobre cómo se genera la onda producida en la membrana basilar gracias a la transmisión a través del líquido intracoclear de la vibración del estribo. Algunas de estas teorías simplemente se han dejado de lado y otras se han ido perfeccionando. Sería difícil tratar todas ellas de manera resumida sin incurrir en errores por excesiva síntesis; así pues eludiremos las claramente desechadas, aunque parte de ellas fueran ciertas.

Esencialmente existen dos teorías sobre la percepción de alturas: una se basa en la forma y naturaleza de la onda de la membrana basilar y su ubicación espacial en ésta y la otra se fundamenta en la información temporal de dicha onda. Por tanto existen dos enfoques diferentes a este respecto: el espacial (localización) y el temporal (periodicidad). El primero ha tenido un campo de estudio muy desarrollado y es más fácilmente comprensible, al menos en un principio. Como planteamiento de partida, diremos que, a grandes rasgos, el proceso de audición se produce por la transmisión de una onda mecánica desde el oído medio hacia el interior de la cóclea a través de una abertura membranosa sobre la cual golpea el estribo, el último de la cadena de huesecillos que forman el oído medio. Esta abertura se denomina ventana oval y está en conexión con la perilinfa del oído interno. Su vibración es transmitida a todas las estructuras de la cóclea, generando una onda que se propaga a lo largo de la membrana basilar. De esta forma cuando el estribo golpea la ventana oval la deforma hacia dentro desplazando el líquido linfático y por tanto presionándolo. Esta vibración llega hasta la ventana redonda, otra abertura membranosa de la cóclea, que a su vez, deformará su membrana en sentido opuesto a la de la ventana oval. Por lo tanto dentro del caracol se generan una serie de movimientos de fluidos y estructuras sólidas encaminados a procesar el estímulo acústico.

Las teorías basadas en las características espaciales de la onda sonora dentro de la cóclea han tenido varias fases evolutivas que resumiremos.



Todas se centran en la fisiología del órgano de Corti y de la membrana basilar. Los primeros estudios en este campo se produjeron a finales del siglo XIX de la mano de Helmholtz y de Rutherford. Hermann von Helmholtz, fisiólogo y físico alemán, escribió en 1863 su trabajo *"Sobre las sensaciones del tono como base fisiológica para la teoría de la música"* que marcó un hito en los estudios psicoacústicos. En él bosquejó su *teoría del lugar de resonancia en la audición*. Para Helmholtz el oído interno funcionaba como una especie de piano resonante en el que había una serie de "cuerdas" que respondían al estímulo sonoro, dependiendo de la frecuencia de éste. Consideró que los cilios de las células ciliadas del órgano de Corti, cumplían la función de resonadores que respondían o no según si su frecuencia propia coincidía con la del estímulo. De alguna manera el hecho de que los cilios tengan diferentes longitudes a lo largo de la membrana basilar, parecía corroborar su teoría. Sin embargo con el tiempo se comprobó que asignar una altura determinada a una fibra concreta no podía explicar todas las alturas que pueden ser discriminadas. Pero la idea de "lugar" en la cóclea relacionada con determinado margen de frecuencias, se mantuvo.

En contraposición a esta teoría, W. Rutherford, fisiólogo británico, postuló hacia 1886 su *"teoría del teléfono"* según la cual el oído no desempeñaba un papel analítico del estímulo sonoro sino que era un mero transductor. Por lo tanto, consideraba que su única función era la de transformar la energía mecánica de la onda acústica en ondas eléctricas que eran enviadas al cerebro, a la manera de lo que sucedía en un teléfono. Aunque

esta idea fue pronto refutada por ser algo simplista y no resolver la percepción de sonidos de alta frecuencia, subsistió el concepto de la cóclea como órgano transductor de energía mecánica en bioeléctrica.

Pero sin duda, las teorías que más trascendencia han tenido en el siglo XX y que abrieron las puertas a la psicoacústica moderna fueron las de Békésy. G. Von Békésy (1899-1972) fue un médico y físico húngaro, que centró sus estudios en la mecánica coclear, por los que recibió el premio Nobel de medicina en 1961. Para sus estudios llegó a construir una especie de cóclea mecánica a gran escala con la que obtuvo sus primeras conclusiones. La transmisión de la onda sonora que describimos en párrafos anteriores se debe a estos experimentos. La onda pone en movimiento el canal coclear y en particular la membrana basilar, la cual vibra por la diferencia de presión entre las dos rampas. Las ondas viajeras se observan como oscilaciones de la membrana basilar a la frecuencia del sonido estimulante, las cuales son de amplitud variable de un extremo a otro, teniendo siempre un sitio donde alcanzan una amplitud máxima, y después decrecen. La onda de propagación se dirige hacia el ápex coclear con una amplitud creciente hasta alcanzar el punto de máximo desplazamiento en el lugar donde su ubica su frecuencia. Sobre pasado éste, la amplitud de la onda disminuye muy rápidamente hasta una amplitud cero, desapareciendo así el movimiento ondulatorio. Simplificando, la imagen del movimiento de la membrana basilar sería semejante al de una bandera que flamea. Un hallazgo esencial de Békésy fue el de descubrir la no linealidad de la membrana basilar y su comportamiento como un analizador mecánico de frecuencias, gracias a una especie de sistema de filtros. Si bien muchas de las afirmaciones de Békésy eran efectivamente ciertas, aún quedaba mucho camino que recorrer para explicar la multitud y complejidad de todos los hechos psicoacústicos. La principal limitación de las conclusiones de Békésy fue que planteaba un funcionamiento pasivo de la cóclea al tener que trabajar con modelos mecánicos o con cócleas de cadáveres.

En décadas posteriores se comprobó, gracias al trabajo con seres humanos vivos, que la mecánica coclear era un proceso activo en el que el bino-

mio membrana basilar-órgano de Corti era esencial. Kemps en los años 70 descubrió los llamados *ecos cocleares* o *emisiones otoacústicas*. Básicamente consisten en la producción por parte del oído interno de sonidos generados a partir del estímulo externo (evocados) o en ausencia de él (espontáneos), y cuyo origen estaba en un sistema de realimentación generado por la dinámica coclear. Estos ecos llegan a amplificar una señal de baja potencia para mejorar su percepción, llegando en algunos casos a superar en 10000 veces el estímulo inicial; por lo tanto existe así un aporte adicional de energía por parte de la cóclea, que se suma al estímulo inicial. Se producen gracias a la gran motilidad de las células ciliadas externas, cuyo cuerpo tiene la propiedad de cambiar de forma estirándose o contrayéndose según el estímulo sonoro.

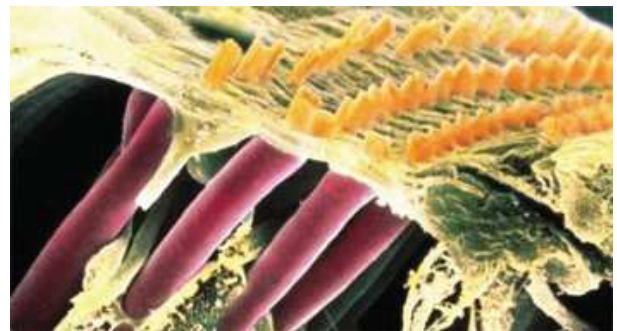
Según las teorías basadas en la tonotopia cada zona de la membrana basilar corresponderá con una altura determinada. Si el margen de audición en frecuencia se sitúa entre los 20Hz y los 20kHz, podría pensarse que es posible imaginar la cóclea como una membrana dividida en unas 20000 unidades, cada una encargada de una frecuencia. Pero esto dista mucho de ser así. Para empezar no todos los sonidos discernibles por el oído humano se diferencian un Hz entre sí. Además la posibilidad de percepción de alturas exigiría una división espacial casi infinitesimal de la membrana basilar. Ya adelantamos que esta membrana se comporta como una serie de filtros pasabanda (los que solo procesan determinado margen de frecuencias) y no como un discriminador de alturas concretas. Además se ha de tener en cuenta que cuando la membrana basilar se ve excitada por una frecuencia determinada (aún siendo un sonido simple) el movimiento va a afectar a un margen de frecuencias determinado, además de la correspondiente al estímulo. De esta forma si el oído percibe una frecuencia de 1000Hz se vería afectado un margen de frecuencias desde los 920 Hz hasta los 1080. A esta banda de frecuencias afectadas por la estimulación de una frecuencia se le denomina banda crítica o ancho de banda crítico y en términos musicales ocuparía aproximadamente, como media, una tercera menor. Cuando percibimos una frecuencia, el oído “escoge” el filtro cuya frecuencia central se acerca más a la frecuencia del estímulo. Se considera que la membrana basilar está dividida en unas

veinticuatro bandas críticas de unos 1,3 mm cada una. Otras mediciones estiman que el ancho sería de unos 0,9 mm. Sea como sea, este ancho de banda no es uniforme a lo largo de la membrana basilar en cuanto a cantidad de hercios se refiere y sí que lo es en cuanto a distancia. Y es que, tal y como avanzamos, uno de los rasgos más relevantes de la membrana basilar es su no linealidad respecto a las magnitudes físicas. Cada una de estas bandas se corresponderá con una cantidad de hercios pero ésta será muy variable según se traten de frecuencias agudas o graves. Para una frecuencia de unos 500Hz la banda crítica tendría unos 115 Hz y para una frecuencia de 5000 la banda crítica ocuparía unos 1000 Hz. En términos musicales un intervalo ocupará siempre el mismo espacio en la membrana basilar; así una octava corresponde a unos 3,5-4mm independientemente de si equivale a 100 o a 1000 hercios.

Con todo lo explicado no hemos hecho sino presentar alguna de las bases en las que se sustenta el complejo proceso de percepción del tono. La teoría de la localización, tal y como se ha planteado, aún estaría lejos de explicar todos los fenómenos psicoacústicos relacionados con la altura. Por ejemplo, si una frecuencia simple estimula la membrana basilar en un rango bastante amplio de frecuencias, ¿cómo es que solo percibimos una altura determinada? Han sido varias las propuestas para explicar este hecho. En un principio se pensó que esta selectividad era dada por procesos neurales, pero más adelante se vio que estaba basada en el mecanismo activo del órgano de Corti. Cuando referimos las emisiones otoacústicas vimos que existe un proceso de realimentación del estímulo que propicia una resolución en frecuencia mucho mayor que la dada por las medidas del ancho de banda crítica. Esta realimentación de la cual son responsables las células pilosas externas, agudiza y amplifica la sintonización auditiva, antes de que el impulso sea transmitido al sistema nervioso. Además de la falta de correlación entre el ancho de banda crítica y la gran resolución en frecuencia, hay otros fenómenos psicoacústicos, como los batidos de consonancias desafinadas o la fundamental reconstruida (tono virtual) que requieren explicaciones dentro de otro nivel del procesamiento auditivo. Pero antes tenemos que acabar de describir la gestión y trasmisión del estímulo acústico.

Audición neural. Vía auditiva

Si bien gran parte de la información de las ondas sonoras se procesa en el oído, esta información ha de ser transmitida al cerebro para su análisis e interpretación; sólo así se completa el proceso perceptivo. El sistema nervioso por un lado codifica la información mecánica para ser transmitida en forma de impulsos electroquímicos y por otro interpreta dicha información como una magnitud de altura, timbre o intensidad. Hasta ahora todo lo explicado concernía solo a un tratamiento mecánico de la onda sonora. Pero para que cualquier sensación pueda ser procesada por el cerebro debe convertirse en un potencial de acción transmisible y decodificable por el sistema nervioso. El cambio de un tipo de energía a otro, en este caso de mecánica a electroquímica, se denomina transducción. En el sistema auditivo la transducción tiene lugar en las células ciliadas del órgano de Corti.



Fotografía de las células ciliadas externas

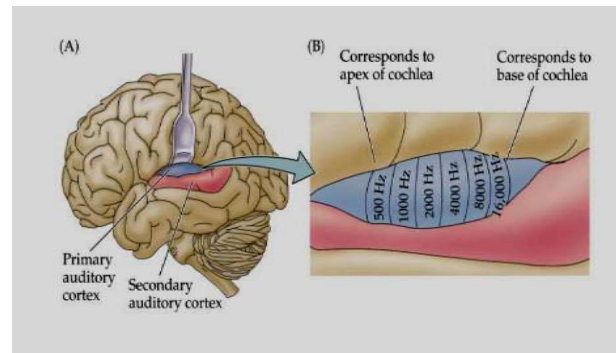
Los dos tipos de células ciliadas, las externas y las internas, tienen funciones similares aunque, en algunos aspectos, diferenciadas. Vimos que las células ciliadas externas tienen una elevada motilidad que hacía posible una realimentación del estímulo acústico. Pero además, en el interior de estas células pilosas se produce el proceso químico que creará el potencial de acción nervioso. Los cilios presentan determinadas uniones entre sí y a las estructuras adyacentes, de manera que no son filamentos que oscilan libremente, como lo haría un cabello. Son filamentos relativamente rígidos cuyo desplazamiento condicionará el proceso de transducción. Según oscilen hacia un lado o hacia otro se activará o inhibirá el impulso nervioso. En el primer caso el desplazamiento de los cilios abrirá los canales que propiciarán la entrada

de iones de potasio, despolarizando la célula. Esto a su vez generará el estímulo de las fibras nerviosas conectadas con las células ciliadas, y provocará también la liberación de neurotransmisores que se hallan encapsulados en las vesículas sinápticas existentes dentro de estas células. Los neurotransmisores son sustancias encargadas de realizar la sinapsis (conexiones) entre neuronas. En esencia, este es el proceso por el cual se activa la información nerviosa. Una sola célula ciliada es incapaz de transmitir la información necesaria sobre la onda sonora, por lo que son necesarias muchas de ellas para comunicar la información temporal de dicha onda. Así, si varias células ciliadas disparan la misma señal en diferentes fases, el conjunto de la información permitirá reconstruir la forma de onda original, aún en frecuencias altas. Los intervalos de disparo del estímulo nervioso proporcionan información sobre el periodo de la onda y por tanto sobre su frecuencia. Las células ciliadas internas están conectadas a fibras aferentes que mandan información desde el oído hacia el cerebro. El número de fibras a las que cada célula interna está conectada varía según la zona de la membrana basilar a la que pertenezcan; esto ya proporciona una especialización de la información y conecta con la tonotopía coclear. Las externas por su parte están unidas a fibras tanto aferentes como eferentes, es decir, transmiten y reciben información.

A partir de las fibras nerviosas conectadas con las células sensitivas comienza la vía auditiva. Estas fibras conformarán el nervio auditivo. El 95% de las fibras del nervio auditivo provienen de las células ciliadas internas y el 5 restante de las externas. Previo al nervio auditivo se encuentra el ganglio espiral formado por el cuerpo de las primeras neuronas de la vía auditiva. Desde aquí, diferentes centros neurales (complejo olivar superior, colículo inferior, etc.) irán obteniendo la información extraída de los datos previamente procesados por la cóclea. Quizás la característica fisiológica más relevante de la vía auditiva es su organización tonotópica en todo su trayecto. El último punto del procesamiento auditivo se encuentra en la corteza auditiva. Es la corteza auditiva primaria la que tiene una organización tonotópica, manteniendo una relación espacial con el análisis del estímulo en la membrana basilar.

La función de la corteza auditiva secundaria es la

encargada de todo lo concerniente a la atención auditiva, la identificación de palabras y el reconocimiento de lo escuchado.



Representación de la corteza auditiva (Imagen extraída de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK10900/>)

Procesamiento temporal

Las teorías expuestas anteriormente sobre qué mecanismos intervienen en la percepción de la altura de un sonido están sustentadas sobre las bases de la espacialidad en el oído interno y de la transmisión de ésta a lo largo del sistema nervioso. Pero, tal y como avanzamos, las teorías basadas en la localización, no explican algunos fenómenos psicoacústicos importantes y por tanto se impone, bien una revisión de las mismas, bien otro enfoque explicativo de estos sucesos. Como teoría alternativa a la de la localización aparece la basada en el procesamiento de la información temporal que contiene toda onda; la teoría temporal o de la periodicidad. La teoría temporal sugiere que la altura está relacionada con el patrón temporal de los impulsos neurales originados por el estímulo. Primero hay que entender que la información nerviosa funciona por impulsos generados por la activación o la inhibición de las neuronas. Así, hemos de entender este impulso como una sucesión de “clics” que bien pueden contener una información temporal concreta, decodificable por el cerebro. La altura estaría relacionada con la distribución en el tiempo de los impulsos nerviosos, de manera que éstos proporcionarían una información precisa sobre el periodo (y por tanto sobre la frecuencia) de la onda sonora.

Sabemos que cuando un estímulo sinusoidal llega al oído interno, las oscilaciones de la membrana basilar estimulan las células pilosas que están en la zona de resonancia que corresponde a esa frecuencia. Cuando los cilios de estas células se

flexionan en una dirección determinada, las terminaciones nerviosas de las neuronas del ganglio espiral se activan. Siendo esto así, los cilios se moverán en base a la velocidad del movimiento de la membrana basilar y la flexión de estos cilios será proporcional a la velocidad del movimiento que los excita. Se ha observado que una fibra nerviosa asociada a una célula ciliada determinada tiene una mayor respuesta para la frecuencia que produce una oscilación máxima precisamente en la posición de la membrana basilar correspondiente a esa célula ciliada; esta sería la frecuencia característica de la neurona. La distribución real de cada impulso nervioso se produce en base a la posición de la onda de la membrana basilar respecto a la rampa timpánica y la vestibular como a la mayor intensidad de la vibración en dicho punto. Cuando la membrana basilar se flexiona en la dirección de la rampa timpánica el impulso se dispara mientras que cuando lo hace en el sentido de la rampa vestibular se inhibe. La información sobre el periodo de repetición de la onda sonora puede ser codificada como una especie de trenes de impulsos nerviosos. De todo esto puede inferirse que el intervalo de tiempo entre impulsos nerviosos será múltiplo del periodo de la onda sonora.

Este mecanismo del procesamiento neural de la información temporal, ha quedado demostrada con determinados experimentos, si bien está lejos de ser absolutamente explicada. Se ha visto que funciona bien a frecuencias bajas y medias pero que con magnitudes de frecuencia muy grande no es posible este registro de la información de temporal. Esto es debido a que el tiempo

entre disparo y disparo de una neurona tiene un límite pues requiere de un tiempo mínimo refractario para volver a transmitir el impulso. Por lo que, cuando la información temporal excede las posibilidades de las fibras nerviosas, este mecanismo deja de funcionar. Por ello las últimas tendencias se inclinan por aunar las dos teorías, la espacial y la temporal. Para frecuencias bajas predominaría el patrón temporal y para las más agudas la respuesta estaría más relacionada con la teoría del lugar.

Lo abordado en este artículo pretende exponer los planteamientos básicos que desde el punto de vista psicoacústico explican el proceso perceptivo del tono. Por ello toma como base experimentos y estudios en este campo, casi nunca emparentados con la realidad musical. Para empezar, la mayoría de lo referido lo es a tonos sinusoidales o puros. Pero estos sonidos apenas se dan en la naturaleza; pues algunos de los fenómenos explicados son extrapolables a los sonidos complejos, los sonidos musicales, pero otros no lo son en absoluto.

DOCUMENTOS BIBLIOGRÁFICOS

- Basso, G. *Percepción auditiva*. Universidad Nacional de Quilmes Editorial.
- Roeder, Juan G. *Acústica y Psicoacústica de la Música*. Ed. Melos.

SONIA SEGURA JEREZ