

APROXIMACIÓN PSICOACÚSTICA A LA PERCEPCIÓN DE SONIDOS COMPLEJOS

PSYCHOACUSTIC APPROACH TO THE PERCEPTION OF COMPLEX SOUNDS

Sonia Segura Jerez

Conservatorio Superior de Música *Andrés de Vandelvira* de Jaén.
Universidad de Jaén

RESUMEN

En este artículo se lleva a cabo una aproximación accesible a la manera en que el oído humano percibe uno o varios sonidos complejos. Es muy frecuente que en el contexto académico de la enseñanza musical se haga referencia a cuestiones psicoacústicas de manera general, sin llegar a matizar suficientemente las importantes diferencias perceptivas existentes entre los sonidos puros y los sonidos complejos. Esto choca con la realidad auditiva natural y musical, en las que la inmensa mayoría de los sonidos son complejos.

Palabras clave: psicoacústica; sonidos complejos; psicopercepción musical

ABSTRACT

This article presents an accessible approach to how the human ear perceives one or more complex sounds. It is very common that in the academic context of musical teaching, reference is made to psychoacoustic problems in a general way, without sufficiently qualifying the important perceptual differences between pure and complex sounds. This clashes with the natural and musical auditory reality, in which the vast majority of sounds are complex.

Keywords: psychoacoustics; complex sounds; musical psychoperception

QUÉ ES LA PSICOACÚSTICA

El estudio de todo lo referente a la percepción musical tendrá varias aplicaciones en la formación global del músico. Por un lado, vendrá a engrosar los conocimientos generales sobre la naturaleza de la música, entendiendo mejor muchas de las facetas de su teoría; además, hará más comprensibles muchas de las normas estructurales y organizativas de los diferentes sistemas musicales. Por otro lado, ayudará a adentrarse en las capacidades perceptivas propias, comprendiendo en mayor medida el mecanismo de la cognición musical auditiva.

Para no movernos inicialmente en el campo de las hipótesis extraídas de los numerosos estudios en el amplio campo de la psicopercepción musical, empezaremos en nuestro estudio a abordar los fenómenos más relevantes de la psicoacústica, es decir, todo lo relacionado con la percepción del sonido pero independiente del ámbito musical.

Basándonos en su definición física, el sonido es una perturbación que se propaga en un medio, y desde ese punto de vista lo estudia la acústica. Pero, tal y como plantea una pequeña paradoja, *si un árbol cayera en un bosque y no hubiera nadie que lo oyera, ¿el árbol produciría sonido?* Este planteamiento tiene como objetivo primordial la elucubración sobre la naturaleza de la *realidad*, y si ésta es independiente de ser o no percibida. Pero podemos trasladarla al radio de acción de nuestro tema. Lo cierto es que siempre que hablamos de sonido estamos sobreentendiendo que de alguna forma existe alguien o algo que puede percibirlo. En acústica la presencia de un receptor no es trascendente sino para hacer un registro de determinados parámetros, para lo cual se bastan los instrumentos y dispositivos ideados para estos fines. Y bajo este prisma sí que se produciría sonido en el planteamiento inicial. Pero lo cierto es que la definición real de sonido se elabora alrededor del estudio de uno de nuestros cinco sentidos, el oído. Así, el sonido tiene infinidad de consideraciones relativas a frecuencias y tiempos que determinan la psicología y la fisiología del proceso de audición.

La psicoacústica es una rama de la psicofísica. La psicofísica se encarga del análisis de la relación entre los estímulos físicos del ambiente y la sensación o los efectos que estos producen en la persona, estableciendo relaciones entre lo objetivo y lo subjetivo. La psicoacústica por su parte es el estudio de la respuesta perceptiva y psicológica ante un estímulo físico sonoro en la que interviene el cerebro como analizador de estos estímulos y generador de respuestas mentales y corporales. La percepción auditiva es una combinación de procesos mecánicos, acústicos, hidráulicos, neuronales y mentales que son los estudiados en la psicoacústica. Sus aplicaciones son utilizadas en diversas áreas, como: Acústica musical, Acústica Arquitectónica, Acústica Ambiental, Música, Musicoterapia, Electroacústica, Medicina, etc.

PRINCIPALES ELEMENTOS DEL MECANISMO DE LA AUDICIÓN

Dentro de la subjetividad propia de esta disciplina, los parámetros perceptibles más objetivamente analizables quizás sean la intensidad, la altura y el timbre. Otros fenómenos como la direccionalidad y espacialidad del sonido, las capacidades intelectuales musicales, los efectos anímicos y terapéuticos de los sonidos e incluso hechos algo más especiales como pueda ser la sinestesia (mezcla de sentidos), también ocuparían parte de la Psicoacústica, cada uno sujeto en mayor o menos medida a apreciaciones más relativas. Aunque serán varios los campos que iremos abordando dentro del estudio de esta disciplina, lo primero que debemos tratar es el conocimiento de todo lo referente a los mecanismos implicados en la audición.

La audición comprende los procesos tanto psicoperceptivos como fisiológicos que hacen posible la percepción del sonido mediante un mecanismo capaz de transformar una excitación puramente física en una sensación. Es un proceso complejo en el que intervienen numerosos factores y que puede articularse en dos mecanismos diferentes interconectados: la audición periférica (o sensorial) y la audición central (nerviosa). La primera hace referencia a la anatomía y funcionamiento del órgano sensorial del oído, todo

lo referente a su estructura y a su fisiología. La audición central estudia las estructuras del sistema auditivo central (nervios y cerebro) y su funcionamiento. Veamos en primer lugar el sistema auditivo periférico.

Audición Periférica. Anatomía y fisiología del Oído

El oído humano es un sistema perceptivo muy sofisticado capaz de detectar frecuencias acústicas comprendidas en el rango de entre 20hz y 20.000hz (20khz). Hay animales que son capaces de percibir frecuencias por encima y debajo de estos umbrales, tal es el caso de los murciélagos que perciben por encima de los 20khz (ultrasonidos) y de las ballenas que perciben por debajo de los 20hz (infrasonidos). Nuestro oído no está especialmente desarrollado en el registro de una banda muy amplia de frecuencias ni en los umbrales de audición. Sin embargo, sí que es particularmente sofisticado para la capacidad de distinguir los diferentes timbres. La razón de todo esto radica en la manera en que el sonido es recibido por nuestro oído y en cómo posteriormente es procesado.

Anatómicamente el oído tiene tres grandes secciones, el oído externo, el medio y el interno. En la primera unidad ya hicimos una aproximación a su estructura que ampliaremos algo más.

Oído Externo

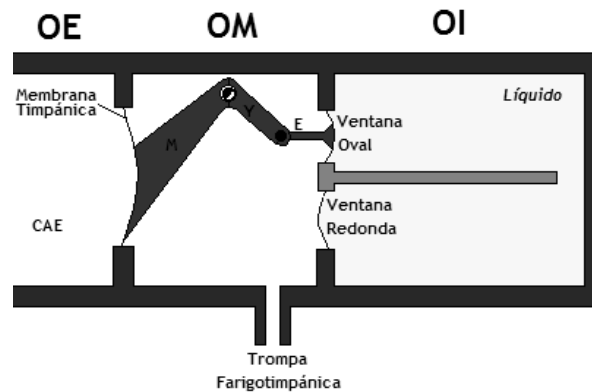
Está constituido por el pabellón auditivo y el conducto auditivo externo. La membrana timpánica podría considerarse tanto del oído externo como del medio puesto que su cara externa linda con el oído externo y la interna con el oído medio. El pabellón es un órgano cartilaginoso que cumple las funciones de un megáfono. Recoge las ondas sonoras y las conduce hacia el canal auditivo mediante reflexiones y difracciones. Si bien es direccional gracias a su relieve, lo es en mucha menor medida que la oreja de otros animales, tal como pueda ser la del perro o el gato, que además poseen un control voluntario de su orientación. Su forma es la adecuada para recoger al máximo el sonido; si cubriéramos sus protuberancias de alguna manera, por ejemplo con cera, podríamos comprobar fácilmente de qué manera disminuiría la percepción auditiva. Además de jugar un papel anti viento a modo del de los micrófonos, es de vital importancia para la localización de la procedencia de los sonidos. Sin la existencia del pabellón auricular los frentes de ondas sonoras llegarían de forma perpendicular, perdiéndose una parte importante del sonido. El canal auditivo, que mide unos 25 mm, conduce el sonido al tímpano. La parte más externa está recubierta por pilosidad y por glándulas sebáceas que segregan *cerumen*. Ejercen una acción higiénica al fijar y arrastrar lentamente hacia el exterior las partículas de polvo que de otra forma se depositarían en el tímpano. Una segunda función es proteger al oído de ruidos muy intensos y prolongados, ya que la secreción aumenta en presencia de tales ruidos, cerrando parcialmente el conducto. Éste actúa como un resonador cuya frecuencia de resonancia es aproximadamente de unos 3000hz y su comportamiento es similar al de un tubo resonante tapado.

Oído Medio

Está ubicado en la caja timpánica, y lo integra el *tímpano*, los *huesecillos* u *osículos*, y la *trompa de Eustaquio*. Desde el punto de vista estrictamente acústico, su misión es la de convertir las ondas acústicas en vibraciones mecánicas, a la inversa de lo que sucede en el foco generador de sonido. El tímpano es una membrana elástica, semitransparente y algo cónica, que comunica el canal auditivo externo con la caja timpánica. Recibe las vibraciones del aire y las comunica a los huesecillos. Es una membrana aproximadamente de unos 8-9 mm de diámetro y 0,1 mm de espesor y su vértice se presenta algo por debajo del centro uniéndose al martillo, primer huesecillo del oído medio. Se trata de un resonador muy amortiguado (resonancia amplia) por lo que posee un gran intervalo de resonancia de entre 20hz y 20.000hz. Separa dos cavidades llenas de aire, el canal auditivo externo y la cámara timpánica que alberga los tres huesecillos. El tímpano se comporta

como un parche que cierra el tubo del canal auditivo externo y que vibra siguiendo las oscilaciones de la onda sonora. Estas vibraciones las transmite al oído medio y pueden oscilar entre amplitudes bastante grandes. Gracias al *reflejo timpánico* o acústico cuando se aplican sonidos de gran intensidad (> 90 dB), los músculos tensores del tímpano y el estribo se contraen de forma automática, modificando la característica de transferencia del oído medio y disminuyendo la cantidad de energía entregada al oído interno. Este control se denomina reflejo timpánico o auditivo, y tiene como propósito proteger a las células receptoras del oído interno frente a sobrecargas que puedan llegar a destruirlas. No obstante, esta protección tarda en producirse aproximadamente medio segundo, por lo que en realidad estamos desprotegidos frente a sonidos muy violentos como explosiones o disparos.

De los tres huesecillos, el que está conectado con el tímpano es el martillo, que empuja al yunque, que a su vez mueve el estribo. Están sujetos por una serie de pequeños músculos y ligamentos y su finalidad es la de convertir las vibraciones de gran amplitud y poca presión en vibraciones de pequeña amplitud y mayor presión. De esta manera, las vibraciones del estribo son de mayor fuerza pero de menor amplitud. Así, la fuerza con la que el estribo empuja la ventana oval que conecta con el oído interno es 1,3 veces mayor que la fuerza que ejerce el tímpano sobre el martillo. El tímpano y la cadena de huesecillos actúan pues como un mecanismo transformador de las vibraciones del aire en vibraciones del fluido, puesto que el estribo está conectado con la linfa del oído interno.



4. Esquema de la propagación del sonido en el oído medio

La Trompa de Eustaquio comunica el oído medio con la faringe y su finalidad es igualar las presiones a ambos lados del tímpano. Normalmente permanece cerrada, abriéndose en acciones como tragar o bostezar. Si siempre estuviera abierta, el tímpano casi no vibraría, dificultando la audición. En el mero hecho inconsciente de tragar saliva la trompa de Eustaquio se abre, regulando continuamente y de forma involuntaria la presión del oído.

Oído Interno

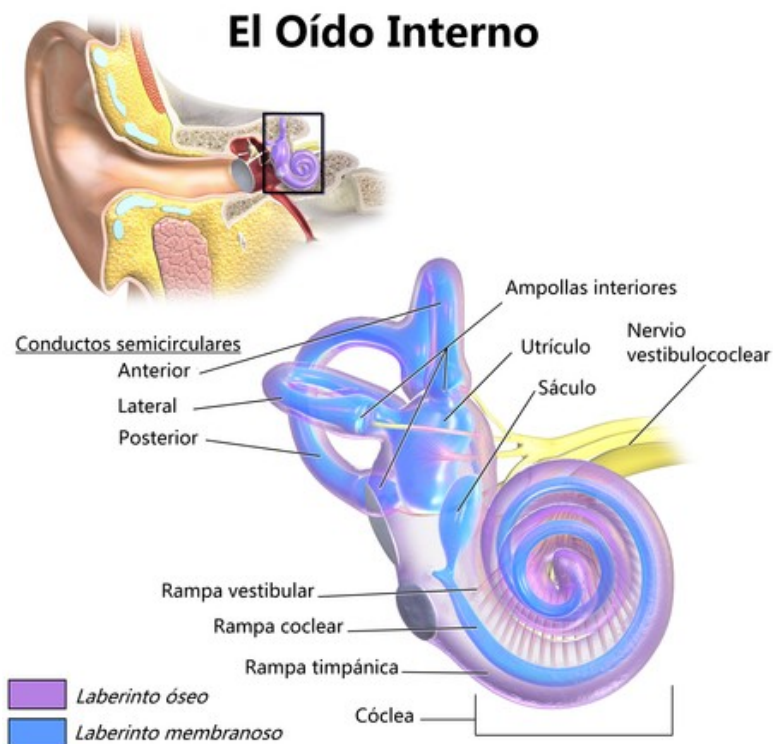
Consta de los canales semicirculares, el vestíbulo y la cóclea. Es una cavidad hermética llena de líquido denominado *linfa* (perilinfina y endolinfina) que proviene del líquido cefalorraquídeo. Los canales semicirculares no tienen relación con la audición sino que se encargan del sentido del equilibrio. El vestíbulo se comunica tanto con la cóclea como con los canales semicirculares y es un espacio ensanchado donde se ubican dos orificios, la ventana oval y la ventana redonda, ambas cubiertas por sendas membranas. La ventana oval está en contacto con el estribo el cual le transmite las vibraciones mecánicas de los huesecillos y la ventana redonda se comunica con la caja timpánica y vibra en fase opuesta a la ventana oval.

La parte más compleja del oído es sin duda la cóclea o caracol. Es un tubo enrollado en espiral formando dos vueltas y media, con una longitud de aproximadamente 3 cm. En el

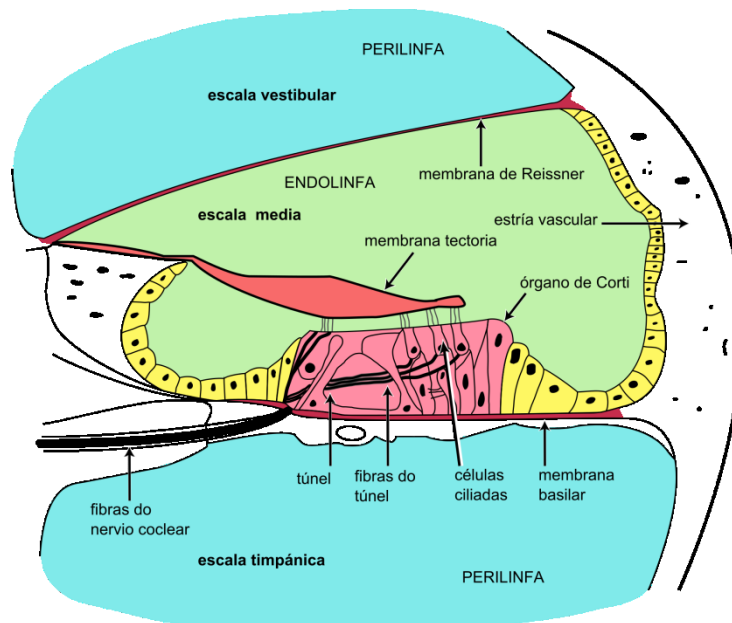
interior está dividido a su vez en otros tres conductos separados por dos membranas, la membrana de Reissner y la membrana basilar. Sobre la membrana basilar se asientan las células pilosas o ciliadas, de tipo nervioso. Estas células se dividen en externas e internas en un número aproximado de 20.000 y 3.500 respectivamente y forman el Órgano de Corti y están conectadas en su porción superior con la membrana Tectoria.

El tubo que forma la cóclea no tiene la misma sección en toda su longitud sino que en el lado más próximo al oído medio es algo más grueso (4mm^2) que en su extremo apical (1mm^2). La membrana de Reissner delimita una de los tres conductos existentes dentro de la cóclea, el canal o rama vestibular. La membrana basilar delimita por su parte con el canal timpánico o rama timpánica, y entre éste y el canal vestibular se sitúa el canal medio o coclear. El canal vestibular se comunica con el oído medio a través de la ventana oval mientras que el timpánico lo hace a través de la ventana redonda. Ambos están llenos de perilinfa, y el conducto coclear lo está de endolinfa. Los tres conductos no están separados a lo largo de toda la longitud de la cóclea sino que en su extremo más apical, llamado helicotrema, están comunicados. El papel fundamental de la linfa (tanto perilinfa como endolinfa) es proteger los delicados terminales nerviosos existentes en el caracol.

La membrana basilar no tiene el mismo ancho en toda su longitud sino que en su zona basal o más próxima al oído medio tiene unos 0,04 mm y en la porción apical unos 0,5 mm. Además la zona más estrecha es más rígida lo cual es importante para la capacidad discriminativa de frecuencias del oído.



5. Esquema del oído interno (Wikipedia)



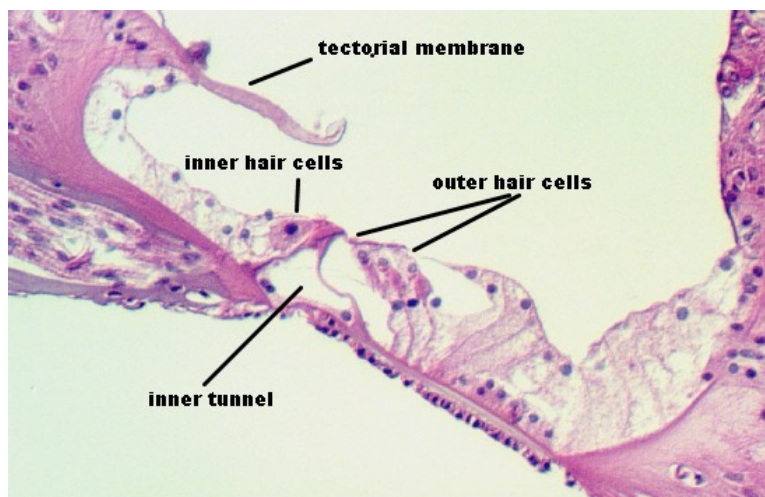
6. Sección de la Cóclea (Wikipedia)

Georg Von Békésy, premio Nobel de Medicina en 1961, elaboró su “Teoría de la Localización” mediante la cual explica el proceso de vibración específica de la membrana basilar en el oído interno. La descripción de este mecanismo, aunque se verá con profundidad más adelante, podría resumirse en las siguientes líneas. Los movimientos del estribo empujan la ventana oval provocando oscilaciones en el fluido de la escala vestibular (perilinfa), haciendo circular dicho fluido hacia la cavidad inferior a través del helicotrema. El abombamiento de la ventana oval produce por tanto otro abombamiento pero en sentido opuesto de la ventana redonda por el empuje del líquido. La membrana de Reissner, que separa la perilinfa de la rampa vestibular y la endolinfa del canal coclear, es sumamente delgada por lo que las oscilaciones de la perilinfa se transmiten a la endolinfa y de ésta a la membrana basilar. Todo esto hace que se origine una onda viajera a lo largo de la membrana basilar, onda que hará vibrar de forma diferente a dicha membrana dependiendo de la frecuencia del sonido percibido. Esta forma de vibración selectiva se produce gracias a la forma específica de dicha membrana y es la que hace posible la percepción de las diferentes alturas. Según esta vibración se produzca en una parte u otra de la cóclea percibiremos como más agudo o grave un sonido, registrándose los más graves al final de la membrana y los más agudos al principio de la misma¹

Hay que tener en cuenta que el Órgano de Corti se extiende a lo largo de toda la membrana basilar y por tanto cada punto donde se produzca la excitación estará asociado a unos terminales nerviosos concretos que transmitirán al cerebro los impulsos generados en el oído interno. Las terminaciones ciliares de las células pilosas se doblan hacia un lado u otro por efecto del movimiento simultáneo de la membrana basilar y de la membrana tectoria. El movimiento de dichos cilios hace que la conductividad de la pared celular de las células pilosas aumente, modulando una corriente eléctrica que fluye por dichas células y que estimula las terminaciones nerviosas. De esta forma, se crea el impulso nervioso que llegará al cerebro. La manera en que percibimos las alturas no depende solo del punto de vibración de la membrana basilar sino también de otros fenómenos. El movimiento de la membrana basilar ocasiona que las células ciliadas emitan un pulso eléctrico. Por tanto, el proceso de transducción o conversión de señal mecánica a electroquímica se desarrolla en

¹ En esta web se pueden ver algunas imágenes y animaciones de todo lo explicado:
<http://www.eumus.edu.uy/emc/ensenanza//acustica/presentaciones/sisaud/sistemaauditivo/oidoexterno1.html>

el Órgano de Corti. Obviamente, este proceso es mucho más complejo, y habría que tener en consideración otros factores, como que existen diferencias fisiológicas entre las células ciliadas externas e internas, que la carga eléctrica de la perilinfa y la endolinfa es diferente, etc. En realidad, el proceso de la audición en el nivel coclear es uno de los más complejos de todos los mecanismos fisiológicos del organismo humano².



7. Órgano de Corti (http://microanatomy.net/Ear/ear_lab.htm)

Audición central

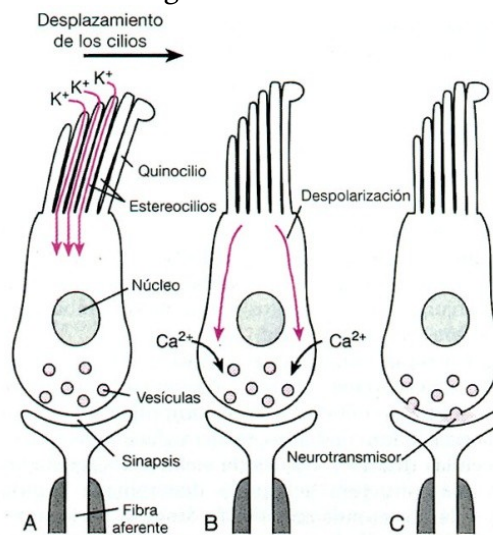
Hemos de hacer una precisión respecto a los términos audición periférica y central. En el tema anterior dividimos el procesamiento auditivo en audición periférica y central para distinguir lo concerniente al órgano del oído y lo referente a la neurofisiología auditiva. En realidad esta distinción, aunque aceptada en muchos casos, no es del todo correcta. Los términos periférico y central se utilizan para subdividir el sistema nervioso según la localización de los órganos que lo forman. Así, el sistema nervioso periférico abarca los nervios y otras subestructuras componentes de los mismos y el sistema nervioso central comprende el encéfalo y la médula espinal. En nuestro enfoque, denominamos audición periférica a la referente al órgano del oído puesto que el sistema nervioso periférico conecta con los miembros u órganos. La audición central es la propiamente neurológica.

Una vez estudiadas las principales estructuras y su funcionamiento, retomaremos el estudio del proceso auditivo a partir del interior de la cóclea, en las células ciliadas del órgano de Corti. La capacidad de transformar un tipo de energía en otra se denomina *transducción* y es exactamente lo que sucede en el interior del órgano de Corti. Sabemos que dicho órgano está compuesto por miles de células sensitivas ciliadas que se extienden a lo largo de la membrana basilar y que recogen los movimientos de ésta. Son las células ciliadas las encargadas de realizar la transducción o transformación de la energía mecánica de las vibraciones de la membrana basilar en energía bioeléctrica que conduce el estímulo sonoro hacia distintas estructuras encefálicas a través de los nervios. La endolinfa y la perilinfa tienen una concentración iónica diferente, de manera que la endolinfa presenta un potencial eléctrico ligeramente positivo (es rica en iones K⁺, y la perilinfa rica en iones Na⁺). Los movimientos de los cilios como consecuencia de la vibración de la membrana basilar hacen que se abran unas “puertas” en la membrana de las células ciliadas que permiten la entrada de iones K⁺ (iones potasio positivos) presentes en la endolinfa. Esto produce cambios eléctricos en las células creándose un potencial eléctrico que se transmite hasta la base de las células. La base de las células ciliadas a su vez está conectada con las terminaciones nerviosas encargadas de transmitir la información del oído. En el interior de

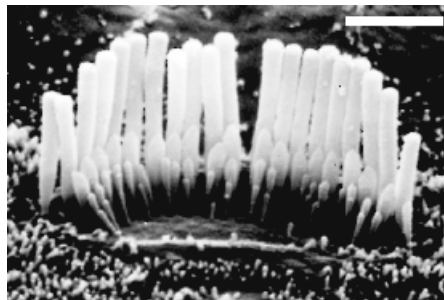
² Estos dos interesantes vídeos muestran el proceso de audición y la función del oído interno:
https://www.youtube.com/watch?v=eV_DnD3eIRw <https://www.youtube.com/watch?v=bWHIVn69YyY>

las células ciliadas existen unas vesículas con neurotransmisores. Los neurotransmisores son unas sustancias químicas encargadas de la conexión entre las neuronas, es decir de las sinapsis. El tipo exacto de neurotransmisores encargados de crear las sinapsis entre las células ciliadas y las vías nerviosas del nervio auditivo, no está del todo concretado con precisión, aunque se ha determinado que el glutamato es el principal neurotransmisor en la sinapsis entre las células ciliadas y las neuronas. Los neurotransmisores liberados producen en la terminación nerviosa que conecta con la célula en su base, un estímulo químico que genera una respuesta eléctrica, que a su vez se transmite a lo largo de la fibra nerviosa hasta alcanzar los centros nerviosos superiores sin perder su magnitud.

Las células ciliadas se distribuyen a lo largo de toda la cóclea, sobre la membrana basilar. Sabemos que una frecuencia determinada va estimular una zona específica de dicha membrana. Las frecuencias más agudas excitan la parte más cercana a la ventana oval y las frecuencias más graves estimularán la membrana basilar en su zona próxima al extremo apical (helicotrema) de la cóclea. Por tanto, las células ciliadas se moverán más en la zona donde la membrana basilar tenga un máximo de vibración³.



8. Transducción de una célula ciliada⁴



9. Imagen al telescopio electrónico de células ciliadas (<http://www.cochlea.eu/es/celulas-ciliadas>)

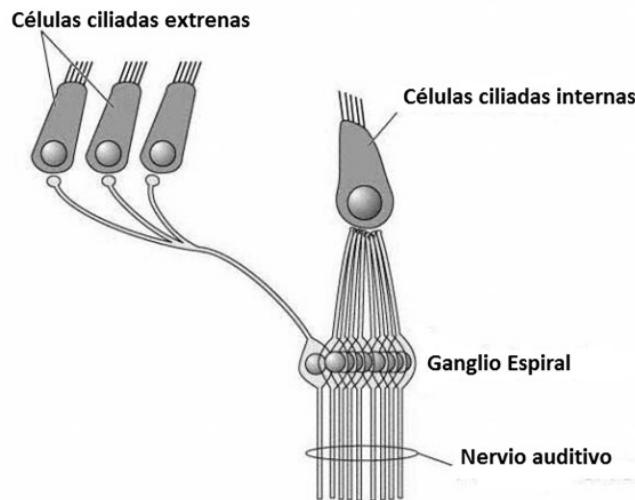
A partir de las inervaciones de las células ciliadas se inicia la Vía Auditiva. Esta es la que se encarga de transmitir toda la información recibida y procesada en el oído hasta el cerebro. Cada célula ciliada está inervada con terminaciones nerviosas, unas aferentes, es decir, van del oído hacia el cerebro y otras eferentes en sentido contrario. Hay dos tipos de células ciliadas: las externas, que se agrupan en tres filas, y las internas en una sola fila. Cada tipo se va a conectar con una clase diferente de fibras nerviosas, todas ellas confluyentes en lo que se denomina Ganglio Espiral que se extiende a todo lo largo de la

³ Para visualizar el proceso completo:

https://www.youtube.com/watch?time_continue=298&v=1JE8WduJKV4

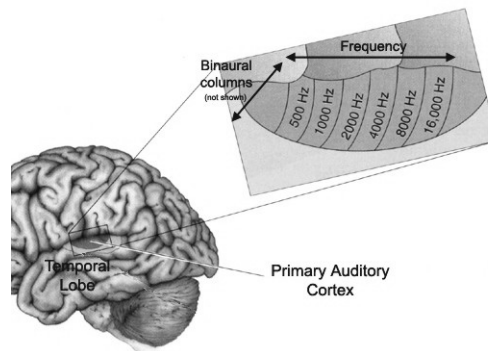
⁴Fuentes: http://163.178.103.176/Fisiologia/neuro_prac_bas_p9_4.html y <https://audiology.wordpress.com/la-coclea/mecanismos-de-transduccioncoclear/>

cóclea y del que a su vez parten las fibras que forman el nervio coclear (el nervio auditivo, también llamado vestibulococlear, está formado por el nervio coclear, encargado de la audición y el nervio vestibular, encargado del equilibrio).



10. Inervación de las células ciliadas

Como cada célula ciliada va a ser excitada o no en función de su posición en la cóclea, dependiendo de la frecuencia del sonido que llegue al oído, y, consecuentemente, las fibras que las enervan y que van configurando la vía auditiva, recogerán sólo la información de las células que son excitadas. Esto quiere decir que cada fibra que conforma el nervio auditivo va a tener una respuesta según la frecuencia del sonido que recibe el oído. De esta manera la información de la frecuencia o altura de un sonido es conducida hasta el cerebro a través del recorrido de la fibra o grupo de fibras nerviosas que parten de las células ciliadas estimuladas por la vibración de la membrana basilar. Es decir, la información auditiva es “tonotópica” (tono= altura, tópic= sitio, ubicación). Básicamente, es de esta manera cómo se transmite al cerebro una información selectiva sobre la altura de un tono.



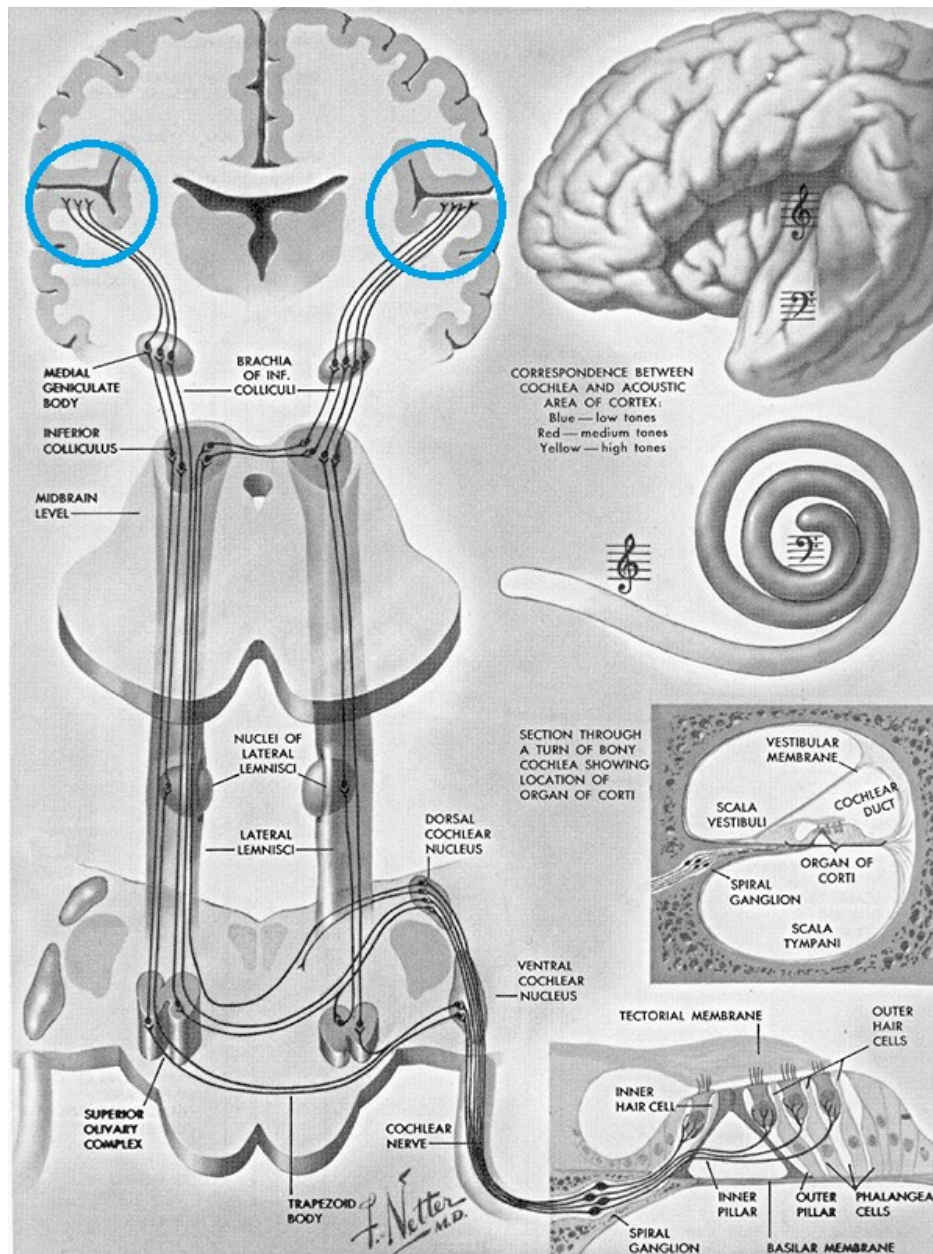
11. Tonotopía del córtex auditivo.

(<https://audiology.wordpress.com/vias-superiores/el-cortex-auditivo-the-auditory-cortex/>)

La vía auditiva tiene un recorrido complejo; la simplificaremos indicando las zonas anatómicas principales por las que discurre. El mensaje auditivo es tratado a cuatro niveles: en el tronco cerebral, en el mesencéfalo, en el diencefalo y en la corteza cerebral (córtex auditivo). Desde el tronco cerebral (4 en la figura), la proyección de la vía auditiva es bilateral (derecha e izquierda). Queda mucho por saber sobre la fisiología de los centros auditivos, aunque una cosa sí parece clara y es la existencia de una tonotopía frecuencial que se mantiene a lo largo de todo el recorrido de la vía auditiva y que es recogida por la corteza auditiva tal y como vemos a continuación.

En el proceso nervioso de la audición hay dos vías (al igual que cualquier otro proceso sensorial): una principal y otra secundaria. En la primaria existen zonas específicas para la

identificación de las diferentes frecuencias ya que cada fibra nerviosa que llega a ella desde la cóclea, posee su propia información respecto a la frecuencia. Esta vía está dedicada exclusivamente a la audición. La secundaria por su parte conduce hasta la corteza multisensorial, el hipotálamo y los centros vegetativos y se relaciona con las percepciones de otros sentidos, las funciones vegetativas e incluso las emociones. Las vías primarias y secundarias no han de estar necesariamente coordinadas ni tienen por qué funcionar de manera integrada. Por ejemplo, durante el sueño, podemos percibir los sonidos perfectamente ya que la vía primaria está plenamente operativa pero no percibimos conscientemente los sonidos. La corteza auditiva primaria tiene dos áreas cerebrales, mientras que la secundaria comprende hasta siete áreas en humanos. Estas áreas están relacionadas entre otras cosas con la percepción del lenguaje o la localización espacial del sonido (Jara O & Déllano R, 2014).



12. Recorrido de la vía auditiva aferente (Netter, 1991)



13. Relación de las vías primaria y secundaria. (<http://www.cochlea.eu/es/cerebro-auditivo>)

PERCEPCIÓN DE ALTURAS. SONIDOS COMPLEJOS

Ya hemos establecido sólidamente las bases que permiten comprender cómo funciona nuestro sistema auditivo a la hora de percibir el tono de un sonido. Si bien es cierto que la mayoría de los elementos estudiados han venido dados por experimentos con sonidos puros, veremos cómo los mecanismos implicados en el procesamiento de la información a partir de sonidos complejos, principalmente armónicos (de altura determinada), comparten muchos de las bases perceptivas de aquellos. Sin duda, la percepción de sonidos formados por un número más o menos elevado de frecuencias armónicas es bastante más compleja que la de sinusoides, estando en algunos casos no aclarados del todo los mecanismos implicados en el proceso. En este campo, el procesamiento en niveles superiores de orden neural tomará un relieve mucho mayor, respecto a la audición periférica, de índole más mecánica.

Para abordar el estudio de la percepción de alturas musicales (cualquier sonido complejo de altura determinada puede considerarse como “musical”, salvo algunos timbres percusivos), dividiremos el proceso de audición en dos grandes partes, tal y como hicimos en temas anteriores: por un lado, la audición periférica o propia del oído y por otro, la central o nerviosa. Podríamos emparentar la audición periférica al procesamiento espacial del sonido y la audición neural con el procesamiento temporal, obteniendo así un sistema que integra las dos teorías principales de la percepción de alturas, la de la localización o espacial y la de la periodicidad o temporal. Tal y como ya estudiamos, para explicar la totalidad de los fenómenos psicoacústicos relacionados con la altura, es necesario aceptar ambos tipos de procesamientos como complementarios aunque diferenciados. Se considera que, en general, el procesamiento espacial es el imperante a frecuencias más altas y el temporal a frecuencias más bajas. En la percepción de sonidos aislados sinusoidales sin embargo, la información referida al lugar de excitación es usada por el sistema auditivo a todos los niveles, de manera que el proceso temporal no es realmente utilizado en la percepción de sonidos puros, sino como medio de transmitir tonotópicamente el patrón de excitación de la membrana basilar. Esto no quiere decir que no intervenga en su identificación la vía auditiva nerviosa, indispensable para la transmisión de la señal al

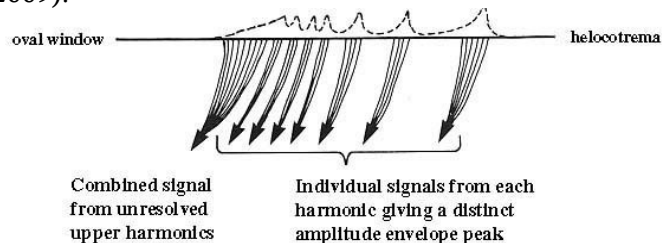
cerebro, sino que la audición de sinusoides no plantea la complejidad de los sonidos naturales a la hora de ser procesados.

En el tema anterior, al tratar los efectos que se producen cuando se registran dos sinusoides simultáneos, ya avanzamos algunas de las cuestiones referentes a la audición de sonidos complejos. Ahora trataremos los sonidos formados por dos o más parciales, es decir, todos los sonidos musicales. En una primera fase, en el procesamiento periférico del sonido, el oído es capaz de hacer una *discriminación en frecuencia*⁵ de manera que, mediante un proceso mecánico en el que intervienen las propiedades hidrodinámicas y elásticas de la cóclea, se originan en la membrana basilar diferentes puntos de excitación correspondientes a las distintas frecuencias de los parciales del sonido complejo. Esto haría que a través de la vía auditiva se transmitiera información sobre la altura de varios sonidos simultáneamente. Pero la realidad es que percibimos una sola altura en lugar de varias simultáneas. Esto hace pensar que debe existir un proceso por el cual se integren todos estos sonidos para sintetizarse en uno solo, correspondiente a la frecuencia fundamental. De esta forma, la teoría tradicional de la localización no podría explicar por sí sola la percepción de señales complejas, al igual que no explica los efectos de segundo orden estudiados en el tema anterior. Es por tanto el procesamiento auditivo en un nivel superior, es decir, el componente temporal de la señal sonora, el que tiene más trascendencia en la percepción de sonidos complejos.

La vía auditiva transmite y gestiona la información de la onda sonora y sabemos que tiene capacidad para ser sensible a la información temporal de dicha onda a partir de su tratamiento en el oído. Este procesamiento temporal es el que justifica hechos psicoacústicos como el tono virtual pero en sí mismo no parece suponer suficiente explicación para la percepción de un sonido con gran cantidad de armónicos. Hay básicamente dos enfoques teóricos para explicar la percepción de tonos complejos: por un lado el *modelo de reconocimiento de patrones* y por otro *los modelos temporales*.

Reconocimiento de patrones

Los sonidos musicales, y la mayoría de los sonidos utilizados en la comunicación humana, contienen parciales que son armónicos (instrumentos, voz, canto de pájaros, etc.). Este tipo de sonidos producen un complicado patrón de resonancia sobre la membrana basilar, con varios picos de amplitud correspondientes a cada una de las frecuencias de los armónicos (Basso, 2009).



14. Patrón de vibración de la membrana basilar de un sonido complejo⁶

Como se representa en la imagen anterior, los primeros 7 armónicos están suficientemente separados como para no interferir entre ellos y producirían señales más claramente procesables, mientras que los armónicos superiores, al estar interválicamente muy juntos, formarían una especie de conglomerado, más difícilmente procesable. Los tonos complejos periódicos producen en la membrana basilar una distribución espacial de

⁵ El término *discriminación en frecuencia* aparece con diferente significado en algunos libros, de manera que puede hacer referencia también a la capacidad para percibir cambios de frecuencia a lo largo del tiempo (G. Basso "Percepción auditiva"). Por otra parte, a la capacidad de separar un patrón vibratorio complejo se le puede denominar también *selectividad en frecuencia*.

⁶ Fuente: Campbell, M. & Geater, C. *The Musician's Guide to Acoustic*. Ed. Oxford University Press. New York, 1987

los diferentes máximos de amplitud de la onda compleja, correspondiente a cada uno de los armónicos, que siempre es la misma para este tipo de sonidos. Es decir, sea cual sea la frecuencia fundamental, el “molde” de distribución de vibraciones en la membrana basilar es siempre igual. Se supone que hemos “aprendido” a detraer una sensación única de altura a partir de una sucesión característica de diferentes frecuencias que están siempre en la misma relación matemática (f , $2f$, $3f$, etc.) y que responde a un “molde” específico. Este aprendizaje se daría en la fase más temprana del aprendizaje, cuando estamos expuestos sobre todo a sonidos del habla. Generaríamos un mismo patrón de respuesta ante una misma superposición de armónicos, independiente de la frecuencia fundamental o de la intensidad de cada uno de sus componentes. Cada vez que nuestro tímpano entrara en vibración periódica, aunque sea compleja, el hecho de que nuestro oído perciba una sola altura quiere decir que nuestro cerebro recibió el mensaje de que estamos ante un tono periódico. Nuestro sistema auditivo presta más atención al resultado originado en el mecanismo central del procesamiento de altura que a cada una de las alturas individuales de cada armónico. Todo esto sería gracias a la existencia a un *procesador central de altura* que permite transformar el patrón de actividad periférica (del oído) en otro patrón, de forma que todos los estímulos con la misma periodicidad, es decir, con la misma relación frecuencial entre ellos, se integrarán en una percepción unitaria, generando una única sensación de altura. De esta forma, la teoría de reconocimiento de patrones dividiría el proceso de audición en dos etapas. En la primera se haría un análisis en frecuencia en el oído interno para determinar los diferentes componentes de la señal compleja (discriminación en frecuencia). La segunda etapa consistiría en un reconocimiento de los patrones determinados que permitan detraer de la señal compuesta o compleja una única sensación de tono.

Este planteamiento está en conexión con una perspectiva gestáltica de la percepción. Y con las teorías de reconocimiento de patrones aplicables en informática, ingeniería y matemáticas. En el ámbito de la percepción visual, el reconocimiento de modelos es muy fácilmente comprobable, en un nivel muy simplificado. Por ejemplo, si se presenta una imágene como las que sigue,



aun sin que la estrella esté explícitamente dibujada, nuestro sistema perceptivo reconstruye un modelo previamente aprendido (en este caso, utilizando el *principio de cierre*). Podría extrapolarse en cierta manera este hecho al procesamiento de altura que hace que percibamos como una unidad toda aquella sucesión de sinusoides en una relación de frecuencias determinada, aún faltando muchos de sus elementos. Los experimentos sucesivos de diferentes investigadores fueron mostrando cómo con cinco, tres, dos (monoauralmente y dicóticamente), e incluso un solo armónico, se puede generar la sensación de altura de la fundamental. Las vías neurales de los procesos de aprendizaje explican la manera en que, entrenándose determinadas asociaciones de forma continuada, se trazan vías nerviosas, caminos neuronales, que hacen que en veces sucesivas no tengamos que reaprender la respuesta a determinados estímulos. De esta forma, se crearía un recuerdo asociativo que no exigiría de la presencia de todos los elementos de un patrón para que sea reconocido en su totalidad, como ocurre en la reconstrucción de la fundamental.

Este modelo explicativo de la percepción de sonidos complejos no está reñido con las teorías de localización para estímulos sinusoidales, pero sí la complementan. Si sólo

explicáramos la altura tonal con la mecánica coclear, tendríamos que suponer que llega al cerebro una gran cantidad de sonidos armónicos que deberíamos escuchar todos a la vez, y sabemos que esto no es así. Por tanto, los modelos de reconocimiento de patrones y los modelos temporales vienen a explicar cómo procesamos toda esta compleja información proporcionada por muchos sinusoides simultáneos. Además, en las teorías clásicas se suponía que la altura percibida dependía de la fuerza del primer armónico, es decir, de la fundamental, y sin embargo hemos visto cómo la altura percibida sigue existiendo aunque no esté presente la fundamental, de lo que se deduce que la altura depende de la interacción de los armónicos, no de la fundamental misma. En la fase inicial de la vía auditiva, existiría una correlación espacial muy específica entre las fibras nerviosas activadas y la posición del estímulo en la membrana basilar. A medida que avanzamos en el trayecto neural, esta correspondencia tonotópica se va perdiendo gradualmente, efectuándose un análisis más global del estímulo sonoro. En definitiva, en este tipo de modelos explicativos, se supone que debe existir un proceso central (nervioso) que sea capaz de reconocer, identificar y descodificar el patrón espacial concreto producido en el oído interno.

A continuación, mostraremos un experimento⁷ que fue el generador de este tipo de teorías y que pone de relieve cómo podría funcionar este *procesador central de altura* que permite ajustar una señal compleja a un molde determinado. Tenemos una sucesión de tres sinusoides con frecuencias 1800Hz, 2000Hz y 2200Hz. La diferencia entre ellos es siempre de 200Hz y podrían considerarse como los armónicos 9, 10 y 11 de una serie armónica cuya fundamental es 200Hz, y, efectivamente, la altura percibida corresponde a esta frecuencia. Si ahora tomamos tres sonidos de 1840Hz, 2040Hz y 2240Hz, tendremos tres sonidos cuya diferencia entre sí es también de 200Hz pero que sin embargo no se corresponderían con ninguno de los armónicos de la serie cuya fundamental fuera 200Hz. Es decir, no hay ninguna serie armónica que contenga estos tres armónicos como sucesivos, aunque sí que hay varias que los contienen como armónicos discontinuos. Si suponemos que la fundamental de una serie de varios armónicos es siempre la altura de menor frecuencia en cuya serie se incluyen dichos sonidos, encontraríamos que en una serie con una fundamental de 40 Hz, estos tres sonidos serían los armónicos 46, 51 y 56 de dicha serie. Estos armónicos son claramente muy lejanos de la fundamental, además de no cumplir la premisa de ser armónicos contiguos. Pero entonces, ¿qué altura se percibiría? Nuestro sistema auditivo, que hemos dicho que reconoce un molde en el que la sucesión de sonidos esté separada por una misma distancia, ¿qué altura identificaría? Cabría esperar que el molde se ajustara, de manera que buscara la fundamental de la cual serían armónicos estos tres sonidos; pero datos experimentales mostraron que esto no era así. Los oyentes percibieron un sonido cuya altura era de unos 204Hz, es decir, una cantidad muy próxima a la cantidad que separa a los tres sonidos y muy distante de los 40Hz que correspondería a la fundamental más grave. Surgieron varias teorías para explicar cómo era el ajuste de moldes en el sistema auditivo en sucesiones “inarmónicas” de sonidos. De esta forma, se consideró que la altura fundamental percibida podría deducirse mediante dos cálculos: primero se calcula la diferencia entre los diferentes armónicos, en este caso 200Hz y en segundo lugar se busca el armónico inferior más grave que se pueda obtener del sonido de menor frecuencia y que más se aproxime a esta diferencia (200Hz). En nuestro caso, este segundo paso se realizaría tomando 1840 y dividiéndolo hasta obtener la cifra más cercana a 200 y obtendríamos 204, fruto de dividir 1840 entre 9. Esta explicación es bastante satisfactoria pero incompleta ya que, además del sonido de 204 Hz, se vio que era posible percibir otros sonidos a la vez, en este caso de 185Hz y de 226Hz, que guardan poca relación con las operaciones explicadas. Por esto necesariamente se trazan otras teorías que expliquen todos los fenómenos posibles. Además de la investigación dentro de los modelos de reconocimiento de patrones, existe otro campo de estudio en este sentido que se fundamenta en los modelos temporales.

⁷ Schouten, J.F. et al.: *Pitch of the residue*. Journal of the Acoustical Society of America. 34, 1428 (1962). <https://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1918360>. En Basso, G. *Percepción Auditiva*. Ed. Universidad Nacional de Quilmes. Buenos Aires, 2006.

Autores como Walliser⁸ y Terdhardt⁹ propusieron diversas explicaciones a este modelo de reconocimiento de patrones, explicando, entre otras cosas, que esta capacidad para reconocer determinados patrones temporales se adquiere en una fase muy temprana del aprendizaje y que se produce al margen de cualquier información de amplitud o fase de la onda sonora, analizando solo la información temporal. Estos modelos no implican el procesamiento de la información tonotópica, si bien sí necesitan de la explicación que presenta la membrana basilar como un analizador espectral de frecuencias.

Modelos temporales

Ya desde finales del siglo XIX se propuso la idea de que en la percepción de la altura de un sonido debía intervenir de alguna forma un procesamiento de la información temporal del estímulo sonoro. La teoría temporal relaciona la altura percibida con patrones de tipo temporal en el estímulo, en particular, su período, de manera que la actividad neuronal se realizaría en relación con dichos patrones temporales. De hecho, se ha investigado si una información exclusivamente temporal puede en sí misma originar una sensación de altura y se ha comprobado que sí. Presentando una señal de ruido de manera intermitente, con una periodicidad determinada, se pudo ver que, dentro de un margen determinado de frecuencias (entre 100Hz y 2000Hz), la mayoría de los oyentes percibieron una cierta sensación de altura tonal. Esta experiencia pone de manifiesto que existen mecanismos temporales en la percepción de alturas (Roederer, 2007).

En la percepción de sonidos complejos, la altura tonal es determinada por la periodicidad de los parciales involucrados en la determinación de la nota escuchada. En los modelos temporales, la altura percibida se determina por el intervalo temporal entre los puntos máximos de vibración producidos en la membrana basilar. En definitiva, las señales nerviosas se dispararían con un patrón determinado en función de la periodicidad de las ondas generadas en el oído interno, de manera que el sistema nervioso puede interpretar este patrón temporal en términos de una altura determinada.

Modelo de Moore¹⁰

Los dos planteamientos presentan limitaciones. Pero en realidad donde uno falla al explicar un hecho psicoacústico el otro puede encontrar justificación. Por ejemplo, el modelo de reconocimiento de patrones se basa en que la altura percibida es fruto de la interrelación de los primeros armónicos de la serie, cuyo patrón es reconocible. Pero se sabe que la altura también es percibida cuando los armónicos que la producen son más agudos de lo que dictaría esta teoría. Los modelos temporales sí podrían explicar este hecho pero a su vez no podrían funcionar en frecuencias superiores a los 5000Hz por superar la capacidad de respuestas de los impulsos nerviosos. Por esto, las teorías más modernas aúnan ambas, de manera que puede considerarse que forman parte de un mismo proceso. Algunos modelos, como el de Moore¹¹, describen el proceso de percepción de altura de sonidos complejos dividiéndolo en diferentes pasos. Primero, el estímulo sería procesado por el sistema de filtros de la membrana basilar; luego, se produciría la transducción de las células ciliadas para convertir la información en potenciales de acción nerviosos. La tercera etapa supondría la existencia de un dispositivo capaz de analizar la información temporal de cada frecuencia para seguidamente, en una cuarta etapa, buscar el intervalo de repetición más frecuente entre los diferentes armónicos (en una sucesión totalmente armónica sería el sonido fundamental; recordar la fundamental reconstruida).

⁸ Walliser, K. *The connotation of musical consonance*. Acta Psychol. 20, 308-319. (1969)

⁹ Terhardt, E. Zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen [On the perception of pitch in complex sounds]. Acustica, 26, 173-199. (1972)

¹⁰ Brian Moore, neurocientífico de la Universidad de Cambridge
<https://www.neuroscience.cam.ac.uk/directory/profile.php?bcjm>

¹¹ Moore, B. C.J. *An Introduction to the Psychology of Hearing*. Academic Press. 1989

En la quinta etapa entrarían en juego la memoria, el aprendizaje, la atención, etc. y se haría la selección del modelo que más se ajuste a la información acústica recibida.

PERCEPCIÓN SIMULTÁNEA DE VARIOS SONIDOS COMPLEJOS

Si descifrar por completo el procesamiento auditivo que conduce a la percepción de un solo sonido a partir de varios armónicos es en sí complejo, explicar la manera en que somos capaces de discriminar varias alturas concretas a partir de multitud de armónicos lo es aún más. Tanto es así que todavía existen cuestiones sin resolver en absoluto en este sentido. Cuando percibidos dos sonidos complejos pueden ocurrir en general dos cosas: puede que el sonido más agudo forme parte de la serie armónica del más grave, o bien puede que no sea así. En el primer caso, la altura percibida en el tono más agudo es coincidente con uno de los armónicos del más grave, y en tal caso, ¿por qué no se integra en el timbre del sonido más grave y percibimos solo una altura? Es más, ¿cómo es posible que escuchando dos alturas diferentes podamos distinguir dos timbres también diferenciados? Y en el caso de que el sonido más agudo pertenezca a la serie del más grave ¿cómo sabemos qué armónico pertenece a qué fundamental?

La altura de los sonidos es gestionada, como hemos visto, por el procesador central de altura, es decir, a lo largo de la vía auditiva debe haber un proceso por el cual se detraiga una única sensación de tono. Pero el proceso con varios sonidos complejos es especialmente complicado. Cuando dos tonos musicales llegan al oído, en la membrana basilar se crean todas las zonas de excitación correspondientes a cada uno de los armónicos de cada sonido. Pero cuando el oído interno realiza esta función de análisis, las terminaciones nerviosas unidas a las células del órgano de Corti no tienen modo de saber qué armónico pertenece a quién. Sobre la membrana basilar se crean multitud de zonas de excitación sin saber a qué serie armónica pertenece cada una de ellas. Por lo tanto, esta discriminación debe producirse en la vía auditiva y está relacionada estrechamente con el procesamiento temporal de cada una de las señales. Aplicando lo estudiado en cuanto a la percepción de sonidos complejos, podría deducirse que, a pesar de la multitud de sonidos existentes cuando confluyen dos o más tonos complejos, tanto el reconocimiento de patrones espaciales en la membrana basilar a cargo del sistema nervioso, como el procesamiento temporal de la señal compleja (también a cargo de la vía auditiva) pueden explicar la diferenciación de cada sonido fundamental al aplicarse un ajuste al modelo que mejor justificara la asociación de los armónicos. Por lo tanto, se extrapolaría el proceso de un solo tono fundamental a partir de su serie a la de varios tonos a partir de sus series.

Así pues, la altura de dos sonidos es discriminada por el procesador central de altura. Pero, además de las dos alturas de dos sonidos complejos, podemos diferenciar sus respectivos timbres, discriminación esta aún más fina. Imaginemos dos sonidos que comparten gran cantidad de armónicos, como pudiera ser el caso de un intervalo de octava, pero cada uno tocado por dos instrumentos diferentes. Existiría un número importante de armónicos que serían coincidentes y por tanto mezclables, y sin embargo seguiríamos diferenciando ambos timbres. Las razones de esto no están aún resueltas del todo. Por un lado, se supone que el ataque puede ser un elemento diferenciador. Sabemos que el ataque, es decir, la evolución de la amplitud a lo largo del tiempo, es diferente en cada instrumento, por lo que este desfase temporal podría servir de rasgo diferenciador. Por otro, otras características tímbricas, como pudiera ser el vibrato, podrían también permitir sistema auditivo procesar de forma diferenciada ambos timbres.

Dos sonidos complejos pueden presentarse de manera melódica o armónica y el proceso de discriminación entre ambos sería diferente en cada caso. Si los percibimos de forma melódica el oído no podrá utilizar la información temporal que los diferencie sino simplemente juzgar la distancia que existe entre ellos. En este sentido, tiene especial importancia el papel de la memoria a corto plazo y otras funciones y facultades intelectuales. Podría pensarse que es mucho más fácil distinguir dos sonidos simultáneos que dos que lo hacen sucesivamente ya que en el primer caso, el sistema auditivo puede comprarlos en términos de información temporal de manera simultánea. Pero la realidad es

que esto no es en absoluto así, cuando se trata de saber exactamente cuál es la distancia entre ellos (intervalo). La audición de intervalos melódicos permite un ajuste a modelos aprendidos intelectualmente que asisten muy eficazmente al proceso de diferenciación y, a la vez, de asociación. Principalmente es la espacialidad que confiere la escala musical la que permite comparar y equiparar lo que percibimos a un intervalo determinado.

Lo estudiado sobre la interacción de dos sonidos simultáneos puros es en cierto modo extensivo a los sonidos complejos. Los sonidos resultantes también pueden producirse utilizando instrumentos siempre que el timbre del mismo pueda desproveerse lo más posible de armónicos, como en el caso de la flauta, otros instrumentos de viento o el violín. La existencia de batidos de primer orden en los sonidos complejos es un hecho bien conocido por los músicos y fácil de entender si extrapolamos los que se producen entre dos sonidos simples y los que se producirían entre las fundamentales de los dos complejos, y entre sus armónicos. Solo los primeros armónicos son importantes y habitualmente los batidos de la fundamental son los más relevantes. Los batidos también existen en intervalos más grandes debido a los batimentos entre sus armónicos, y no al procesamiento neural, como ocurría en los batidos de segundo orden.

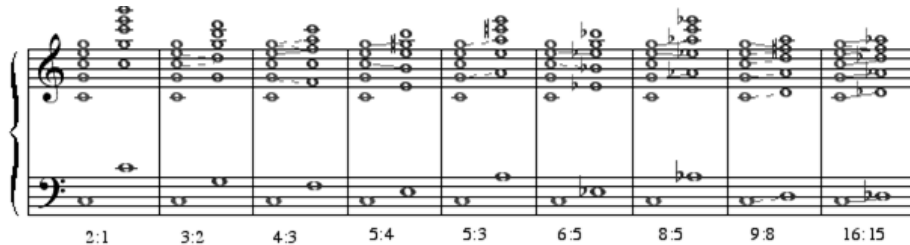
En la percepción de la altura de un sonido y, por extensión, de un intervalo, se diferencian dos cualidades del mismo. Por un lado se habla de la altura tonal, y por otro del *croma*. La altura tonal es aquella que viene dada por su frecuencia; sería diferente para cada nota perceptible. El croma hace referencia a la cualidad de un intervalo determinado, que hace que exista una identidad para cada intervalo, independientemente de la octava en la que se encuentre. Es una propiedad esencial que proporciona un “color” sonoro común a los sonidos cuya altura dista exactamente una o varias octavas. Psicoperceptivamente, es una propiedad que no se da en ningún tipo sensorial y es exclusivo del sonido. El porqué de este hecho puede tener fácil explicación si tomamos en cuenta diversas circunstancias. Por un lado, recordaremos que un mismo tipo de intervalo ocupaba la misma longitud de la membrana basilar, independientemente del valor en Hz de aquél. Esto podría relacionarse con el proceso de reconocimiento de patrones que permitiría reconocer como similares aquellos intervalos que tengan la misma correspondencia espacial en la membrana basilar. Además de esto, la octava tiene una circunstancia diferencial al resto que la asemeja al unísono, y es que el sonido superior tiene todos los armónicos pares coincidentes con el sonido grave, a lo que hay que añadir que es el único intervalo cuya frecuencia de repetición de la onda compleja coincide con un sonido que forma el intervalo.

PRINCIPIOS PERCEPTIVOS DE CONSONANCIAS Y DISONANCIAS

El concepto de consonancia y disonancia tiene un fuerte componente cultural. Sin embargo, existen razones objetivas psicoacústicas para que unos intervalos suenen más bien sonantes que otros. De esta forma, parece que la mayoría de las músicas del mundo presentan una preferencia por los intervalos de octava, quinta y cuarta y otros como las terceras, frente a los que consideramos más disonantes. Es del todo significativo que estos intervalos coincidan con los primeros armónicos de la serie armónica, armónicos más trascendentes en los principales fenómenos psicoacústicos.

El concepto más antiguo sobre la consonancia es el que considera que el grado de consonancia o disonancia de un intervalo dependía de la relación entre las frecuencias de las notas que lo forman. Así, una octava cuya relación es $\frac{2}{1}$ presenta una relación más sencilla que una quinta $\frac{3}{2}$ y esta a su vez que una cuarta $\frac{4}{3}$. Desde Helmholtz, el concepto de consonancia estaba ligado a la banda crítica en el sentido de que cualquier par de sonidos que se distanciaran menos del ancho de banda crítica serían percibidos como una sonoridad desagradable. Pero en el caso de las disonancias entre notas que distan más de una banda crítica, se considera que el grado de disonancia depende de los batidos

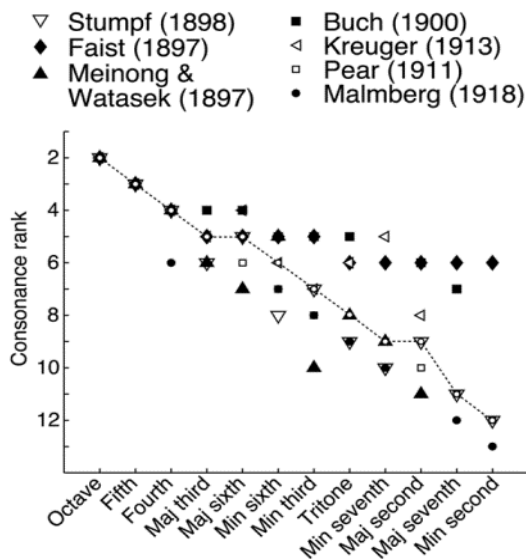
generados entre los armónicos o fundamentales de ambos sonidos, a la luz de los experimentos de Plomp y Levelt¹². Por tanto, los choques entre los armónicos que se sitúen a menos de una tercera menor formarán batimentos que proporcionan una cualidad relativamente malsonante al intervalo. En general, batimentos cuya frecuencia de pulsación esté entre 30 y 130 Hz crean una sensación desagradable (aspereza). Por ejemplo, dos sonidos cuyas frecuencias difieran unos 45 Hz generarían una sensación desagradable, como ocurre en el caso de una segunda mayor en la octava central del piano. Sabemos, no obstante, que el ancho de banda crítica no es el mismo en Hz en el registro grave, en el medio o en el agudo, por lo que la aparición de batidos entre dos frecuencias dentro de una banda crítica será diferente en uno u otro registro. En el grave, las diferencias en Hz entre intervalos son más pequeñas que en el registro agudo, por lo que las frecuencias de batidos son menores. Esto haría suponer que las disonancias producidas por los batimentos entre las fundamentales serían también menores y por tanto percibiríamos como consonantes intervalos relativamente pequeños: pero la realidad demuestra todo lo contrario. Por un lado, en los sonidos graves la interacción de los armónicos superiores es especialmente relevante aunque los batimentos entre fundamentales sean leves, no así en los superiores. Por otro, sabemos que la DAP es mayor en el registro grave y que por tanto nuestra capacidad para discriminar claramente sonidos simultáneos es mucho menor en el grave que en el agudo. Por tanto, es más fácil percibir un intervalo como disonante a bajas frecuencias que a altas. En las siguientes imágenes se presentan los choques de segunda entre los armónicos y fundamentales en los diferentes intervalos de la escala, así como la relación numérica en los mismos.



16. Choques de segunda (batimentos) en diferentes intervalos (y su relación numérica)

Por otro lado, sabemos que los sonidos reales tienen espectros muy variados, en los que la intensidad de cada armónico varía según el timbre. Por ello, dependiendo del instrumento, la intensidad, el registro, etc. existirá una gradación del efecto disonante en los diferentes intervalos. Si por ejemplo se produjera un choque de segunda entre dos armónicos de poca relevancia en el espectro propio de un instrumento, la disonancia se vería en cierto modo amortiguada. Por esto no siempre un mismo intervalo produce la misma sensación consonante o disonante. Incluso ocurre que, aún usando los mismos timbres, se encuentran diferencias cuantitativas entre un mismo intervalo, de forma que unos experimentos muestran como más consonante la sexta mayor que la tercera menor y otros lo contrario. Las razones para estas discrepancias pueden ser, la formación musical o no de los sujetos, el timbre escogido, la intensidad, el ámbito o registro en el que se desarrollen las pruebas, etc. En la siguiente imagen podemos ver las diferentes mediciones obtenidas por varios investigadores. No se especifican las condiciones de cada medición por lo que no podemos valorar en profundidad el porqué de las diferencias. En los intervalos perfectos y en los más disonantes no suele haber demasiada discrepancia, no así en las consonancias imperfectas.

¹² Plomp, R. y Levelt, J.M. *Tonal Consonance and Critical Bandwidth*. Journal of the Acoustical Society of America, 38, 548-560.



17. Calidad disonante de los intervalos para diferentes ¹³

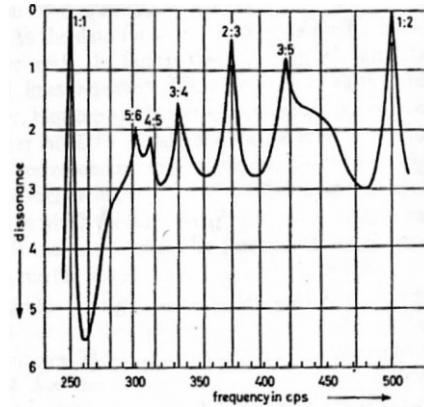
Las teorías fundamentales que pretenden explicar la cualidad consonante o disonante de un intervalo podrían resumirse en tres. La primera es la más antigua y dice que cuanto más simple sea la relación de frecuencias entre los sonidos, más consonante será el intervalo que forman (teorema de Tyndall). La segunda (Helmholtz) explica el grado de consonancia de un intervalo según la existencia de batidos entre las fundamentales y los armónicos de los dos sonidos. Ya avanzado el siglo XX Békésy y Plomp, determinaron que no siempre la presencia de batimentos producía un efecto desagradable, inductor de disonancia. Si la frecuencia era baja se percibía un trémolo en lugar de una disonancia. Si los sonidos se separaban más, sí existiría una aspereza malsonante. La sensación disonante por tanto estaba ligada al ancho de banda crítica existente en cada uno de los sonidos. Estos grandes grupos de teorías explicativas de la cualidad disonante de un intervalo mayor de una banda crítica también podrían clasificarse de la siguiente forma, completando la anterior:

La teoría de la proporción. Se basa en la concepción pitagórica de que cuanto más sencilla sea la relación de oscilación de dos tonos, tanto más consonante será el intervalo. Así las octava (1:2) es más consonante que la 5ª (2:3) y ésta a su vez que la cuarta (3:4). Sin embargo es una teoría excesivamente simplista y no explica todo el fenómeno.

Teoría de la afinidad sonora (Helmoltz). Se basa en el planteamiento de que un intervalo es tanto más disonante cuanto mayor sea el número de choques de 2ª - sobre todo si son menores- que se produzcan entre sus diferente armónicos Esta teoría funciona mejor hasta el octavo parcial.

Teoría de tonos parciales auditivos y residuales (Reinicke y Cramer). Viene a completar y ratificar la anterior y toma en cuenta los armónicos y los sonidos residuales que se generan en la perilinfa cuando hay choques entre los parciales de un intervalo.

¹³ Fuente: David A. Schwartz, Catherine Q. Howe and Dale Purves. *The Statistical Structure of Human Speech Sounds Predicts Musical Universals*. Journal of Neuroscience 6 August 2003, 23 (18) 7160-7168



18. Disonancia/consonancia en los intervalos principales para Plomp y Levelt (1965)

Helmholtz estableció una tabla de clasificación de las consonancias y disonancias: Consonancias absolutas: Octava; Consonancias perfectas: Quinta y cuarta; Consonancias medias: Tercera mayor y sexta mayor; Consonancias imperfectas: Tercera menor y sexta menor; Disonancias: Segundas, séptimas y tritono.

Un experimento relevante a principios del siglo XX fue el realizado por Malmberg. En su experiencia se sirvió de oyentes formados musical y culturalmente y les hizo clasificar en términos de aspereza, suavidad, mezcla, etc. los principales intervalos musicales, obteniendo exactamente los mismos resultados que Helmholtz, décadas atrás. Estudios posteriores entre músicos o estudiantes de música ofrecerían los mismos resultados que Helmholtz y Malmberg.

El estudio psicoacústico de la disonancia es verdaderamente complejo ya que hay numerosos factores que van a determinar la valoración como biensonante o no de una sonoridad. Influyen elementos culturales de los oyentes, la intensidad, el sistema de afinación escogido, el registro, el timbre y el tipo de sonido. Ya se han comentado algunas de las diferencias perceptivas en este sentido, pero quizás un caso especialmente claro es el que muestra en qué manera difiere la cualidad consonante de un intervalo cuando los sonidos que lo forman son simples o complejos. Los experimentos de Plomp y Levelt dieron como resultado que siempre que dos sonidos estuvieran por debajo de una tercera menor, eran considerados disonantes. Los intervalos por encima de la tercera menor eran percibidos todos como más o menos consonantes, al margen de la relación de frecuencia entre los dos sonidos. Algunos resultados nos sorprenderían, ya que, por ejemplo, hay un mayor número de sujetos que escuchan la cuarta justa como consonante respecto a la quinta, y la tercera mayor la consideran estadísticamente más consonante que la cuarta y la quinta. En los experimentos del mismo Plomp con sonidos complejos, los resultados son diferentes, a pesar de que se sirvió de sonidos generados por medios electrónicos, con pocos armónicos y todos de la misma intensidad, condiciones que aún distan bastante de los sonidos naturales. Otros experimentos más actuales han mostrado que el grado de consonancia es mayor con instrumentos musicales que con timbres artificiales, salvo algunos casos reseñables como la tercera menor y la sexta mayor en el clarinete que resultan comparativamente más disonantes.

Son muchas las teorías existentes que intentan explicar el fenómeno de la consonancia musical, concentradas en cuatro grandes grupos: las teorías acústicas, las psicoacústicas, las cognitivas y las culturales.

REFERENCIAS

- Basso, G. (2009). *Percepción auditiva*. Buenos Aires: Universidad Nacional de Quilmes.
- Geller, D. (2004). *Tratado práctico de entonación para instrumentistas y cantantes*. Cornellá del Llobregat: Idea Books.
- Jara O, N., & Délano R, P. H. (2014). Avances en corteza auditiva. *Revista de Otorrinolaringología y Cirugía de Cabeza y Cuello*, 74(3), 249–258. <https://doi.org/10.4067/S0718-48162014000300010>
- Merino, J. M. (2006). *Las vibraciones de la música*. Alicante: Editorial Club Universitario.
- Netter, F. (1991). *The Ciba collection of medical illustrations*. New Jersey: Ciba-Geigy Corporation.
- Roederer, J. G. (2007). *Acústica y Psicoacústica de la Música*. Buenos Aires: Melos.