

El oído y la música

Enrique
Soto

Durante los años que pasamos en la escuela se nos enseña a pensar en el sistema nervioso y en los órganos de los sentidos como entidades pasivas que son activadas y responden a los estímulos del medio, como si se tratara de sistemas que sin estímulo dejan de operar. Esta forma de entender impide darnos cuenta de que el sistema nervioso y los órganos de los sentidos interactúan de forma dinámica con el medio, no son entidades pasivas, sino que tienen una actividad propia, independiente del medio, y que se modifica en concierto con el medio. Si se estudia la actividad eléctrica del sistema auditivo, encontraremos que todos sus elementos están constantemente activos, y que las neuronas de la vía auditiva descargan potenciales eléctricos, haya o no algún estímulo sonoro. El sistema, más que como un detector pasivo, hace una búsqueda activa. Esto implica que los estímulos del medio no activan al sistema auditivo, sino que modifican una dinámica preexistente. La respuesta de los órganos de los sentidos y, más aún, de los sistemas superiores de análisis depende del estado del sistema y de su dinámica particular en el momento en que interactúa con el estímulo y, no sólo de las propiedades de este último. La actividad sensorial se desarrolla de forma continua y, más que como un canal de entrada de información, los órganos sensoriales deben ser concebidos como una interfase en donde el sistema nervioso interactúa activamente con el medio ambiente. En relación con esto, existen diversas evidencias que indican que en los sujetos con entrenamiento profesional en música, algunos aspectos de la fisiología del oído operan de forma diferente a como sucede en los individuos sin entrenamiento musical (particularmente se ha demostrado que un fenómeno conocido como supresión de emisiones otoacústicas por estimulación contralateral es mucho mayor en los músicos).

LA AUDICIÓN

En el caso del sistema auditivo está bien documentado que existen interacciones entre el sonido y el órgano receptor las cuales, como veremos más adelante, determinan que se produzcan importantes modificaciones en la amplitud y en otras características del estímulo incidente.

La función primaria del oído es la de convertir un patrón de vibración temporal, que se produce en el tímpano, en una configuración de movimiento –ondulatorio– en el espacio, que se genera en la cóclea (particularmente en la membrana basilar, véase Figura 1) y éste, a su vez, en una serie de potenciales eléctricos en las neuronas aferentes cocleares. La frecuencia de un sonido está representada por el sitio de la cóclea donde se originan las neuronas que éste excita, y su amplitud por la intensidad de la descarga de estas neuronas y también por el número total de neuronas que se activan. La actividad de las neuronas aferentes es entonces una función de la intensidad y de las magnitudes relativas de las diferentes frecuencias que componen un sonido.

En el procesamiento de la información auditiva podemos distinguir al menos tres niveles: uno periférico, que hace referencia a la detección de vibraciones sonoras y que se relaciona con el procesamiento al nivel del oído interno; da origen a las sensaciones primarias como el tono y la amplitud. Un segundo nivel de procesamiento intermedio, que permite detectar las variaciones transitorias en el sonido y su origen, y provee elementos adicionales para la percepción de la cualidad, la identificación del tono y la discriminación de los sonidos. En el caso de la música, es en este nivel que se percibe el tono de un instrumento, el ataque sonoro, el timbre y el ritmo. Este procesamiento se lleva a cabo en el tallo cerebral. Finalmente, un último nivel de análisis fino, en el cual los cambios temporales se procesan en los centros cerebrales superiores de la corteza cerebral, permitiendo detectar los atributos de la información auditiva y, en última instancia, lo que denominamos mensaje auditivo. Los aspectos más complejos de la música, como la melodía, la armonía, el contrapunto, etc., se integran en este nivel.

Conforme ascendemos en este proceso de análisis es más difícil identificar con precisión los procesos fisiológicos que dan origen a la percepción. A este nivel, el aprendizaje y el entorno cultural tienen una influencia muy importante, así como los estados emocionales del individuo. Por ejemplo, en

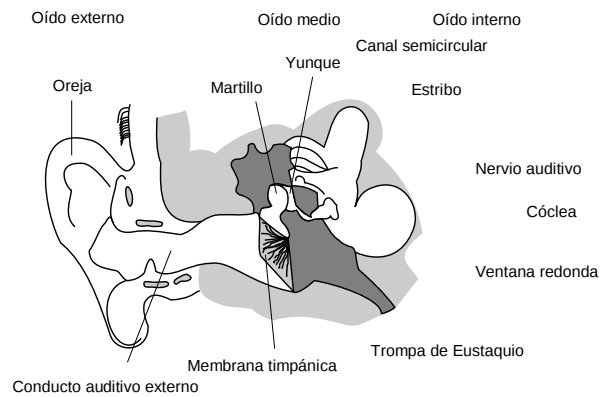


FIGURA 1. Estructura del oído en el humano. El oído externo está formado por el pabellón auricular y el conducto auditivo. El oído medio que forma la caja del tímpano, permite acoplar las vibraciones del sonido con la cóclea. El oído interno está formado por la cóclea, que es una estructura en forma de espiral donde se localizan las células sensoriales, asentadas sobre la membrana basilar, formando el órgano de Corti, equivalente de la retina en el ojo.

relación con las propiedades del sonido cabe preguntarse en qué términos puede uno cuantificar la sensación subjetiva de una melodía. Los sujetos pueden reportar si una sensación seguida de otra es mayor, menor, más clara, más pronunciada que la que le precede; si un tono fue de mayor, de igual o de menor frecuencia que el primero. De hecho, con un cierto entrenamiento, los sujetos pueden definir lo que llamaríamos una magnitud psicofísica, la cual equivale a precisar si un cierto estímulo es el doble o la mitad, hablando numéricamente, que una unidad de sensación de referencia; así es como se definen los decibeles.¹ Pero en lo que tiene que ver con atributos abstractos y altamente subjetivos como la melodía, el ritmo, el timbre y la armonía, los juicios simples no sirven, y los atributos perceptuales son complejos y en gran medida dependientes de la experiencia individual.

Un problema intrincado de la neuropsicología contemporánea consiste en definir y entender los procesos mentales que llevan a la percepción de fenómenos tan complejos como la música. ¿Qué es la música? ¿Por qué razón hay sonidos que nos agradan y otros que no? Podemos incluso ir más allá, si consideramos que todos estos procesos dependen de un cierto aprendizaje, y que en todas las culturas existe la música la cual, en sus expresiones más elementales, consiste de una secuencia organizada, estructurada y rítmica, una sucesión y superposición de tonos seleccionados de entre un repertorio limitado de tonos discretos y no tiene un equivalente en la naturaleza. Es claro, pues, que la música no tiene un significado biológico para el individuo; sin embargo, ciertas secuencias de tonos, superposiciones y sucesiones rítmicas son capaces de modificar nuestro estado de ánimo, inducir malestar, dolor



o emociones muy intensas; tanto, que una pregunta que ronda la mente es la de si la música puede llevar a un hombre del éxtasis a la locura. No conozco ningún caso preciso; recuerdo sí que los *doggies*, en el film *Naranja mecánica*, requerían de una fuerte dosis de su música preferida para realizar y disfrutar cabalmente de sus gándayadas.

EL GUSTO MUSICAL

Es probable que la música y el gusto musical sean un subproducto del desarrollo del lenguaje; la capacidad del cerebro para hacer un análisis completo de los estímulos auditivos, percibir el timbre, el tono, el ritmo, etc., tendría su función primaria en la percepción del lenguaje hablado. Un asunto sumamente interesante es el definir si existen condicionantes fisiológicos que contribuyan a determinar el gusto musical. Planteado de otra manera, me estoy preguntando si los mecanismos de operación del oído, de las vías auditivas o de los centros superiores de análisis, determinan que ciertos estímulos resulten placenteros, en tanto otros resultan desagradables, independientemente del aprendizaje y de la cultura del individuo. Aun más difícil será definir este asunto si es que nuestro gusto musical está en cierta forma, condicionado por nuestro lenguaje. Encontraremos así importantes diferencias culturales, pero que son difícilmente discernibles si nos concentramos en el estudio de la música y del aprendizaje musical, y que se harán claras únicamente cuando se analicen otros factores altamente correlacionados y potencialmente condicionantes, como las formas de expresión verbal.

Pero la pregunta sigue latente: ¿hasta qué grado el gusto musical, y eventualmente el gusto estético en general, están determinados por los mecanismos de funcionamiento de nuestro sistema nervioso? Discutir los extremos de este problema es trivial y ambos pueden ser fácilmente refutados: esto es, pensar que no existe ningún determinismo fisiológico, o que el gusto estético está totalmente condicionado por la estructura de la matriz neuronal² es trivial. Lo interesante sería definir en qué grado las propiedades mismas de la matriz neuronal participan en la definición del gusto; qué tan maleables son, y qué tan constantes de un individuo a otro. Personalmente no creo el dicho de que “cada cabeza es un mundo”, ya que ello implica un relativismo absoluto y cero determinismo por parte de esto que hemos llamado aquí la

matriz neuronal y que, en última instancia, es lo que forma al individuo. Está claro que tanto los umbrales de sensibilidad, como el espectro de frecuencias audibles y la capacidad de discriminación están determinados por la estructura del sistema auditivo. Como veremos más adelante, hay ciertas combinaciones de tonos que resultan desagradables al oído, la razón está tanto en las propiedades mecánicas de la cóclea como en las propiedades de la red neuronal que procesa la información auditiva, imponiendo con ello importantes condicionantes para la detección del sonido y la sensación emocional que éste puede suscitar.

EL CANTO DE LAS RANAS

El oído en el hombre y en los mamíferos superiores tiene un rango muy amplio de operación que abarca de tres a cuatro órdenes de magnitud en el conjunto de frecuencias que son audibles (desde alrededor de 20 a 20,000 Hz en el hombre). Esto indica que el oído funciona como un detector de amplio espectro que permite sentir el sonido proveniente de muy diversas fuentes. Se requiere por ende de un procesamiento avanzado de esta información para identificar su origen y sus cualidades. En contraste, cuando se estudia el oído de animales inferiores puede observarse que su rango de operación coincide con el tipo de sonidos que emiten sus predadores, sus presas y sus congéneres. En los animales inferiores, la audición no requiere de un procesamiento muy avanzado, excepto el necesario para determinar la ubicación de la fuente del sonido y eliminar sonidos interferentes, porque el oído mismo se comporta como un filtro que responde únicamente a ciertos patrones sonoros con características muy específicas.

Un ejemplo fascinante de esta sintonización entre emisor y receptor lo constituye el de las ranas en el Parque del Yunque en Puerto Rico. En esta región conviven más de diez especies de ranas, las cuales deben encontrar a la pareja correcta para aparearse, ya que si una rana de una especie responde al croar de una rana de otra especie, el apareamiento, en caso de que llegue a darse, sería improductivo. Entonces, si no hubiera un mecanismo altamente preciso de selección, que permita identificar sin duda el croar “correcto”, y los apareamientos ocurrieran al azar, sólo uno de cada diez podría llevar a la fertilización de los huevos. El oído juega un papel fundamental en este proceso de elección de las parejas por su canto; el oído de la hembra está sintoniza-

do a la frecuencia y los patrones sonoros del croar del macho; por lo tanto, las hembras tienen un sistema auditivo que, por la presión de la selección natural, responde a un patrón de sonido característico y les permite copular con la certidumbre de que han elegido la pareja adecuada.³ Estos fenómenos no son exclusivos de las ranas, en las aves existen mecanismos más desarrollados, pero que operan bajo los mismos principios.

Estos ejemplos resultan sugerentes y, si bien no existen evidencias definitivas al respecto, es probable que en el hombre operen mecanismos análogos, filogenéticamente emparentados, y que contribuyan a determinar el gusto musical y, por qué no, hasta participen en los complejos procesos de elección de la pareja.

EL OÍDO HUMANO

El oído en el humano está formado por tres partes: el oído externo, el oído medio y el oído interno (véase Figura 1). Brevemente podemos decir que el oído externo, formado por la oreja y el conducto auditivo externo, juega un papel determinante en los rangos de frecuencias audibles y en la detección de la fuente de un sonido. Mucho se ha discutido acerca del hecho de que las personas que tienen una detección perfecta del tono⁴ tienen una estructura peculiar de la oreja. En algunos animales, como el búho, las orejas juegan un papel primordial en su capacidad para detectar su posición en relación con un animal que se mueve.

El oído medio está formada por una cámara de resonancia y un conjunto de huesecillos que acoplan el tímpano con la ventana oval. La función del oído interno es transformar las vibraciones que el sonido produce en el tímpano en desplazamientos del líquido que llena el oído interno.

El oído interno es donde se ubica propiamente el órgano de la audición; está formado por la cóclea, que es una estructura de forma espiral formada por las células sensoriales y las células de soporte (véase Figura 2). Las células sensoriales especializadas en la detección de las vibraciones mecánicas que constituyen el sonido son las células ciliadas.

La cóclea en el adulto humano tiene una longitud de aproximadamente 34 mm; las células sensoriales forman parte del órgano de Corti, el cual está constituido por alrededor de 16,000 células sensoriales ordenadas en una fila de células cocleares internas y tres de células cocleares exter-

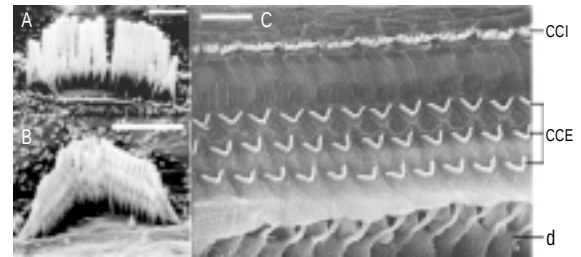


FIGURA 2. Organización de las células ciliadas en la cóclea. En A y B, acercamiento del conjunto ciliar de una célula coclear externa (CCE) y una célula coclear interna (CCI) respectivamente. Se puede notar que, en las CCE, los cilios adoptan la forma de una W, en tanto que en las CCI la de una V. Barras = 3 μ M. En C, micrografía electrónica de barrido de la cóclea humana vista desde la rampa media (luego de retirar la membrana tectoria). Se observan tres hileras de CCES y una hilera de CCIS. En el extremo fracturado, aparecen los cuerpos de la tercera fila de CCES y las extensiones falangeales de las células de Deiters (d), barra = 15 μ M. Fotografías de Marc Lenoir y Remy Pujol.

nas (véase Figura 2). El órgano de Corti se ubica sobre la membrana basilar la cual, debido a un cambio gradual en su ancho y en su grosor, decremente diez mil veces su rigidez desde la base hasta el ápex de la cóclea. Esta rigidez diferencial le confiere sus propiedades como analizador de frecuencias. Las diferencias de presión en los diferentes compartimentos de la cóclea y el flujo de líquido en el interior de este órgano, flexionan la membrana basilar hacia arriba y hacia abajo poniéndola en movimiento de manera similar a como el aire lo hace con una bandera; es lo que llamamos la onda viajera. En un punto específico esta onda tiene un máximo que depende de la frecuencia del sonido. Los desplazamientos de la membrana basilar hacen que las células ciliadas sean excitadas o inhibidas dependiendo de la dirección del movimiento. Entre menor es la frecuencia del tono, el máximo desplazamiento de la membrana basilar se produce más cerca del ápex de la cóclea; para frecuencias mayores, el máximo desplazamiento se localiza más cerca de la base de la cóclea. Este efecto desigual sobre la membrana basilar determina que se activen unos u otros grupos de células sensoriales, según la frecuencia del sonido (véase Figura 3). Dependiendo entonces de la región de la membrana basilar que oscila con mayor amplitud, las células ciliadas de esa área se activan en mayor proporción que sus vecinas, excitando subsecuentemente a las neuronas que hacen sinapsis con ellas. Este proceso ha dado origen al concepto de frecuencia característica para describir la forma en que las neuronas de la vía auditiva responden con un umbral especialmente bajo para los sonidos de cierta frecuencia, y tiene un papel fundamental en la discriminación de los tonos de un sonido. Cuando la frecuencia de un tono se duplica, es

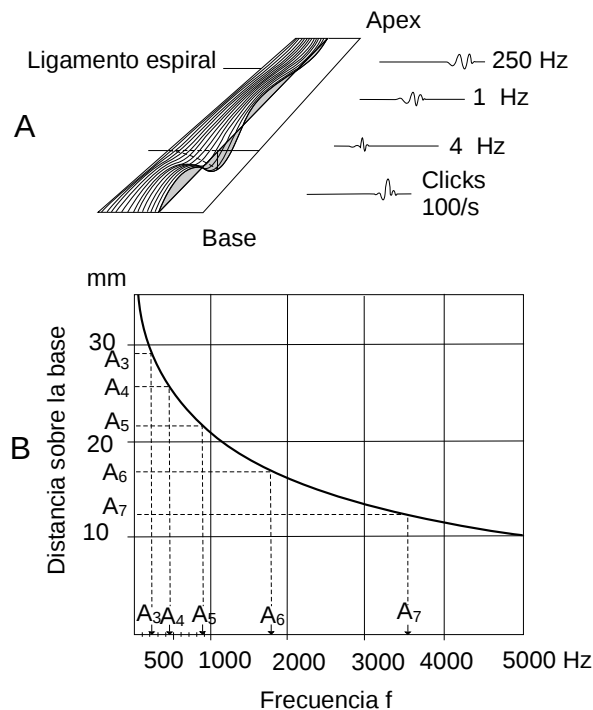


FIGURA 3. Onda viajera en la membrana basilar. En A, un esquema tridimensional muestra cómo se produce la onda viajera propagándose a lo largo de toda la cóclea. A la derecha, esquema linealizado que muestra el máximo de oscilación de la membrana basilar para diferentes tonos. En B, gráfica de la ubicación del desplazamiento máximo de la membrana basilar en función de la frecuencia del sonido. Modificado de Roederer, 1995.

decir, cuando el tono se desplaza una octava, la región de la cóclea que resuena se desplaza alrededor de 3.5 a 4 mm sin importar la altitud de los tonos. Por ejemplo, entre 220 y 440, entre 1,760 y 3,520 o entre 5,000 y 10,000, la posición de resonancia en la cóclea no se multiplica, simplemente se desplaza una cierta distancia; en otras palabras, es la razón entre las frecuencias y no sus diferencias lo que determina el desplazamiento de la región de resonancia en la cóclea; una relación de este tipo es logarítmica.

Conforme un sonido incrementa su amplitud, aumenta la amplitud de la onda viajera en la membrana basilar, incrementándose tanto el número de células ciliadas que se excitan, como la cantidad de impulsos eléctricos en las neuronas que van del oído al cerebro. Los centros cerebrales superiores categorizan los tonos con base en la región donde se originan las neuronas que se excitan, y las amplitudes según el número de neuronas activas y la intensidad con que éstas descargan.

La forma antes descrita de respuesta de la cóclea ante el sonido se conoce como teoría del análisis espectral del sonido. En su forma más general fue propuesta en el siglo XIX por el físico alemán Hermann von Helmholtz quien, inspirado en los descubrimientos anatómicos de Alfonso Corti,

estableció que en la cóclea existen una serie de resonadores capaces de descomponer sonidos complejos en sus diversas frecuencias. Aunque esta teoría de la resonancia ya no se acepta, debido principalmente a que no permite explicar las interacciones entre tonos, la idea de que los sonidos de diferentes frecuencias activan diferentes regiones de la membrana basilar es correcta.

Estudios posteriores realizados por el fisiólogo húngaro Georg von Békésy (Premio Nobel de Fisiología y Medicina en el año de 1961 por sus descubrimientos acerca de la fisiología de la audición), demostraron que, en la cóclea, los tonos se distinguen no con base en una serie de resonadores separados, sino debido a las propiedades físicas de la membrana basilar, cuya rigidez se decrementa gradualmente desde la base hasta el ápex de la cóclea, determinando que, ante los desplazamientos del estribo, se produzca una onda que recorre la cóclea y que produce un desplazamiento máximo en una región específica de la misma.

PERCEPCIÓN DE TONOS Y SONIDOS COMPLEJOS

Una aspecto importante es el referente a definir la capacidad de diferenciar tonos; ¿cuál es la diferencia mínima que puede ser apreciada? A bajas frecuencias (por ejemplo 100 Hz) se requieren cambios hasta del tres por ciento en un tono para detectar la diferencia; en cambio, para tonos de frecuencias mayores (por ejemplo 2000 Hz) variaciones de 0.5 por ciento bastan para distinguir la diferencia. Obviamente la capacidad de notar diferencias tonales depende también de la duración de los tonos, y es más o menos independiente de la amplitud del sonido.

La cóclea es un complejo instrumento mecánico con más de mil partes móviles. Uno de los problemas más interesantes de la neurofisiología de la audición lo es el estudio de los efectos de la superposición de tonos. En última instancia el análisis del escenario auditivo cotidiano difícilmente trata con tonos únicos, de frecuencia constante (quizá exclusivamente cuando se escucha la flauta, que es el único instrumento musical capaz de producir un solo tono sin armónicos). Más bien, el oído tiene que lidiar con conjuntos de tonos de diferentes frecuencias y amplitudes, con cadencias variables y superposiciones. El lenguaje hablado y, especialmente el musical, constituyen ejemplos en que el oído tiene que tratar con conjuntos superpuestos de tonos. Sin embargo, el oído interno, por sus características, no hace una simple suma de

tonos; se ha encontrado que existen importantes no linealidades en la respuesta de la cóclea a los estímulos sonoros. La no linealidad implica que la respuesta a un sonido complejo no es igual a la suma de las respuestas a cada uno de sus componentes. Por ejemplo, al adicionar un tono a otro se puede suprimir la respuesta al primero y percibir nuevos tonos que son combinaciones de las frecuencias que componen los sonidos con que se estimula. Existen dos clases de efectos de superposición de tonos: de primer orden y de segundo orden. Los efectos de primer orden se producen a nivel mecánico en la cóclea; los de segundo orden resultan del procesamiento neuronal. En el canal auditivo externo, así como en el tímpano, la superposición de tonos es lineal. En la cóclea se producen diversas combinaciones que se han denominado tonos de combinación (en el caso de estímulos en que están presentes únicamente dos tonos) o productos de distorsión (cuando hay varios tonos). Los tonos de combinación son, generalmente, combinaciones enteras de los tonos originales: f_2-f_1 , $2*f_1-f_2$, $2*f_2-f_1$... etc. (estos tonos de combinación no son importantes en los rangos normales de sonido porque sólo se producen con estímulos intensos. Probablemente sí sean muy importantes en la audición de música a alto volumen, como sucede en los conciertos de rock o al escuchar música con audífonos a volumen exagerado).

En relación con la superposición de tonos de primer orden, ocurre por ejemplo, cuando dos tonos son de la misma frecuencia, independientemente de la fase o la amplitud; en este caso percibimos un solo tono que corresponde precisamente a la frecuencia compartida, y la amplitud que se percibe está controlada por las amplitudes de los tonos superpuestos y su diferencia de fases; cuando dos tonos son de la misma amplitud pero con ligeras diferencias en su frecuencia, lo que se percibe es una frecuencia intermedia y la amplitud ligeramente modulada; lo que sucede desde el punto de vista perceptual es que si ambos tonos son suficientemente cercanos, se oye un tono único, que es intermedio entre ambos, pero cuya amplitud se modula de forma creciente y decreciente, produciéndose una sensación de batido en el sonido (véase Figura 4). La frecuencia con que se modula la amplitud está dada por el valor de la diferencia de los tonos; el tono que se percibe es la diferencia de los tonos dividida entre dos; por lo tanto, entre más cercanos los tonos la sensación de pulsar o de batido que producen es menor.⁵ Cuando, por ejemplo, tenemos un tono de frecuen-

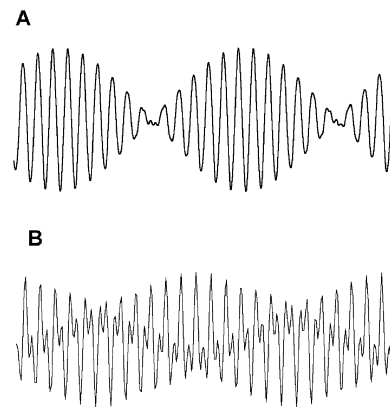


FIGURA 4. Superposiciones de tonos que producen batido de primero (A) y de segundo orden (B). En la parte superior, cuando los tonos son cercanos, producen una modulación de la amplitud sin cambio en el patrón de vibración. En B, cuando los tonos están separados cerca de una octava, además de una ligera modulación de la amplitud, se modifica significativamente el patrón de vibración.

cia constante (f_1) y un segundo tono de frecuencia variable (f_2), conforme la diferencia de los tonos crece se oye un tono único que bate, produciendo una sensación desagradable. Conforme la diferencia f_1-f_2 se acrecienta, aumenta la sensación de batido y hay un cierto momento en que la sensación de batido se hace sumamente intensa, se empieza a oír "rugoso", poco placentero y, si se aumenta aún más la diferencia entre f_1 y f_2 se oyen entonces los dos tonos con frecuencias correspondientes al tono f_1 y al tono f_2 (véase Figura 5). El límite de la discriminación de tonos y lo que se llama la banda crítica, que es cuando se oye un batido, dependen de la frecuencia media de ambos tonos $(f_1 + f_2) / 2$, es lo que se llama la frecuencia central y es relativamente independiente de la amplitud, aunque puede variar considerablemente entre individuos; por ejemplo, dos tonos en la vecindad de 2,000 Hz deben de estar separados 200 Hz para discriminarse claramente y, más de 300 Hz para sonar de forma suave y ser claramente distinguibles; es notable el hecho de que el límite de discriminación de tonos es mayor que un medio tono y más que un tono completo en ambos extremos del rango de frecuencias. Es interesante también notar que la banda crítica cae dentro del rango de las diferencias de frecuencia que corresponden a un tono completo para los tonos muy altos (disonancias), y dentro de las de un tercio menor (consonancias), esto es, alrededor de un tercio de una octava. Sin embargo, para las bajas frecuencias, la banda crítica es mayor que un tercio menor, razón por la cual, en general, en música no se usan los tercios en los registros bajos.

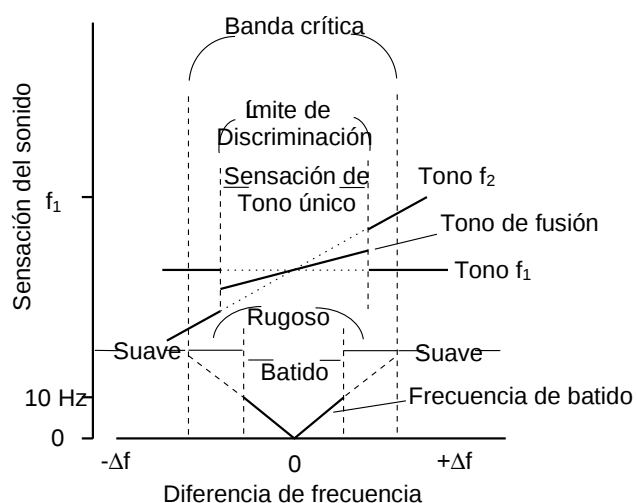


FIGURA 5. En el esquema se representan las complejas no linealidades que se producen en la percepción del sonido. Supongamos que se estimula a un individuo con un tono constante (tono f_1) y simultáneamente se produce otro tono (tono f_2) cuya frecuencia va incrementándose. Inicialmente se pueden discernir los dos tonos. Cuando el tono f_2 es cercano a f_1 , se produce un sonido desagradable que hemos descrito como "rugoso". El intervalo de frecuencias para el que se produce este fenómeno se ha denominado banda crítica. Si f_2 continúa aproximándose al valor de f_1 , se escucha un tono único (tono de fusión, cuya frecuencia es igual a la media de ambos tonos). Se percibe también un batido de menor intensidad que disminuye su amplitud conforme ambos tonos se hacen más parecidos. Si f_2 continúa aumentando su frecuencia se vuelve a oír un doble tono rugoso y, finalmente, ambos tonos se perciben de manera nítida (suave). Modificado de Roederer, 1995.

Este tipo de interacciones tienen su origen en las propiedades mecánicas de la cóclea, ya que se puede demostrar que si los tonos se presentan uno a cada oído (usando audífonos –forma de estimulación que se ha denominado dicótica), no se producen los fenómenos de superposición de tonos, y aunque los dos tonos tengan frecuencias muy cercanas no se oye batir el sonido y ambos pueden distinguirse claramente.

Las interacciones de tonos tienen un importante papel en la música, especialmente porque cuando los sonidos batan producen una sensación poco placentera y algunas veces incluso molesta. De hecho, el sonido desagradable de un instrumento mal afinado se debe a que al ser tocado en compañía de otros instrumentos produce un batir, una forma de rugosidad en el sonido, que puede ser claramente percibida.

La superposición de tonos de segundo orden, como ya anotamos, tiene su origen en la mátrix neuronal, ya que aun cuando se presenten los tonos de forma dicótica el efecto de superposición no desaparece. Un ejemplo de superposición de segundo orden se genera, por ejemplo, cuando dos tonos están separados por casi una octava $f_2 \approx 2 * f_1$, se produce entonces una sensación de batido muy diferente a la de

primer orden. En este caso el batido es mucho menos intenso y desagradable. Otras combinaciones de tonos como son $f_2 \approx 3/2 * f_1$ o $f_2 \approx 4/3 * f_1$ que corresponden a los intervalos musicales quinto y cuarto producen también una sensación de batido debida a superposiciones de segundo orden.

SEGUIMIENTO DE LA FUNDAMENTAL

Otro fenómeno que corresponde a las interacciones de segundo orden es el seguimiento de la frecuencia fundamental (válido especialmente para sonidos de baja frecuencia, $< 1,500$ Hz). En este caso lo que resulta relevante es el periodo con que se repiten los máximos de la suma de dos tonos puros. Para que se produzca el fenómeno, los tonos deben presentarse rápidamente, no de forma sostenida como hemos descrito anteriormente. Diversas combinaciones de tonos producen la sensación de la misma frecuencia fundamental. Particularmente, los armónicos superiores de una frecuencia base f_0 , al sumarse, producen la sensación de frecuencia f_0 ($2*f_0$, $3*f_0$, $4*f_0$... $n*f_0$) (véase Figura 6). De hecho, el seguimiento de la frecuencia fundamental nos permite asignar un tono único a un instrumento musical a pesar de que éste genere un conjunto de frecuencias en el que dominan los armónicos que, al superponerse, producen la sensación de una única frecuencia de sonido. Cuando los tonos no son los armónicos inmediatos de una frecuencia fundamental, se producen combinaciones más complicadas, y pueden aparecer importantes ambigüedades en la percepción del tono fundamental. Independientemente de que existen varias hipótesis para explicar el seguimiento de la frecuencia fundamental, la idea dominante es que existen patrones "estampados" en el sistema central de procesamiento, y que los sonidos complejos son comparados con estos patrones. Cuando se activa un patrón, debido a que la comparación sonido-patrón resulta favorable, se produce la sensación de reconocimiento del tono. En cierta forma esto significa que la mátrix neuronal genera una expectativa que se compara con la señal de entrada, y si la comparación es favorable se dispara una cierta sensación. La mátrix neuronal utiliza las experiencias previas para anticipar el proceso de identificación y análisis de cualquier estímulo.

CONCLUSIÓN

En esta breve revisión de los aspectos más fundamentales de la percepción auditiva, limitada exclusivamente a la fisio-

logía del oído interno y de los primeros elementos de la vía sensorial, queda claro que las propiedades del órgano sensorial, así como las de la red neuronal que conforma el sistema nervioso, participan activamente en dar forma al escenario auditivo que percibimos. Indudablemente, entre más compleja es la estructura de un estímulo sonoro, mucho más problemático será el análisis de los procesos que participan en la percepción, y más importante será el conjunto de no linealidades resultante de la operación del sistema. En este trabajo hemos analizado las etapas primarias del análisis de los objetos auditivos y musicales que ocurren en el tiempo, a diferencia de los objetos visuales que ocurren en el espacio. Luego del reconocimiento del tono, la intensidad y el timbre, el sistema auditivo, en los centros superiores de análisis, está especializado en el reconocimiento de secuencias temporales. El elemento de medida en la música es el tiempo. Así como en el sistema visual existen neuronas especializadas en el reconocimiento de ciertos patrones (bordes, bordes en movimiento, colores, etc.), en el sistema auditivo se piensa que existen también células encargadas del reconocimiento y extracción de las características de los objetos auditivos como son su duración, fuente, frecuencia, modulación, inicio y decremento, y relaciones entre uno y otro sonidos. El análisis neurofisiológico, por exacto, debe limitarse a tonos puros y combinaciones sencillas de sonidos a intensidades constantes. En la realidad tratamos con secuencias complejas de tonos variables con diferentes velocidades de ataque y combinaciones que determinan el mensaje auditivo y la percepción musical. Frecuentemente, además, los estudios neurofisiológicos deben limitarse a animales inferiores, pero de estos trabajos resulta patente que la mátrix neuronal, y frecuentemente los propios órganos de los sentidos, imponen importantes condicionantes a la percepción y, consecuentemente, a la expresión y el gusto estético. Indudablemente, la mátrix neuronal se desarrolla en interacción con su medio, y sus propiedades superiores son el resultado del aprendizaje del individuo en una cierta cultura; esto es innegable, pero también es cierto que la mátrix neuronal es un objeto y, como tal, existen leyes muy precisas que rigen su operación, imponiendo límites y propiedades específicas al pensamiento abstracto y obviamente a la percepción musical.

Una de las propiedades fundamentales de la mátrix neuronal es su alta flexibilidad y el hecho de que muy probablemente los sistemas de análisis perceptual más complejos no están



FIGURA 6. Consecuencias auditivas del seguimiento de la fundamental. En A, se muestra un conjunto de notas que al ser tocadas producen la sensación de un tono único, tal como si lo que se estuviera tocando fuera realmente la secuencia de notas ilustrada en B. Modificado de Roeder, 1995.

preestablecidos, sino que sus propiedades –su conectividad– se desarrolla a lo largo de la vida del sujeto. Por ejemplo, se ha demostrado que los directores de orquesta desarrollan mecanismos específicos de análisis de la escena musical que les permiten hacer un examen fino del conjunto de elementos que componen un sonido e identificar con precisión la fuente de cada uno de los tonos que lo componen. El hecho de que los directores de orquesta utilicen una estrategia perceptual diferente al resto de sujetos para identificar una fuente de sonido, indica hasta qué grado es maleable la mátrix neuronal y pone de relieve la importancia del entrenamiento para la ejecución de diferentes tareas, especialmente aquellas que resultan más demandantes desde el punto de vista intelectual.

N O T A S

¹ El Decibel, abreviado “db”, es una unidad de medida de la intensidad del sonido. Un db es igual a $10 \cdot \log I/I_0$ donde I es el sonido en cuestión e I_0 es un sonido de referencia cuya intensidad es de 10^{-12} W/m. Entonces, la diferencia de presión de sonido entre un 1 db y 60 db es de un millón de veces.

² He decidido denominar “mátrix neuronal” a las propiedades computacionales, de procesamiento, análisis, almacenamiento y generación de información de las redes neuronales. Este término lo he elegido con el afán de hacer énfasis en que no me estoy refiriendo a partes o estructuras del sistema nervioso o el cerebro, sino a las propiedades funcionales del conjunto.

³ Las ranas coquí, responden a un sonido caracterizado por un “co” de baja frecuencia seguido de un “quí” de alta frecuencia. El nombre les viene del croar característico; la alta intensidad del sonido que producen estos pequeños animales alcanza los 90 db.

⁴ Detección perfecta del tono quiere decir que los individuos son capaces de distinguir diferencias de tonos muy pequeñas (por ejemplo, 110 Hz de 100 Hz), muy por arriba de la media de la población. Entre los músicos es más frecuente encontrar individuos con esta capacidad.

⁵ A los interesados en escuchar estos fenómenos acústicos, así como profundizar en muchos otros asuntos relacionados con el sonido y la psicofísica de la percepción auditiva, les recomiendo un portal de internet con despliegue sonoro en <http://www.sfu.ca/sonic-studio/handbook/index.html>



SITIOS EN LA RED RELACIONADOS CON LOS TEMAS DE LA MÚSICA, LA AUDICIÓN Y LA CÓCLEA

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

Narins P., Frog communication, *ScientificAmerican*, 237 (1995) 62-67.
Roederer, J.G., *The physics and psychophysics of music*, Springer-Verlag, 1995.
Pickles J.O., *An introduction to the physiology of hearing* (2a ed.), Academic Press. London.1988.
Micheyl, C., Khalfa, S., Perrot, X. y Collet, L., Difference in cochlear efferent activity between musicians and non-musicians, *Neuroreport*. 8:1047-1050. 1997.
Rhode, W.S., Cochlear mechanics, *Annu. Rev. Physiol.* 46: 231-246. 1984.
Ulfendahl, M., Mechanical responses of the mammalian cochlea, *Prog. Neurobiol.* 53: 331-380. 1997.

- www.sfu.ca/sonic-studio/handbook/index.html
Handbook for acoustic ecology. Barry Truax, editor, Second Edition, 1999
- www.iurc.montp.inserm.fr/cric/audition
"Promenade around the cochlea", implementado por Pujol, R., Blatrix, S., Pujol, T y Bertrand, D., INSERM unit 254 Montpellier, Francia
- www.boystown.org/cel/cochmech.htm (Sitio muy interesante por el nivel con que trata el problema de la mecánica coclear.)
- www.fisio.buap.mx/online (Sitio de internet de los autores donde se presenta un trabajo completo en español sobre la fisiología de la cóclea y varios trabajos sobre la fisiología de las células ciliadas.)

Ilustraciones de Nicolás Pérez.

¿INFLUYE LA MÚSICA EN SUS COMPRAS?

Un estudio realizado en Inglaterra y publicado en la revista *Nature** demuestra que la música influye de forma significativa en la elección que se hace de algunos productos en el supermercado. En el trabajo referido, los autores estudiaron la influencia de la música en la preferencia de los consumidores por el vino alemán o francés y cómo ésta podía ser influenciada por la música. Para ello, dispusieron estantes con vinos tintos y blancos de origen alemán y francés con precios y calidades semejantes. Durante algunos días tocaron en el supermercado una música típicamente francesa de acordeón, en otras ocasiones, sonó en el supermercado una música típicamente alemana. Se encontró que los días que sonó música francesa, el 76.9 por ciento de los consumidores adquirieron vino francés y tan sólo el 23.1 por ciento eligieron vino alemán. En cambio, cuando sonó música típicamente alemana, el 73.3 por ciento de los consumidores prefirió vino alemán y tan sólo el 26.7 por ciento seleccionó un vino francés.

Estos resultados demuestran que la música puede ejercer un efecto significativo en nuestras preferencias en el supermercado y que, indudablemente, puede ser utilizada como un elemento medioambiental para inducir al sujeto a realizar ciertas conductas.

* Noth, A.C., Hargreaves, D.J. y McKendrick, J., In-store music affects product choice, *Nature* 390 (1997) 132.

