

E. Mijares Nodarse
J. A. Gaya Vázquez
G. Savío López
M. C. Pérez Abalo
E. Eimil Suárez
A. Torres Fortuny

Técnicas diagnósticas más utilizadas para la identificación temprana de las pérdidas auditivas

Departamento de Audición y Lenguaje
Centro de Neurociencias de Cuba
La Habana (Cuba)

Resumen

Las pérdidas auditivas en la infancia afectan al desarrollo emocional del lenguaje y del niño, así como su adaptación al medio social y familiar. Estos efectos adversos pueden evitarse si el diagnóstico de las pérdidas auditivas, y el inicio del tratamiento y la rehabilitación, se establecen antes de los 6 meses de edad. Para la detección temprana de las pérdidas auditivas se han empleado técnicas diversas, tanto subjetivas (basadas en respuestas conductuales a estímulos sonoros), como objetivas (que utilizan respuestas fisiológicas). Actualmente, las más efectivas y confiables son las otoemisiones acústicas y los potenciales evocados auditivos de tronco cerebral. Numerosos grupos de investigadores, en todo el mundo, trabajan arduamente en la búsqueda de una técnica diagnóstica ideal. Recientemente, algunos autores han propuesto la aplicación de la técnica de los potenciales evocados auditivos de estado estable, como una nueva alternativa diagnóstica en la detección temprana de las pérdidas auditivas, y la utilizan en el contexto de un programa de cribado auditivo. En este artículo, se revisan las principales ventajas y desventajas de cada uno de estos procedimientos, así como los principales resultados, en términos de sensibilidad y especificidad, que se han obtenido al utilizarlos en los programas de cribado auditivo.

Palabras claves: Otoemisiones acústicas, cribado, cribado auditivo, potenciales evocados auditivos, potenciales evocados auditivos de tronco cerebral, potenciales evocados auditivos de estado estable,

Diagnostics tests more used in the early detection of hearing losses

Hearing impairment in early infancy has been linked with lifelong deficits in speech and language acquisition, personal-social maladjustments, and emotional difficulties. Early identification of hearing loss and appropriate intervention within the first 6 months of life has been demonstrated to prevent many of these adverse consequences. There are several available techniques which can reliably identify hearing impairments. The most frequently used are behavioral techniques, otoacoustic emissions, click auditory brainstem response and automated auditory brainstem response. Numerous groups of investigators worldwide work arduously in the search of an ideal diagnostic test. Recently, the multiple auditory steady state responses have been proposed as a new tool in the identification of hearing losses. Also, there are some initial studies focused on developing the technique for hearing screening protocol. The main advantages and disadvantages of each one of these techniques are described. The main results of test performance in terms of sensibility and specificity in a hearing screening context are discussed.

Key words: Auditory brainstem response, auditory evoked potentials, auditory steady state response, neonatal hearing screening, otoacoustic emissions, screening

Correspondencia:
Dra. Eleina Mijares Nodarse
Departamento de Audición y Lenguaje
Centro de Neurociencias de Cuba
Avenida 25 N.º 15202 esquina 158
Cubanacán, Playa

La Habana, Cuba
CP 11600
POB 6412/6414
Correo electrónico:
eleina.mijares@cneuro.edu.cu
eleinamijares@yahoo.com

Introducción

Los trastornos auditivos constituyen un problema de salud que afecta a una proporción importante de

la población infantil. Se estima que, en la población general, entre 1 y 3 de cada 1.000 niños nacen con una pérdida profunda bilateral (Mencher, Davis, DeVoe, Beresford y Bamford, 2001). La incidencia de las pérdidas moderadas y ligeras es aun mayor (1 de cada 100 niños). A estas cifras se añaden otros niños (30 de cada 100.000) que desarrollan pérdidas auditivas significativas en los primeros 3 años de vida. Cuando se estudian poblaciones de alto riesgo la prevalencia de las pérdidas auditivas se incrementa hasta valores entre el 5 % y el 12 % (Mauk, White, Mortensen y Behrens, 1991; Prieve, Dalzell, Berg, Bradley, Caca, Campbell y cols., 2000).

Teniendo en cuenta, que la presencia de un trastorno auditivo en los primeros 3 años de vida tiene devastadoras consecuencias sobre el desarrollo del lenguaje y para la adaptación del niño al medio familiar y social, se reconoce que el diagnóstico de la hipoacusia, así como el inicio del tratamiento y la rehabilitación deben llevarse a cabo en los primeros 6 meses de edad (*Joint Committee on Infant Hearing*, 2000).

En la década de 1980, se establecen los primeros programas de cribado auditivo, los cuales se basaban, esencialmente, en el reconocimiento de recién nacidos con factores de riesgo clínico de daño auditivo (antecedentes familiares de hipoacusia, peso al nacer inferior a 1.500 g, hipoxia neonatal, hiperbilirrubinemia, administración de fármacos ototóxicos, etc.). En este tipo de programa, se utilizaba, generalmente, la técnica de potenciales evocados auditivos de tronco cerebral (PEATC) con estímulos de clic, a partir de los 3 meses de edad (Hyde, Riko y Malizia, 1990; Mason, Davis y Wood, 1998; Mencher y cols., 2001; Pérez-Abalo, Gaya, Savío, Ponce, Perera y Reigosa, 2005). Sin embargo, sólo el 50 %-60 % de los niños con pérdidas congénitas presentan factores de riesgo, y por tanto, existe una proporción importante de casos que no son detectados con este tipo de programa (Mauk y cols., 1991; Mason y cols., 1998; Watkin, 1999).

Actualmente, se prefieren los programas de cribado universal. El procedimiento más utilizado consiste en la realización de otoemisiones acústicas (OEA) a todos los recién nacidos (Stevens, Webb, Hutchinson, Connell, Smith y Buffin, 1990; Vohr, Carty, Moore y Letorneau, 1998; Watkin, 1999; Martínez, Beneito, Condado, Morais y Fernández Calvo, 2003). Aquellos casos en los que no se detecta respuesta con las OEA, son evaluados, posteriormente, con PEATC con estímulos de clic. Otros autores, han reportado numerosas ventajas al emplear los PEATC automatizados en protocolos de cribado universal (Herrman, Thornton y Joseph, 1995; Clements y Davis, 2001). Aquellos niños que fallan en la prueba de cribado con los PEATC

automatizados suelen ser reevaluados con PEATC con estímulos de clic.

Sin embargo, a pesar de que la eficiencia de todas estas técnicas para el cribado auditivo ha sido probada (Jacobson, Jacobson y Spahr, 1990; Herrman y cols., 1995; Norton, Gorga, Widen, Folsom, Sininger, Cone-Wesson y cols., 2000; Clements y Davis, 2001; Perez-Abalo y cols., 2005), existen aún limitaciones que de resolverse pudieran contribuir a la identificación de un mayor número de casos afectados. De manera que todavía continúa la búsqueda de una técnica confiable, objetiva, eficiente y con una buena relación coste-beneficio, que permita la identificación temprana de las pérdidas auditivas (Norton y cols., 2000; Mencher y cols., 2001; Dort, Tobolski y Brown, 2000; Hayes, 2003)

En los últimos años, los potenciales evocados auditivos de estado estable (PEAee) a múltiples frecuencias han demostrado ser una técnica eficiente para la realización de una audiometría objetiva detallada por frecuencias, permitiendo obtener una estimación confiable del umbral audiométrico en personas sanas y en niños con pérdidas auditivas (Lins, Picton, Boucher, Durieux-Smith, Champagne, Moran y cols., 1996; Perez-Abalo, Savio, Torres, Martin, Rodriguez y Galan, 2001; Cone-Wesson, Rickards, Poulis, Parker, Tan y Pollard, 2002b; Rance y Rickards, 2002; Savio, Perez-Abalo, Gaya, Hernandez y Mijares, 2006). Existen además, algunos estudios que demuestran la utilidad de esta técnica en recién nacidos sanos y en neonatos prematuros (Rickards, Tan, Cohen, Wilson y Drew, 1994; Cone-Wesson, Parker, Swiderski y Rickards, 2002a), y caracterizan los cambios que ocurren con la maduración (Savio, Cardenas, Perez-Abalo, Gonzalez y Valdes, 2001). Por otra parte, algunos autores han demostrado la efectividad de esta técnica en el contexto de un programa de cribado auditivo (Cone-Wesson y cols., 2002b; Savio y cols., 2006).

Con este trabajo, se pretende revisar las principales técnicas diagnósticas que se emplean actualmente para la detección temprana de las pérdidas auditivas, así como las ventajas y desventajas de cada una de ellas. Se analizan, además, nuevas metodologías de cribado, como son los PEAee a múltiples frecuencias.

Desarrollo

Para el desarrollo de un programa de cribado auditivo en la población infantil se han empleado diversas técnicas diagnósticas, entre las que se reconocen tradicionalmente, los métodos conductuales

(subjetivos y objetivos), las OEA y los potenciales evocados auditivos.

Técnicas Conductuales

Subjetivas

La forma más sencilla de cribado auditivo, se basa en la observación de la conducta auditiva del niño, por parte de sus padres. Los primeros en investigar, sistemáticamente, la respuesta de los niños a estímulos auditivos fueron los esposos Ewing (Ewing y Ewing, 1944), en Gran Bretaña. Fueron ellos quienes introdujeron la audiometría refleja al estudiar el reflejo de orientación al sonido ante estímulos comunes producidos por juguetes y voces humanas.

Sin embargo, no fue hasta finales de la década de 1960, que Downs y Hemenway (1969) utilizan la audiometría refleja para evaluar la audición a 17.000 recién nacidos. Estos autores demostraron que esta técnica permite la identificación de niños con pérdidas auditivas severas y profundas, pero falla en la detección de las pérdidas ligeras y moderadas. Refirieron también que, aproximadamente, 1 de cada 1.000 niños nace con una pérdida profunda bilateral, y describen que sólo la mitad de los niños con factores de riesgo tienen algún tipo de pérdida auditiva. En este trabajo, se describe una cifra de falsos positivos del 25 %. Otros estudios de este tipo, señalan poco menos del 50 % de falsos positivos con la audiometría refleja (Feinmesser y Tell, 1976). Actualmente, el método de Ewing no se recomienda como instrumento de cribado auditivo teniendo en cuenta la elevada cifra de falsos positivos que se ha obtenido.

Recientes modificaciones de esta técnica (BOEL-test: *Blicken Orienter Efter Ljud*, CAPAS: *Compact Amsterdam Pediatric Audiometric Screener*) constituyen las formas conductuales subjetivas más usadas de cribado auditivo. Éstas tienen la ventaja de permitir una exploración rápida (la prueba dura aproximadamente 5 minutos, aunque en algunos casos puede llegar a 20 minutos) de toda la vía auditiva. Sin embargo, resultan impracticables en niños con discapacidades físicas o mentales, requiriéndose al menos dos personas bien entrenadas para realizar la prueba, y una habitación con niveles muy bajos de ruido ambiental, menores de 30 dB SPL (Hirasing, van Dijk, Wagenaar-Fisher, van Verveen-Keuning y Kiers, 1991). Por otra parte, sólo es posible realizar la prueba a partir de los 9 meses de edad, por lo que el diagnóstico de la pérdida auditiva se realiza, aproximadamente, al año de edad, teniendo en cuenta que hay que esperar

entre 3-4 meses después de la primera prueba para la confirmación del diagnóstico. Con esta técnica se consigue una sensibilidad del 79 % y una especificidad del 97 % (Hirasing y cols., 1991).

Objetivas (automatizadas)

Simmons y Russ (Simmons y Russ, 1974) describieron un nuevo equipo para la detección automática de la respuesta del niño al sonido. Con el *crib-o-gram*, se obtiene una sensibilidad del 75 % y una especificidad del 71 % (Prager, Stone y Rose, 1987), los cuales resultan muy bajos si se comparan con otras técnicas objetivas.

Posteriormente, dos investigadores ingleses (Benet y Lawrence, 1980), desarrollaron una sofisticada técnica que permite la detección de la respuesta motora y fisiológica (cambios en la frecuencia respiratoria) al sonido. Esta técnica se conoce como ARC (*Auditory Response Cradle*).

Empleando el ARC en un proyecto de cribado universal, varios autores obtienen sensibilidades mayores del 90 % para las pérdidas auditivas severas y profundas, y una alta especificidad en recién nacidos sanos y nacidos a término, con menos del 2 % de falsos positivos (Davis, Wharrad, Sancho y Marshall, 1991; Davis, Bamford y Stevens, 2001).

Las técnicas conductuales automatizadas tienen la ventaja que permiten explorar toda la vía auditiva, no son invasivas, y resultan relativamente rápidas (duran menos de 30 min, si se tiene en cuenta la preparación del niño en la cuna), pudiendo ser realizadas fácilmente por personal no cualificado. Sin embargo, estas técnicas tienen la desventaja de que utilizan estímulos de elevada intensidad (85 dB SPL) y, por tanto, no permiten detectar pérdidas auditivas ligeras y moderadas. Además, no es posible realizarlas en recién nacidos enfermos. Cuando se estudian poblaciones de alto riesgo de déficit auditivo (niños que han salido de la Unidad de Cuidados Intensivos) la sensibilidad del ARC es del 50 % para las pérdidas auditivas permanentes severas y profundas, y del 20 % para las pérdidas permanentes moderadas, con una especificidad del 80 % (Davis y cols., 1991), lo cual representa una gran limitación.

Otoemisiones acústicas

La presencia de procesos activos que ocurren en la cóclea y que son capaces de generar energía detectable fue demostrada por primera vez por Kemp en el año 1978.

Las OEA representan la energía acústica generada en las células ciliadas externas de la cóclea, que viaja a través de las estructuras del oído medio recorriendo el camino inverso a la conducción del sonido normal, haciendo vibrar la membrana timpánica y pudiendo registrarse con un micrófono en el oído externo.

Teniendo en cuenta, si es necesaria o no, la aplicación de un estímulo para obtenerlas, las OEA se pueden clasificar en espontáneas y provocadas. Las OEA espontáneas se generan producto de los mecanismos normales de la cóclea, pudiendo ser la expresión subclínica de trastornos neurosensoriales, neuromecánicos o bioquímicos. Las OEA espontáneas pueden estar ausentes en el 50 % de los sujetos normales, por lo que no se recomienda su uso como técnica de cribado auditivo (Norton y cols., 2000).

Las OEA provocadas pueden ser detectadas en el 98 % de los oídos normales tras la aplicación de un estímulo, y están ausentes cuando la pérdida supera los 20-40 dB por encima del umbral de audibilidad normal (Kennedy, Kimm, Caferelli, Dees, Evans, Hunter, Lenton y cols., 1991).

Las OEA provocadas pueden clasificarse en:

- OEA transitorias: se generan por estímulos de corta duración, como el clic o los tonos breves. Son las más utilizadas en la práctica clínica (fig. 1).
- OEA por productos de distorsión: son respuestas tonales a dos tonos puros presentados simultáneamente con frecuencias diferentes (f_1 y f_2). Al ser provocadas por estímulos específicos en frecuencia, existe la tendencia a usarlos para predecir la sensibilidad auditiva a diferentes frecuencias. Aunque esto no es perfecto, existe una buena correspondencia entre el audiograma a tonos puros y la amplitud de las OEA por productos de distorsión, al menos para las altas frecuencias (Norton y cols., 2000).
- OEA por estímulos específicos en frecuencia: cuando se usa un sólo tono de estimulación.

El empleo de las OEA provocadas como técnica de cribado auditivo aporta numerosas ventajas:

- Las OEA están presentes en recién nacidos prematuros y nacidos a término (sin patologías de oído medio).
- En recién nacidos y niños, la amplitud de las OEA es mayor que en los adultos.
- Las OEA se obtienen fácilmente a partir de las 48 horas de vida.
- Son bien conocidos los efectos que sobre la respuesta tienen factores como maduración, trastornos auditivos y estado de vigilia del sujeto.

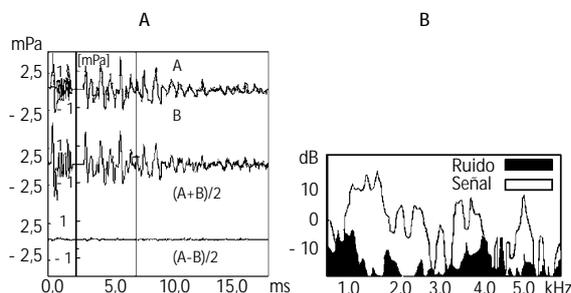


Figura 1

Registro de OEA transitorias normales. Dos medidas independientes (A y B) se superponen para confirmar la replicabilidad (A). El análisis espectral de la respuesta (B) muestra la energía de las dos respuestas independientes A y B (blanco) y el espectro del ruido (negro) obtenido por sustracción de las dos respuestas independientes A y B. Nótese que la respuesta (región blanca del espectro) está claramente por encima del ruido (parte negra del espectro). En la práctica se acepta como presencia de OEA, una respuesta de 3-6 dB por encima del ruido de fondo, con índice de correlación por encima del 50 %-60 %.

- La detección de las OEA es automática, lo cual elimina el sesgo del observador, pudiéndose realizar la prueba por personal no cualificado.
- La prueba no es invasiva, ni requiere preparación especial ni colocación de electrodos.
- La prueba completa tiene una duración media de unos 8 min, en ambientes con ruido controlado, y de unos 17 min, en condiciones de ruido hospitalario (Kennedy y cols., 1991).
- Aportan información acerca de un amplio espectro de frecuencias.

A pesar de todas estas ventajas, también se señalan algunas limitaciones de esta técnica cuando se emplea en el contexto de un programa de cribado:

- Para su obtención se requieren bajos niveles de ruido ambiental.
- En recién nacidos con hipoxia o infección, puede observarse una disminución de la amplitud de las OEA.
- Las OEA son muy sensibles a la obstrucción del conducto auditivo externo o a la presencia de lí-

quido en el oído medio, por lo que trastornos conductivos temporales pueden hacerlas fallar, a pesar de existir una audición normal.

- No pueden utilizarse para determinar el grado ni la naturaleza de la pérdida auditiva, ya que las OEA están anuladas siempre que la pérdida supera los 50 dB por encima del umbral de audibilidad normal.
- Las OEA son normales en niños con pérdidas auditivas retrococleares, y en niños con trastornos funcionales de la vía auditiva, reportándose falsos negativos en la neuropatía auditiva (Norton y cols., 2000).
- La cifra de falsos positivos se incrementa cuando la prueba se hace en las primeras 24 horas de la vida, lo cual conlleva a la necesidad de practicar un segundo examen a un gran número de niños, lo que eleva el coste del cribado y produce gran ansiedad en los padres.

En programas de cribado auditivo con OEA transitorias señalan valores de sensibilidad entre 75 % y 95 %, con una especificidad siempre superior al 85 % (Stevens y cols., 1990; Vohr y cols., 1998; Martínez y cols., 2003). Estos valores se incrementan a casi el 100 %, si la evaluación con OEA se realiza dos veces (Watkin, 1999).

Por todo lo anterior, se considera un error decirle a un padre que su hijo tiene una pérdida auditiva sólo porque haya fallado las OEA. Parece más apropiado reconocer que la ausencia de OEA constituye un factor de riesgo adicional para la presencia de una pérdida auditiva, y no se recomienda utilizarlas como prueba definitiva de cribado (Norton y cols., 2000; Hayes, 2003).

Potenciales evocados auditivos

Los potenciales evocados auditivos son fluctuaciones del voltaje en el tiempo que ocurren como respuesta a estímulos sonoros de determinadas características, y que representan, la activación de diferentes subpoblaciones neurales a diferentes niveles de la vía auditiva, desde la cóclea hasta la corteza.

Los potenciales evocados que tienen lugar en la vía auditiva durante los primeros 10 milisegundos tras la presentación de un estímulo fueron observados inicialmente en 1967 por dos investigadores israelíes (Sohmer y Feinmesser, 1967). Sin embargo, no fue hasta 1970, que dos científicos estadounidenses describen, por primera vez, estas respuestas como resultado de la activación de núcleos auditivos en el

tronco cerebral, denominándolos PEATC (Jewett y Willinston, 1971).

Estos potenciales bioeléctricos se transmiten por volumen conductor a electrodos colocados en la superficie del cuero cabelludo, donde se registran en forma de una secuencia de ondas identificadas con números romanos del I al VII (fig. 2). La onda I se genera a nivel del nervio auditivo, la onda II, en los núcleos cocleares (unión bulbo-protuberancial), la onda III, en los núcleos auditivos del complejo olivar superior (protuberancia), la IV, en el núcleo ventral del lemnisco lateral y la onda V, en los colículos inferiores (lámina cuadrigémina, mesencéfalo). Las ondas VI y VII proceden de la actividad del cuerpo geniculado medial (tálamo) y de las radiaciones acústicas (tálamo-corticales), respectivamente.

En 1979, Galambos y Shulman-Galambos comienzan a usar los PEATC con estímulos de clic en un programa de cribado auditivo para niños con factores de riesgo. Desde entonces, numerosos trabajos han demostrado que el PEATC con estímulos de clic constituye una técnica muy útil con estos propósitos (Hyde y cols., 1990; Mason y cols., 1998; Norton y cols., 2000; Perez-Abalo y cols., 2005).

El estímulo acústico empleado con más frecuencia para la obtención del PEATC es un clic o chasquido que se produce al aplicar a un audífono un pulso de voltaje de muy breve duración (menos de 200 milisegundos), que tiene la forma de un pulso rectangular. La energía acústica espectral de este tipo de estímulo se distribuye de forma aproximadamente plana, con un límite superior de frecuencia que se corresponde con el recíproco de la duración del pulso cuadrado

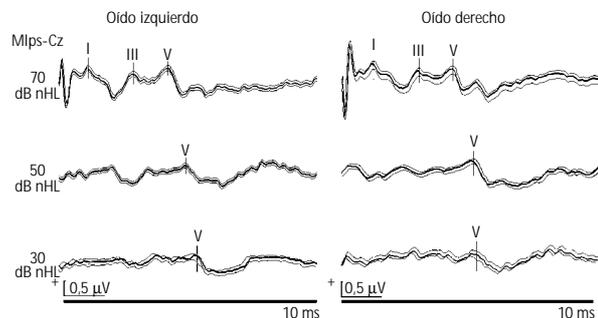


Figura 2

Registro de un PEATC con estímulos de clic normales. La figura muestra el registro de esta respuesta evocada a 70 dB nHL, 50 dB nHL y 30 dB nHL, en ambos oídos, de un sujeto normooyente. Umbral electrofisiológico en 30 dB nHL, en ambos oídos.

que lo produjo. Sin embargo, el clic no resulta un estímulo específico en frecuencia, conteniendo un amplio espectro de energía. Esto ocasiona que la respuesta cerebral provocada por un clic, si bien corresponde con una amplia activación de toda la membrana basilar, se deriva fundamentalmente de la región basal de la cóclea, donde se codifican las altas frecuencias. De esta manera, la estimación de audición de un sujeto queda limitada fundamentalmente a una región reducida del audiograma, y no permite una exploración detallada por frecuencias. Se ha demostrado, que el umbral electrofisiológico (UE) con los PEATC con estímulos de clic predice el umbral conductual (UC) con una diferencia de 10-15 dB, para la región de frecuencias entre 1 kHz y 4 kHz (Hyde y cols., 1990; Picton, Durieux-Smith y Moran, 1994; Gaya, Savío, Hernández, Pérez-Abalo, Torres y Cabrera, 2004).

Las ventajas de este tipo de registro derivan de su alta replicabilidad intraindividual e interindividual, la relativa facilidad con que se obtiene y la elevada estabilidad de la respuesta durante el sueño, la sedación y la anestesia. Así mismo, factores dependientes de la atención y del estado psicológico del sujeto no parecen afectar a los parámetros de los PEATC con estímulos de clic. Además, la respuesta es identificable desde el nacimiento y es posible caracterizar de forma precisa las variaciones que ocurren con la maduración (Picton, Hillyard, Kausz y Galambos, 1974).

En el uso de los PEATC con estímulos de clic como prueba de cribado se consiguen valores de sensibilidad y especificidad que varían desde un 80 %-100 % hasta un 88 %-98 %, respectivamente (Hyde y cols., 1990; Mason y cols., 1998; Norton y cols., 2000; Perez-Abalo y cols., 2005).

A pesar de todas estas ventajas, existen algunas limitaciones en su empleo, pues para la colocación de los electrodos, la realización de la prueba y su posterior interpretación se requiere personal entrenado, lo cual eleva considerablemente el coste del cribado y prolonga, a veces, hasta 1 hora, el tiempo que puede demorar toda la prueba. Además, los resultados en la estimación de la audición se analizan por inspección visual del registro, lo cual conduce a errores del observador.

Con el objetivo de solucionar algunas de las limitaciones de los PEATC con estímulos de clic, se desarrollaron variantes automatizadas de esta técnica. La técnica del PEATC automatizado permite la detección automática de la señal, no siendo necesaria su evaluación e interpretación por profesionales expertos, evitando así el sesgo del observador y reduciendo su

coste. Además, es posible obtener este tipo de respuesta en ambientes ruidosos. Estudios que comparan el PEATC con estímulos de clic automatizados con los no automatizados demuestran que ambos son eficientes para el diagnóstico de las pérdidas auditivas (Jacobson y cols., 1990).

Varios autores han utilizado los PEATC automatizados en programas de cribado auditivo, consiguiendo una sensibilidad del 100 % y una especificidad entre el 96 %-98 % (Herrman y cols., 1995; Jacobson y cols., 1990; Dort y cols., 2000). La duración promedio de la colocación de los electrodos es de 12 min, mientras que la duración media de la prueba es inferior a 3 min (Kennedy y cols., 1991), por tanto, la obtención de los PEATC automatizados demora menos tiempo que la obtención de los PEATC no automatizados, pero se demora más tiempo que el registro de las OEA. Una desventaja de los PEATC automatizados radica en el elevado coste de los equipos que se utilizan para realizarlos, lo cual encarece considerablemente el coste del cribado.

Sin embargo, a pesar de que la eficiencia de los PEATC (automatizados o no) ha sido demostrada, ambas técnicas tienen importantes desventajas que limitan su uso. Los PEATC resultan poco útiles para diferenciar entre pérdidas auditivas severas y profundas, lo cual está determinado fundamentalmente por el máximo de intensidad sonora permisible con esta técnica, generalmente alrededor de los 90 dB nHL (por encima del umbral de audibilidad normal) (Rance, Dowell, Rickards, Beer y Clark, 1998). Los PEATC no permiten explorar la audición en toda la gama de frecuencias audibles, por las limitaciones espectrales que presenta el tipo de estímulo acústico que se utiliza, generalmente, para generarlos. De esta manera, resulta imposible realizar una caracterización precisa de la audición residual en niños sordos o hipacúsicos con pérdidas auditivas a predominio de las frecuencias graves (Rance y cols., 1998; Gaya y cols., 2004).

Teniendo en cuenta las limitaciones que tiene la técnica de los PEATC con estímulos de clic en la evaluación de la audición, se han propuesto nuevas modalidades de estímulo que permiten mejorar la determinación del umbral auditivo en las distintas frecuencias. En este sentido, se ha desarrollado la técnica de potenciales evocados auditivos transitorios, usando estímulos tonales breves, la cual permite una estimación del audiograma con bastante exactitud (Stapells, 2000). Se han usado, además, los estímulos tonales breves con ruido que enmascara, y la técnica de respuestas derivadas. Sin embargo, desafortunadamente, su introducción en la práctica clínica ha sido

muy limitada, debido a la complejidad metodológica que implica el uso de estas técnicas, y la necesidad de evaluar e interpretar un número considerable de registros electrofisiológicos para la estimación del umbral auditivo, en cada oído y para cada una de las frecuencias exploradas, con el consabido tiempo que se precisa para realizarlo.

En los últimos años, se han descrito los PEAA, para frecuencias de modulación entre 70 Hz y 110 Hz, como una nueva técnica para la evaluación objetiva de la audición en toda la gama de frecuencias audibles. Las respuestas de estado estable se obtienen por estímulos que ocurren con una frecuencia lo suficientemente rápida, de manera que la respuesta evocada transitoria provocada por un estímulo, se superpone a la del estímulo siguiente. Esta superposición causa una respuesta periódica que se alcanza a una determinada frecuencia de estimulación, lo cual facilita su análisis en el dominio de la frecuencia utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT) y es susceptible de ser detectada cuantitativamente mediante el empleo de diferentes indicadores estadísticos (Aoyagi, Kiren, Furuse, Fuse, Suzuki, Yolota y cols., 1994; Lins y Picton, 1995; Lins y cols., 1996).

Con fines audiométricos, las técnicas de estado estable tienen algunas ventajas interesantes:

- Las respuestas de estado estable permiten el uso de estímulos acústicos de larga duración, como tonos continuos con determinada modulación en amplitud y/o frecuencia, similares a los que se emplean en una audiometría convencional.
- Las mediciones de las respuestas de estado estable son relativamente simples (la amplitud y la fase de respuesta a una determinada frecuencia de estimulación).
- Debido a sus propiedades periódicas, las respuestas de estado estable se pueden describir de forma sencilla en el dominio de la frecuencia, quedando representadas como un componente espectral circunscrito a la frecuencia de modulación, lo cual favorece su interpretación.
- Existen procedimientos estadísticos precisos para determinar la presencia de respuesta. Lo cual hace que la técnica sea doblemente objetiva y fácilmente automatizable.

Los PEAA que se obtienen con frecuencias rápidas de estimulación, entre 70 Hz y 110 Hz, parecen originarse por superposición de potenciales auditivos de corta latencia, y por tanto, mantienen sus principales beneficios en cuanto a su resistencia al sueño, la

sedación y la anestesia (Picton, John, Dimitrijevic y Purcell, 2003).

Para la obtención de los PEAA se pueden utilizar estímulos acústicos complejos compuestos por una mezcla de varios tonos modulados, los cuales se pueden presentar de forma simultánea por uno o ambos oídos. Esta variante conocida como PEAA a múltiples frecuencias permite reducir considerablemente el tiempo de evaluación audiométrica sin una pérdida apreciable de la exactitud en su estimación diagnóstica (Lins y Picton, 1995; Perez-Abalo y cols., 2001; Picton y cols., 2003;).

La técnica de PEAA a múltiples frecuencias se basa en las propiedades de rectificación del oído interno, de manera que la respuesta generada por un tono continuo (modulado) puede detectarse como un pico espectral a la frecuencia de modulación utilizada para generarlo (fig. 3).

Si en lugar de utilizar un sólo tono modulado, se estimula con una señal acústica más compleja, formada por varios tonos modulados (en amplitud), cada frecuencia portadora estimulará una región diferente de la membrana basilar, activando así a diferentes grupos de células ciliadas (fig. 4). De esta forma, los tonos modulados son rectificados en el oído interno de manera independiente y la respuesta generada quedaría representada como una serie de picos en el espectro («uno», para cada una de las frecuencias de modulación utilizadas) (Lins y cols., 1996; Perez-Abalo y cols., 2001; Picton y cols., 2003).

Existen numerosos estudios que demuestran la utilidad de esta técnica en la reconstrucción de la configuración audiométrica, tanto en sujetos con audición normal como en hipoacúsicos (Rickards y

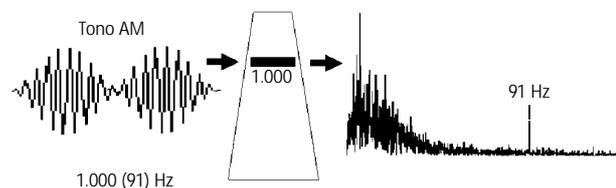


Figura 3

Se muestra un tono continuo (de 1.000 Hz) modulado en amplitud (a una frecuencia de 91 Hz) el cual hace vibrar una región específica de la membrana basilar, activando a una determinada población de células ciliadas de la cóclea. La respuesta generada de esta manera puede detectarse como un pico espectral a la frecuencia de modulación.

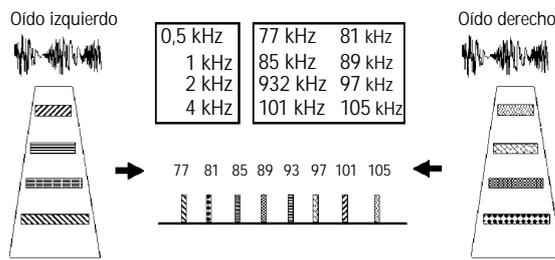


Figura 4

Se esquematiza el procedimiento para obtener un PEAA a múltiples frecuencias. El estímulo acústico se genera al mezclar cuatro tonos continuos de 0,5 kHz, 1 kHz, 2 kHz, y 4 kHz modulados en amplitud a diferentes frecuencias (entre 70-110 Hz) y mezclados como un estímulo simple por cada oído. En el PEAA provocado por este tipo de estímulo (una vez transformado mediante la FFT) aparecen ocho componentes espectrales (uno para cada una de las frecuencias de modulación utilizadas). Cada pico señala la respuesta espectral correspondiente al tono portador modulado a dicha frecuencia.

cuando se utilizan los PEATC con estímulos de clic y las OEA. Algunos estudios señalan una duración promedio, de toda la prueba, de 43 min, con registro monoaural y explorando cuatro frecuencias portadoras (500 Hz, 1.000 Hz, 2.000 Hz y 4.000 Hz) (Martínez, Beneito, Morant, Pitchard, García y Marco, 2002). Otros autores, que emplean estimulación binaural para obtener una configuración audiométrica similar, reportan una duración media de 20-22 min (Pérez-Abalo y cols., 2001). Sin embargo, en este trabajo no se tiene en cuenta el tiempo que demora la colocación de los electrodos. Cone-Wesson y cols. (Cone-Wesson y cols., 2002b) consiguen un tiempo de 3 min para la exploración de cada frecuencia monoaural, lo que representaría una duración total de 24 min.

Varios autores han propuesto mejorar el tiempo de estimación de los PEAA a múltiples frecuencias, perfeccionando la relación señal-ruido de este tipo de potencial bioeléctrico. Se puede lograr incrementar la amplitud de la respuesta (sin modificar la especificidad en el análisis de frecuencias) cuando se aplica un estímulo acústico más eficiente, que utilice una envolvente exponencial (John, Dimitrijevic y Picton, 2002). Se puede mejorar la relación señal-ruido utilizando métodos más eficientes de rechazo de artefacto y de promediación, que permitan minimizar la influencia del ruido en el registro fisiológico (John, Dimitrijevic y Picton, 2001). Actualmente, varios grupos de investigadores, trabajan en el perfeccionamiento de los métodos de estimación de la respuesta, lo cual permitirá mejorar sustancialmente el tiempo de duración total de la prueba (Picton y cols., 2003).

Un estudio reciente logró el 100 % de sensibilidad y el 92 % de especificidad, cuando se emplea esta técnica en un programa de cribado auditivo en niños con factores de riesgo (Savio y cols., 2006). El hecho de que los PEAA a múltiples frecuencias muestren una efectividad diagnóstica, comparable con la reportada para los PEATC con estímulos de clic, que constituyen una técnica ampliamente utilizada y establecida en la identificación temprana de las pérdidas auditivas, sustenta su posible valor como técnica aplicable en un programa de cribado auditivo.

Conclusiones

En la actualidad, se utilizan diversos protocolos para la detección temprana de las pérdidas auditivas, que se basan en la aplicación de técnicas diagnósticas altamente confiables, como son las OEA y los potenciales evocados auditivos.

cols., 1994; Lins y cols., 1996; Pérez Abalo y cols., 2001; Rance y Rickards, 2002; Cone-Wesson y cols., 2002a, b; Savio y cols., 2006), lo cual constituye una importante ventaja sobre los PEATC con estímulos de clic.

La utilización de los PEAA a múltiples frecuencias en sujetos con pérdidas auditivas severas y profundas que no presentaban respuestas evocadas con los PEATC con estímulos de clic, ha permitido revelar la presencia de restos auditivos adicionales (Rance y cols., 1998; Rance y Rickards, 2002; Gaya y cols., 2004).

Por otra parte, los PEAA a múltiples frecuencias permiten identificar aquellas pérdidas auditivas que se instauran en predominio de las frecuencias graves y medias, a diferencia de todos los métodos electrofisiológicos anteriormente expuestos.

A pesar de las ventajas anteriormente descritas, el tiempo que demora la realización del examen auditivo con la técnica de PEAA a múltiples frecuencias, es un aspecto fundamental a tener en cuenta, cuando se quiere utilizar en un programa de cribado auditivo. De manera general, el registro de los PEAA a múltiples frecuencias consume más tiempo que el reportado

Todas las variantes técnicas, hasta ahora descritas, presentan diferentes tipos de limitaciones prácticas, que de resolverse, podrían ayudar a mejorar la identificación de las pérdidas auditivas en recién nacidos y niños muy pequeños.

Numerosos grupos de investigadores, en todo el mundo, trabajan arduamente en la búsqueda de una técnica diagnóstica ideal. Recientemente, algunos autores han demostrado que los PEAAe (a frecuencias de modulación superiores a 70 Hz), pueden alcanzar una eficiencia diagnóstica equivalente a procedimientos tradicionales, con ventajas adicionales en la caracterización espectral de la audición. Esta novedosa técnica objetiva, una vez perfeccionada, podría convertirse en una alternativa válida para utilizar en el contexto de un programa de cribado auditivo.

Bibliografía

- Aoyagi, M., Kiren, T., Furuse, H., Fuse, T., Suzuki, Y., Yolota, S. y cols. (1994). Pure-tone threshold prediction by 80 Hz amplitude modulation following response. *Acta Otolaryngol Suppl*, 511, 7-14.
- Bennett, M. J. y Lawrence, R. J. (1980). Trials with the Auditory Response Cradle. II- The neonatal respiratory response to an auditory stimulus. *BJ Audiol*, 14, 1-6.
- Clements, J. C. y Davis, S. A. (2001). Minimizing false-positive in universal newborn hearing screening: a simple solution. *Pediatrics*, 107, 1-3.
- Cone-Wesson, B., Parker, J., Swiderski, N. y Rickards, F. (2002a). The auditory steady-state response: full-term and premature neonates. *J Am Acad Audiol*, 13, 260-269.
- Cone-Wesson, B., Rickards, F., Poulis, C., Parker, J., Tan, L. y Pollard, J. (2002b). The auditory steady-state response: Clinical observations and applications in infants and children. *J Am Acad Audiol*, 13, 270-282.
- Davis, A., Wharrad, H. J., Sancho, J. y Marshall, D. (1991). Early detection of hearing impairment: what role is there for behavioural methods in the neonatal period? *Acta Otolaryngol Suppl*, 482, 1003-1009.
- Davis, A., Bamford, J. y Stevens, J. (2001). Performance of neonatal and hearing screens, sensitivity and specificity. *Br J Audiol*, 35(1), 3-17.
- Dort, J. C., Tobolski, C. y Brown, D. (2000). Screening strategies for neonatal hearing loss: Which test is best? *J Otolaryngol*, 29, 206-210.
- Downs, M. P. y Hemenway, W. G. (1969). Report on the hearing screening of 17, 000 neonates. *Int J Audiol*, 8, 72-76.
- Ewing, I. R. y Ewing, A. W. G. (1944). The ascertainment of deafness in infancy and early childhood. *J Laryngol Otol*, 59, 309-338.
- Feinmesser, M. y Tell, L. (1976). Neonatal screening for detecting deafness. *Arch Otolaryngol*, 102, 297-299.
- Gaya, J. A., Savio, G., Hernandez, M., Perez-Abalo M. C., Torres, A. y Cabrera, L. (2004). Auditory evoked potentials electroaudiometry in deafblind patients. *Rev Logop Fon y Audiol*, 24, 16-26.
- Galambos, R. y Shulman-Galambos C. (1979). Brain stem evoked responses audiometry in newborn hearing screening. *Arch Otolaryngol*, 105, 86-90.
- Hayes, D. (2003). Screening methods: Current status. *Ment Retard Dev Disabil Res Rev*, 9, 65-72.
- Herrman, B. S., Thornton, A. R. y Joseph, J. M. (1995). Automated infants hearing screening using the ABR: development and validation. *Am J Audiol*, 4, 6-14.
- Hirasing, R. A., van Dijk, C., Wagenaar-Fisher, M., van Verveen-Keuning, I y Kiers, J. (1991). Hearing screening in Well Baby Clinics in the Netherlands. *Nederlandse vereniging voor Jeugdgezondheidszorg*, NVJG, Utrecht.
- Hyde, M. L., Riko, K. y Malizia, K. (1990). Audiometric accuracy of the click ABR in infants at risk for hearing loss. *J Am Acad Audiol*, 1, 59-66.
- Jacobson, J. T., Jacobson, C. A. y Spahr, R. C. (1990). Automated and conventional ABR screening techniques in high-risk infants. *J Am Acad Audiol*, 1, 187-195.
- Jewett, D. I. y Willinston, J. S. (1971). Auditory-evoked far fields averaged from the scalp of humans. *Brain*, 94, 681-696.
- John, M. S., Dimitrijevic, A. y Picton, T. W. (2001). Weighted averaging of steady state responses. *Clin Neurophysiol*, 112, 555-562.
- John, M. S., Dimitrijevic, A. y Picton, T. W. (2002). Auditory steady state responses to exponential modulation envelopes. *Ear Hear*, 23, 106-117.
- Joint Committee on Infant Hearing. Year 2000. (2000). Position Statement: Principles and Guidelines for early hearing detection and intervention programs. *Pediatrics*, 106, 798-817.
- Kemp, D. T. (1978). Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system. *J Acoust Soc Am*, 64, 1386-1391.
- Kennedy, C. R., Kimm, L., Dees, D. C., Evans, P. I. P., Hunter, M., Lenton, S. y cols. (1991). Otoacoustic emissions and auditory brainstem responses in the newborn. *Arch Dis Child*, 66, 1124-1129.
- Lins, O. G. y Picton, T. W. (1995). Auditory steady state responses to multiple simultaneous stimuli. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 96, 420-432.
- Lins, O. G., Picton, T. W., Boucher, B. L., Durieux-Smith, A., Champagne, S. C., Moran, L. M. y cols. (1996). Frequency-specific audiometry using steady-state responses. *Ear Hear*, 17, 81-96.
- Martinez, R., Beneito, P., Morant, V. A., Pitchard, R. M. I., García, C. F. J. y Marco, A. J. (2002). Steady state multi-frequency auditory evoked potentials as a technique to determine hearing threshold. *Acta Otorrinolaringol Esp*, 53, 707-717.
- Martinez, R., Beneito, J. I., Condado, M. A., Morais, D. y Fernandez Calvo, J. L. (2003). Results of one year's application of a universal protocol for the early detection of hearing loss in neonates. *Acta Otorrinolaringol Esp*, 54, 309-315.
- Mason, S., Davis, A. y Wood, S. (1998). Field sensitivity of targeted neonatal hearing screening using the Nottingham ABR screener. *Ear Hear*, 19, 91-102.
- Mauk, G. W., White, K. R., Mortensen, L. B. y Behrens, T. R. (1991). The effectiveness of screening programs based on high risk characteristics in early identification of hearing impairment. *Ear Hear*, 12, 312-319.
- Mencher, G. T., Davis, A. C., DeVoe, S., Beresford, D. y Bamford, J. M. (2001). Universal neonatal hearing screening: past, present and future. *Am J Audiol*, 10, 3-12.

- Norton, S. J., Gorga, M. P., Widen, J. E., Folsom, R. C., Sininger, Y., Cone-Wesson, B. y cols. (2000). Identification of neonatal hearing impairment: evaluation of transient evoked otoacoustic emission, distortion product otoacoustic emission and auditory brain stem response test performance. *Ear Hear*, 21, 508-528.
- Picton, T. W., Hillyard, S. A., Krausz, H. J. y Galambos, R. (1974). Human auditory evoked potentials. Evaluation of components. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 36, 179-190.
- Picton, T. W., Durieux-Smith, A. y Moran, L. M. (1994). Recording auditory brainstem responses from infants. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 28, 93-110.
- Picton, T. W., John, M. S., Dimitrijevic, A. y Purcell D. W. (2003). Human auditory steady-state responses. *Int J Audiol*, 42, 177-219.
- Perez-Abalo, M. C., Savio, G., Torres, A., Martin, V., Rodriguez, E. y Galan, L. (2001). Steady state responses to multiple amplitude modulated tones: An optimized method to test frequency specific thresholds in hearing impaired children and normal subjects. *Ear Hear*, 22, 200 – 211.
- Perez-Abalo, M. C., Gaya, J. A., Savio, G., Ponce de Leon, M., Perera, M. y Reigosa V. (2005). Early detection and intervention of hearing impairment in Cuba: Outcome after 20 years. *Rev Neurol*, 41, 556-563.
- Prager, D. A., Stone, D. A. y Rose, D. N. (1987). Hearing loss screening in the neonatal intensive care unit: auditory brain stem response versus Crib-O-Gram; a cost effectiveness analysis. *Ear Hear*, 8, 213-216.
- Prieve, B., Dalzell, L., Berg, A., Bradley, M., Cacaes, A., Campbell, D. y cols. (2000). The New York State universal newborn hearing screening demonstration project: Outpatient outcomes measures. *Ear Hear*, 21, 104-117.
- Rance, G., Dowell, R. C., Rickards, F. W., Beer, D. E. y Clark, G. M. (1998). Steady state evoked potential and behavioral hearing thresholds in a group of children with absent click evoked auditory brain stem response. *Ear Hear*, 19, 48-61.
- Rance, G. y Rickards, F. (2002). Prediction of hearing threshold in infants using auditory steady-state evoked potentials *J Am Acad Audiol*, 13, 236-245.
- Rickards, F. W., Tan, L. E., Cohen, L. T., Wilson, O. J., Drew, J. H. y Clark, G. M. (1994). Auditory steady-state evoked potentials in new borns. *Br J Audiol*, 28, 327-337.
- Savio, G., Cardenas, J., Perez Abalo, M. C., Gonzalez, A. y Valdes, J. (2001). The low and high frequency auditory steady state responses mature at different rates. *Audiol Neurootol*, 6, 279-287.
- Savio, G., Perez-Abalo, M. C., Gaya, J., Hernandez, O. y Mijares, E. (2006). Test accuracy and prognostic validity of multiple auditory steady state responses for target hearing screening. *Int J Audiol*, 45, 109-120.
- Simmons, B. F. y Russ, F. N. (1974). Automated newborn hearing screening, the crib-o-gram. *Arch Otolaryngol*, 100, 1-7.
- Sohmer, H. y Feinmesser, M. (1967). Cochlear action potentials recorded from the external ear in man. *Ann Otol Rhinol Laryngol*, 76, 427-436.
- Stapells, D. R. (2000). *Frequency specific evoked potential audiometry in infants. A sound foundation through early amplification*. Proceedings of an International Conference. October, Chicago, Illinois, 13-31.
- Stevens, J. C., Webb, H. D., Hutchinson, J., Connell, J., Smith, M. F. y Buffin, J. T. (1990). Click evoked otoacoustic emissions in neonatal screening. *Ear Hear*, 11, 128-133.
- Vohr, B. R., Carty, L. M., Moore, P. E. y Letourneau, K. (1998). The Rhode Island hearing assessment program: Experience with state wide hearing screening (1993-1996). *Pediatrics*, 133, 353-357.
- Watkin, P. M. (1999). Controlling the quality of universal neonatal hearing screenings. *Public Health*, 113, 171-176.

Recibido: 09/05/06

Aceptado: 22/05/06