rlp

Estudios sobre localización auditiva en etapas tempranas del desarrollo infantil

Studies about auditory localization in early stages of the child development

Recibido: septiembre de 2007.
Aceptado: junio de 2009.

Mercedes Ximena Hüg
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Argentina
Claudia Arias
Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

Correspondencia: Mercedes Ximena Hüg, CINTRA, Mtro. López esq. Cruz Roja Argentina, CP: 5016, Córdoba, República Argentina. E-mail: mhug@scdt.frc.utn.edu.ar

Esta investigación fue posible gracias a becas de formación de postrado recibidas por Mercedes Ximena Hüg, primero de la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SECyT) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC) y posteriormente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a subsidios otorgados a Claudia Arias por la SECyT de la UNC.

Resumen

La capacidad para percibir si el sonido que se escucha proviene desde la izquierda o derecha, arriba o abajo, detrás o adelante y qué tan cerca o lejos se encuentra la fuente sonora es de importancia capital tanto para animales como para seres humanos. La investigación sistemática sobre los aspectos evolutivos involucrados en el desarrollo de esta habilidad comenzó recién en la década del 80. El propósito de este trabajo es realizar una revisión de las principales investigaciones sobre el desarrollo de la habilidad para localizar sonidos directos y reflejados en neonatos y niños pequeños. Se discuten las principales hipótesis explicativas de los cambios evolutivos observados en esta habilidad y los tópicos que aún desafían a los expertos.

Palabras clave: percepción auditiva, estimulación auditiva, audición espacial, localización sonora, desarrollo del niño

Abstract

The capacity to perceive if the sound that listening comes from the left or right, above or down, behind or ahead and what so close or far is the sonorous source is of capital importance both for animals and human beings. Systematic research about developmental aspects involved in this ability begins in the 80´s. The aim of this paper is to review the experimental research about the ability to localize direct and reflected sound in neonates and infants. The main explicative hypotheses about the developmental changes observed in auditory localization and the topics that still challenge experts are discussed.

Key words: auditive perception, auditive stimulation, spatial audition, sound localization, child development.

Todos los organismos que poseen sistema auditivo pueden localizar sonidos en el espacio, habilidad de vital importancia para la supervivencia y comunicación con el medio. Localizar un sonido implica determinar si el sonido que se escucha proviene desde la izquierda o derecha, arriba o abajo, detrás o adelante y qué tan cerca o lejos se encuentra la fuente sonora del participante. Mientras que la percepción visual se restringe a una ventana frontal, el ser humano es capaz de localizar e identificar sonidos en cualquier posición con bastante precisión y velocidad. Perrott, Saberi, Brown y Strybel (1990) subrayan que el sistema auditivo es altamente eficiente para responder de manera inmediata a la información espacial, permitiendo que la persona se oriente de manera de poder procesar visualmente los estímulos relevantes.

Históricamente, la investigación sobre localización auditiva en humanos ha sido relegada a un segundo lugar después de la percepción visual. Además, los estudios que indagan específicamente sobre aspectos evolutivos de la localización de sonidos son muy escasos. Sin embargo, en las últimas décadas se ha producido un renovado interés por este campo de conocimiento. Es importante señalar que el estudio científico del desarrollo ontogenético de la audición fue posible gracias a desarrollos tecnológicos, avances en el conocimiento sobre la neurofisiología del sistema auditivo y la utilización de diversas variables de respuesta infantil como medida válida del funcionamiento auditivo (Aslin, Pisoni & Jusczyk, 1983, citados por Munar, Roselló, Mas, Morente & Quetgles, 2002).

Se denomina fuente sonora a todo cuerpo que produce estímulos sonoros (ANSI, 1999). Los sonidos directos son sonidos producidos por fuentes primarias y llegan a los oídos directamente desde ésta. Los sonidos reflejados son generados por fuentes secundarias y alcanzan los oídos una vez que se han reflejado en las superficies del entorno, como paredes y objetos.

En este artículo se realiza una revisión de los principales estudios sobre el desarrollo de la localización de sonidos directos y reflejados en infantes durante los primeros meses de vida. Seguidamente se presentan los principales aspectos teóricos y metodológicos implicados en el estudio de la localización de sonidos directos. Luego se comentan las investigaciones que fueron pioneras al sentar las bases para el abordaje experimental de la problemática y se detallan experimentos en los que se analizó la habilidad de neonatos y niños pequeños para localizar sonidos directos. Posteriormente se presentan aspectos teóricos y antecedentes del estudio de un fenómeno de fusión auditiva involucrado en la localización de sonidos reflejados: el efecto precedente. Finalmente, se discuten las principales hipótesis explicativas del mejoramiento en el rendimiento que se observa con la edad y los principales tópicos que desafían a los expertos en la actualidad.

Localización de sonidos directos

Aspectos teóricos relevantes

La audición espacial es el campo temático que estudia la manera como un organismo usa la información auditiva para percibir características de las fuentes sonoras presentes en el entorno: qué evento está produciendo el sonido, de dónde proviene, a qué distancia y en qué dirección se encuentra la fuente que lo origina (Clifton, 1992).

La localización sonora se refiere a la percepción de la posición de una fuente sonora en el plano horizontal o azimut (izquierda-derecha), en el vertical o elevación (arriba-abajo) y a la percepción de la distancia relativa entre participante y fuente (Blauert, 1997). El hombre es muy buen localizador en el plano horizontal, menos eficiente en el plano vertical y menos aún en relación a sus juicios sobre distancia (Moore, 1995).

Se denomina plano medio horizontal al que pasa por los oídos y divide imaginariamente al cuerpo humano en dos mitades, superior e inferior. El plano vertical lo divide en derecha e izquierda; el plano vertical medio sagital, donde no existen diferencias binaurales, lo separa en dos mitades iguales. El plano frontal es el que pasa por los oídos a 90º del plano medio horizontal y divide al cuerpo en adelante y detrás. Estos planos definen en el espacio los hemicampos derecho (simbolizado con +), izquierdo (simbolizado con–), superior (simbolizado con +) e inferior (simbolizado con–).

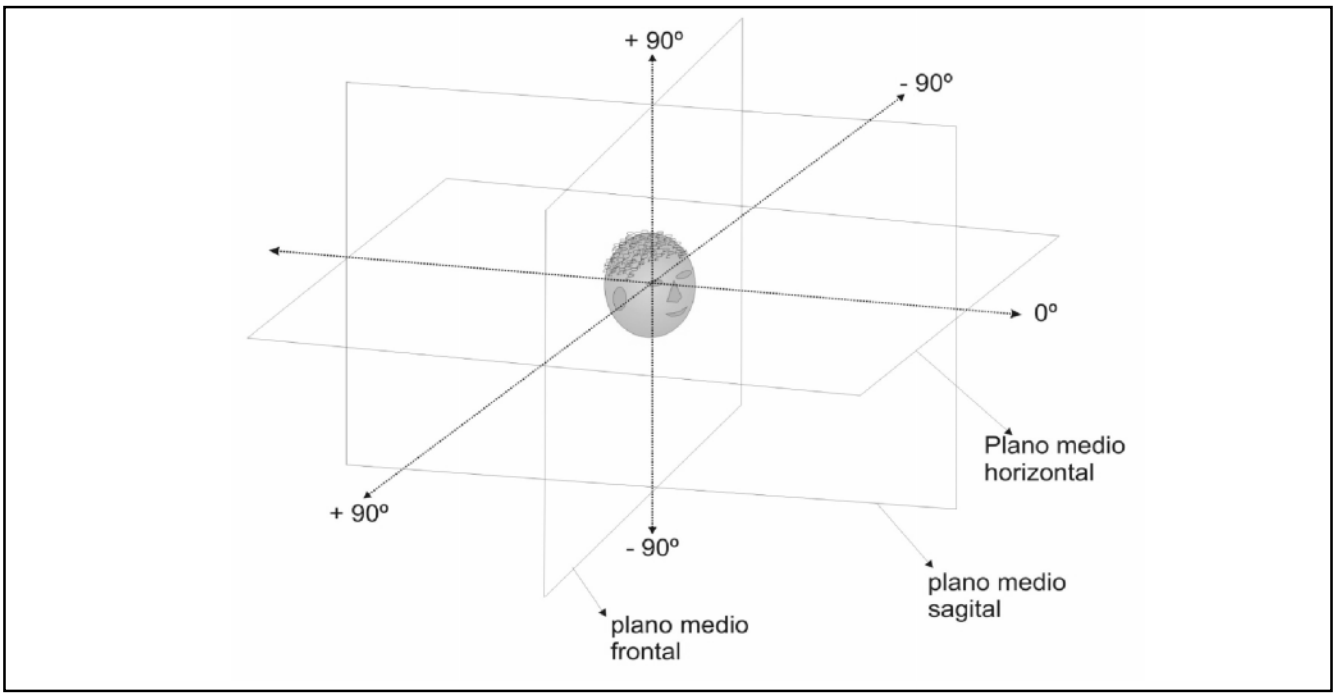

Figura 1. Representación esquemática de planos espaciales. Una fuente sonora a 0º de azimut y 0º de elevación está situada justo enfrente del participante a la altura de sus oídos.

La experimentación realizada en adultos, tanto en campo libre como con auriculares, ha permitido identificar las principales claves que intervienen cuando una persona localiza sonidos. Los indicios binaurales (en ambos oídos) son: la diferencia interaural de tiempo con que un sonido llega a los dos oídos, ITD (por sus siglas en inglés, *Interaural Time Difference);* la diferencia interaural en el nivel sonoro, ILD (por sus siglas en inglés, *Interaural Level Difference*) y el efecto de filtraje causado por la interacción del sonido con los pliegues del pabellón de la oreja, cabeza, torso y hombros. La ITD ocurre cuando los sonidos no proceden del plano vertical medio sagital, por lo que llegan a un oído antes que al otro (mayor tiempo al oído más lejano a la fuente), mientras que la ILD se refiere a las variaciones de intensidad con que el sonido llega a cada oído. Ocurre que la cabeza produce una sombra acústica en el oído más alejado de la fuente, disminuyendo con ello su intensidad. Depende de la frecuencia, pues además la cabeza se comporta como una barrera acústica al dejar pasar las bajas frecuencias y reflejar las altas frecuencias.

La posición percibida de la fuente sonora en el plano horizontal depende tanto del valor de ITD como de ILD. En el plano vertical medio sagital, donde como se recordará no existen diferencias interaurales, la posición percibida de la fuente depende del efecto de filtraje mencionado. La percepción de la distancia se ve afectada, en cambio, por una constelación de indicios de intensidad, reverberación y contenido espectral del objeto sonoro. Los principales indicios monoaurales (un sólo oído) son las características espectrales del estímulo sonoro en cada oído (Blauert, 1997). Otros factores como la experiencia, el aprendizaje, claves visuales y propioceptivas influyen también en la percepción del espacio auditivo (Blauert, 1997; Grantham, 1995).

En los experimentos de localización sonora los estímulos se presentan ya sea en campo libre, es decir utilizando un conjunto de parlantes, o a través de auriculares. Esta última condición, que tiene la ventaja de que puede ejercerse un mayor control de los parámetros acústicos que inciden en la respuesta, se denomina lateralización o «localización dentro de la cabeza» porque, cuando no se utilizan principios de realidad virtual, la persona tiene la impresión de que el sonido proviene desde algún lugar dentro de la cabeza.

La medida de rendimiento de los niños pequeños en los estudios en campo libre es, en general, el giro de cabeza, ya sea en relación a la dirección izquierda o derecha de la

respuesta de giro o a la precisión en grados –error promedio– con que el infante enfrenta la fuente sonora. Esta última variable es la diferencia entre la posición real de la fuente sonora y la posición percibida. Otra respuesta que ha comenzado a utilizarse y que se explica más adelante es la conducta de asir objetos sonoros.

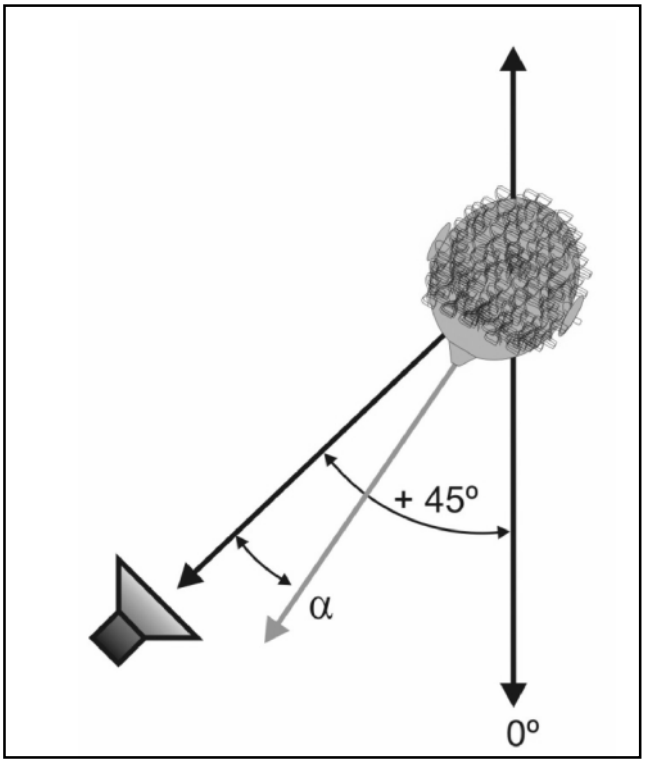

Figura 2. Precisión de la respuesta de localización. El error es la diferencia entre la posición del parlante (+45º) y la posición percibida.

Estudios en recién nacidos

El aparato auditivo es funcional entre el sexto y séptimo mes de gestación, lo cual le permite al bebé percibir sonidos antes del nacimiento (Boothroyd, 1997; Graven & Browne, 2008). El estudio experimental sobre la localización auditiva en niños pequeños se inició hace poco más de dos décadas. En ese momento, las evaluaciones clínicas realizadas con escalas de desarrollo como la de Brazelton (1973), indicaban que el sonido de un sonajero era capaz de provocar la respuesta de orientación de la cabeza en neonatos. En la década del 70 algunos autores comenzaron a interesarse por este campo de estudio utilizando distintos tipos de estímulos y procedimientos con resultados diversos. Wertheimer ya había publicado en 1961 un artículo acerca de la capacidad de un recién nacido para orientarse visualmente en la dirección de una fuente sonora. En 1976, Mendelson y Haith observaron que los neonatos giraban la cabeza en la dirección de la voz humana. En 1977 Butterworth y Castillo mostraron que recién nacidos de entre 1 y 3 días de edad movían sus ojos en la dirección en la que se les presentaba un sonido. En el mismo año McGurk, Turnure y Creighton observaron que los neonatos seguían con los ojos el movimiento de estímulos auditivo-visuales pero fallaban en esta tarea si se les presentaban estímulos sólo auditivos.

Fueron Muir y Field en el año 1979 los primeros en demostrar que bajo ciertas condiciones experimentales los recién nacidos giran su cabeza en la dirección de una fuente sonora colocada a 90º en el plano horizontal. Realizaron dos experimentos: en el primero utilizaron como estímulo el sonido real de un sonajero sacudido rítmicamente durante 20 segundos, en el segundo presentaron el mismo objeto sonoro grabado y reproducido a través de parlantes. Los resultados mostraron que los infantes giraron su cabeza hacia la fuente sonora en el 87% y 74% de los ensayos, respectivamente. En la mayoría de los bebés se observó el siguiente patrón de movimiento: al comienzo del ensayo mantenían su ojos abiertos, luego los cerraban mientras giraban lentamente la cabeza y los volvían a abrir al detenerse, como si quisieran "inspeccionar visualmente" la fuente sonora (Muir & Field, 1979).

Clarkson, Clifton y Morrongiello (1985) y posteriormente Clarkson, Clifton, Swain y Perris (1989) estudiaron el efecto del tipo de estímulo sonoro sobre la respuesta de orientación de la cabeza de recién nacidos. Observaron que sólo los sonidos con una duración de 1 segundo o más provocaron la respuesta de giro. También fueron efectivos estímulos de corta duración repetidos rápidamente (2 o más por segundo).

En 1985, Muir evaluó la respuesta de localización de recién nacidos a sonidos provenientes de parlantes ubicados en semicírculo enfrente del niño. Los resultados obtenidos por el autor mostraron que, aunque los neonatos no lograban localizar la posición exacta de la fuente sonora, el giro de cabeza varió en concordancia con la posición angular del parlante, esto es, a mayor posición angular se observó una mayor amplitud del giro de la cabeza.

Más adelante Morrongiello, Fenwick, Hillier y Chance (1994) analizaron la respuesta de neonatos a cambios repentinos en la posición de una fuente sonora. La prueba comenzaba presentándoles sonidos que inicialmente provenían de un parlante determinado. Una vez que el niño comenzaba a girar su cabeza, el sonido inicial cesaba y era transmitido aleatoriamente por cualquier otro parlante. Los resultados obtenidos mostraron que el error promedio que cometieron los neonatos fue de 26º; valor mucho mayor, como era de esperar, que el error de 16º que comenten en promedio los bebés de 6 meses (Morrongiello & Roca, 1987a). Se observó además, que los recién nacidos ya pueden corregir el rumbo del movimiento de su cabeza en base a nueva información provista por el cambio de posición del evento auditivo. Estos resultados sugieren que en etapas muy tempranas del desarrollo, los niños poseen cierta capacidad de localizar sonidos no sólo en hemicampos opuestos (izquierda – derecha) sino también dentro de un mismo hemicampo, lo cual es más difícil. Los autores postulan que al momento de nacer los seres humanos disponen de un *sistema de seguimiento auditivo innato* que facilitaría la exploración visual de los eventos sonoros relevantes del ambiente (Morrongiello *et al*., 1994).

Localización de sonidos directos en los cinco primeros meses de vida

Estudios realizados con infantes de entre 1 y 4 meses de edad mostraron que durante este período ocurre un cambio importante en la naturaleza de la respuesta de orientación sonora. Muir, Abraham, Forbes y Harris realizaron en 1979, un estudio longitudinal de localización con infantes desde el nacimiento hasta los 4 meses de edad. Utilizaron el procedimiento de Muir y Field (1979) descrito anteriormente, en el que presentan una fuente sonora colocada a 90º en el plano horizontal, empleando estímulos sonoros significativos para el niño como la voz materna. Los resultados mostraron que durante el segundo y tercer mes de vida los infantes disminuyeron la respuesta de giro de la cabeza hacia la fuente sonora, para reestablecerse hacia los 4 meses. Field, Muir, Pilon, Sinclair y Dodwell (1980) implementaron otro estudio longitudinal desde el nacimiento hasta los 3 meses y obtuvieron resultados similares, aunque el reestablecimiento de la respuesta de giro se produjo a los 3 meses.

Muir, Clifton y Clarkson (1989) determinaron que durante los primeros meses de vida la respuesta de localización sonora mediante el giro de cabeza, sigue una función en forma de U: aparece a minutos de nacer, casi desaparece como respuesta confiable y válida entre el primer y segundo mes, reaparece y se incrementa hacia los 3-4 meses de edad. A los 5 meses este comportamiento es cualitativamente muy diferente de la respuesta del recién nacido: es más rápida, la latencia de 7 segundos disminuye a 2 ó 3 segundos; es mucho más exacta: el error disminuye de 15º a casi 0º y está acompañada de búsqueda visual.

Los autores postularon que los cambios observados no podrían atribuirse sólo a aspectos vinculados con la maduración del control motor de los músculos del cuello y la cabeza sino que se deberían también a la maduración del sistema auditivo central. En otras palabras, mientras que en los recién nacidos la consistencia de esta respuesta se asemeja a otras conductas neonatales de tipo reflejo mediadas subcorticalmente –por lo que van desapareciendo a medida que se incrementa la edad– en los infantes más grandes, el giro de la cabeza es un comportamiento de tipo voluntario y por ello está mediado corticalmente. Otra hipótesis (Muir, Humphrey & Humphrey, 1994) vincula la función en U con el desarrollo de la agudeza visual. Sostiene que en el nacimiento, los campos perceptuales visual y auditivo son muy diferentes: mientras que el campo visual es pobre y está limitado a la región comprendida entre (± 30º), aproximadamente, el bebé puede localizar fuentes sonoras ubicadas enfrente y en posiciones laterales (± 90º). En los primeros meses de vida, el campo visual se expande rápidamente hasta alcanzar hacia los 4 meses de edad, valores cercanos al de los adultos (aproximadamente ± 180º). Durante el segundo y tercer mes de vida los infantes restringirían el giro de cabeza sólo para estímulos auditivos que estén dentro de su campo visual. Cuando finaliza la función en U se habría conformado un marco de referencia espacial audiovisual integrado.

Se han analizado, además, aspectos evolutivos vinculados a la precisión en la localización. En la región frontal comprendida entre (± 30º), los adultos pueden discriminar cambios angulares tan pequeños de 1º ó 2º. Morrongiello, Fenwick y Chance (1990) realizaron un estudio con niños de 2, 3, 4, 5 y 6 meses en el que se aplicó la técnica de estimación de umbral del mínimo

ángulo audible (MAA), que permite obtener la mínima diferencia angular que puede ser discriminada por el participante. Esta técnica consiste en presentarle al niño estímulos sonoros desde el frente que repentinamente cambian su posición hacia la izquierda o la derecha. Estas diferencias se van haciendo cada vez más pequeñas hasta que el niño no responde. Las respuestas correctas, es decir, si gira su cabeza u ojos hacia el hemicampo correcto, son retroalimentadas con un reforzador viso-auditivo consistente en un juguete con sonido. En este estudio, la técnica del MAA se aplicó en combinación con el *Procedimiento Basado en el Observador*, quien debe decidir en cada ensayo si hubo o no un cambio en los estímulos sonoros teniendo como única referencia la observación de cualquier comportamiento del infante como un cambio en la expresividad facial o en el nivel de actividad o la ausencia de alguna de ellas. Los resultados mostraron que la habilidad para percibir cambios en la posición de fuentes sonoras dentro de un hemicampo mejora durante los 6 primeros meses de vida: a los 2 meses el MAA fue de 26.5º; a los 3 meses de 24º; a los 4 meses de 22.5º; a los 5 meses de 20º y a los 6 meses de 17º. Además, en coincidencia con la función en U, todas las respuestas de orientación (giro de cabeza, movimiento de los ojos) fueron bajas entre los 2 y los 4 meses: ocurrieron en el 30% a 40% de los ensayos. Otras respuestas registradas como el alerta, disminución de la succión y disminución de los movimientos corporales tuvieron una incidencia aún menor: en el 9% a 16% de los ensayos (Morrongiello *et al*., 1990).

Por otra parte, cabe destacar que en esta etapa evolutiva se han realizado muy pocos estudios de lateralización, que como se mencionó, implican el uso de auriculares. En 1980, Bundy realizó un estudio de lateralización auditiva en el que analizó el efecto de la manipulación de diferencias interaurales de tiempo e intensidad (ITD e ILD, respectivamente) sobre la respuesta de localización de bebés de 2 y 4 meses. Se presentaron dos tipos de ensayos, en algunos se variaban los valores de ITD y en otros, los de ILD, de modo que algunos estímulos sonaban en el auricular izquierdo y otros en el derecho. Los niños enfrentaban un panel donde se ubicaban dos figuras atractivas, una a cada lado. Una vez que se atraía la atención del niño hacia el frente, se le presentaban estímulos sonoros que provenían aleatoriamente de la izquierda o derecha y que luego cambiaban repentinamente hacia el lado contrario para continuar emitiéndose de este lado. La respuesta evaluada fue el giro de los ojos, medido como la dirección de la mirada en el momento del cambio, y el tiempo total de fijación visual. Los resultados mostraron que los niños no giraron sus ojos en la dirección correcta en el momento del cambio. Sin embargo, sí hubo diferencias en el tiempo de fijación visual: independientemente de la edad miraron durante más tiempo el estímulo visual ubicado del mismo lado que el estímulo auditivo cuando la clave que se modificaba era la ITD, mientras que sólo los más grandes lo hacían cuando la clave era la ILD. El autor concluyó que la ITD tiene mayor relevancia para localizar sonidos en períodos tempranos del desarrollo.

Ashmead, Davis, Whalen y Odom (1991) investigaron el papel de la clave ITD en una tarea de lateralización sonora en infantes de 4, 5 y 6 meses. Los resultados obtenidos tampoco mostraron diferencias en función de la edad: desde los 4 meses de edad los infantes percibieron diferencias de ITD en el rango de 50 a 75 μs (en adultos estos valores llegan a 10 μs). Los autores indicaron que en etapas tempranas -aunque el rendimiento no es tan bueno como el de los adultos- el sistema auditivo tendría disponible un mecanismo muy preciso para procesar las ITD, más preciso aún que para procesar los cambios angulares en campo libre.

Respecto del peso de la clave de ILD, Ashmead, Grantham, Murphy y Tharpe (1993) encontraron que a los 5 y 6 meses de edad, el umbral para detectar un cambio en los valores de ILD es de 6.6 dB. Este valor es mucho mayor al de los adultos, que oscila entre 0.5 y 1 dB. Por ello los autores concluyen que en este período de edad los valores de ILD no son los indicios de mayor peso para la localización.

Es importante destacar que en los primeros años de vida ocurren continuos cambios morfológicos, como el crecimiento de la cabeza y el cuerpo, que modifican las claves binaurales de tiempo e intensidad. A mayor diámetro cefálico mayor es la distancia anatómica entre ambos oídos, por lo que para la misma posición de una fuente sonora le corresponde un mayor valor de ITD. En los recién nacidos la distancia interaural promedia los 8.4 cm, con lo cual una diferencia de tiempo de 400 μs con que arriba el sonido a ambos oídos se corresponde con una fuente ubicada a 90º. A los 5 meses, la distancia entre ambos oídos alcanza los 9.8 cm y el valor de ITD

para el mismo ángulo será de 500 μs. En un adulto estos valores alcanzan los 13.5 cm y 700 μs, respectivamente (Clifton, Gwiazda, Bauer, Clarkson & Held, 1988). Estas correspondencias implican que, respecto a los adultos, los infantes pequeños percibirán valores de ITD que irán cambiando rápidamente durante los primeros meses de vida, lo que haría más difícil la localización auditiva para los bebés.

Localización de sonidos directos desde los seis a dieciocho meses

A partir de los 6 meses en adelante la habilidad para localizar sonidos directos se vuelve cada vez más precisa. Morrongiello y Rocca (1987a) analizaron el rendimiento de niños de 6, 9, 12, 15 y 18 meses de edad en una prueba de localización sonora en el plano horizontal. Les presentaron estímulos sonoros desde un dispositivo semicircular enfrente del niño con parlantes ubicados en distintos ángulos (18º, 36º, 54º, 72º, 90º) y midieron su rendimiento con la respuesta de giro de cabeza. Los infantes recibieron estímulos sólo-auditivos y auditivo-visuales. Los ensayos sólo-auditivos consistían en una sucesión de *clics*, que son estímulos muy breves. En los ensayos auditivo-visuales durante la presentación de los clics se activaba simultáneamente un estímulo luminoso en la posición del parlante activo. Los resultados de los ensayos sólo-auditivos revelaron diferencias en el rendimiento según la edad: el error promedio de los bebés de 6 meses para todos los parlantes fue de 17º mientras que el error promedio de los niños de 18 meses fue de entre 6º y 7º. En los ensayos auditivo-visuales todos los infantes rotaron su cabeza con un error promedio de entre 4º a 5º y no se encontraron diferencias en función de la edad. O sea que, cuando disponían de claves visuales y auditivas, todos los bebés fueron capaces de girar su cabeza con precisión, cualquiera fuera la posición del parlante. Los autores subrayaron la importancia de estudiar en profundidad la relación entre el desarrollo de la visión y la localización auditiva en períodos tempranos y sugirieron para ello la realización de estudios comparativos en niños con ceguera congénita.

Por otra parte, una serie de estudios que se describen a continuación, realizados con la técnica del MAA en bebés de 6 a 18 meses, también reportaron un mejor rendimiento en función de la edad.

Ashmead, Clifton y Perris en 1987 midieron el MAA en el plano horizontal en infantes de 6 a 7 meses de edad. Encontraron que a esta edad los niños sólo discriminan desplazamientos angulares mayores a 19º, poco más que el umbral de 17º obtenido por Morrongiello *et al.* (1990).

En un estudio longitudinal, Morrongielo (1988) evaluó a niños de 6, 9, 12, 15 y 18 meses con esta técnica. Sus resultados mostraron que a los 6 meses el umbral fue de 12º, a los 12 meses de 8º y a los 18 meses de 4º. En un trabajo posterior, Morrongiello y Rocca (1990) presentaron a infantes de 6, 12 y 18 meses una tarea más compleja. Aplicaron la técnica del MAA presentando estímulos desde un parlante de referencia ubicado en una posición lateral (60º de azimut). Para las personas adultas es más difícil discriminar cambios angulares pequeños en la zona lateral que enfrente: para discriminar un cambio en la posición de fuentes ubicadas inicialmente a 60º de azimut se requiere de una variación angular del orden de los 4º a 6º, mientras que, como se mencionó anteriormente, el umbral para fuentes ubicadas enfrente del participante es sólo de 1º a 2º. En concordancia con la dificultad mostrada por los adultos, los bebés obtuvieron valores de MAA más altos que los reportados por Morrongielo (1988) para estímulos presentados inicialmente desde la línea media: el MAA a los 6 meses fue de 17º, a los 12 meses fue de 14º y a los 18 meses, de 10º. Como puede observarse, en este caso también se encontró que los umbrales mejoraron con la edad.

Respecto a la localización en el plano vertical, algunos de los primeros datos evolutivos reportados indicaban que bebés de 7 meses era capaces de localizar una fuente sonora en el plano vertical inferior. Las fuentes que están en el plano vertical superior se localizarían a los 13 ó 16 meses y a partir de los 21 a 24 meses, los niños podrían localizar una fuente sonora ubicada en cualquier lugar del espacio auditivo (Northern & Downs, 1981).

Morrongiello y Rocca (1987b) aplicaron la técnica de estimación del MAA para analizar la precisión en la localización en el plano horizontal y vertical en infantes de 6, 9, 12, 15 y 18 meses de edad. Sus resultados mostraron que la localización fue peor en el plano vertical que en el horizontal para todas las edades. Además, en el plano horizontal las respuestas fueron más rápidas, precisas y consistentes que en el vertical. El rendimiento mejoró con la edad en todas las condiciones: el MAA promedio en el

plano vertical fue a los 6 meses de 15º, a los 9 meses de 12º, a los 12 meses de 10º, a los 15 meses de 8º y a los 18 meses alcanzó valores similares a los adultos (4º).

Morrongiello (1987) analizó las respuestas de niños de 6, 9, 12, 15 y 18 meses en el plano vertical medio sagital con la técnica del MAA. Como se recordará, en este plano las claves de localización dependen del efecto de filtraje causado por la interacción del sonido con los pliegues del pabellón de la oreja, cabeza, torso y hombros. Se utilizaron tres tipos de señales con distintas frecuencias: estímulos con frecuencias menores a los 4 kHz, estímulos con frecuencias de entre 4 y 8 kHz y estímulos con frecuencias entre los 8 y 12 kHz. Los resultados mostraron un mejor rendimiento para señales de altas frecuencias en todas las edades. Además, se observó un mejoramiento sistemático en función de la edad en el caso de los estímulos con frecuencias más altas: a los 6 meses el valor de MAA fue de 16º, a los 9 meses de 12º, a los 12 meses de 12º, a los 15 meses de 8º y a los 18 meses de 4º. Cabe señalar que ningún infante pudo localizar sonidos con frecuencias inferiores a los 4 kHz, posiblemente debido a que en este período del desarrollo, el pabellón auditivo es muy pequeño en relación al tamaño de las ondas de baja frecuencia y por ello no se produce una interacción significativa entre el estímulo y los pliegues del pabellón de la oreja.

Percepción de distancia

Como se describió anteriormente, la percepción de la distancia a la que se encuentra la fuente sonora se ve afectada por un conjunto de indicios de intensidad, reverberación y contenido espectral del objeto sonoro (Blauert, 1997). Por ejemplo, la investigación en adultos mostró que una fuente sonora tiende a percibirse como más cercana si se aumenta la intensidad del sonido que ésta emite (Mershon & King, 1975).

La respuesta de orientación de la cabeza no es adecuada para evaluar distancia en infantes, porque indica principalmente la dirección percibida en la que se encuentra el sonido. En la última década, la habilidad para percibir la distancia auditiva en niños pequeños ha comenzado a estudiarse utilizando como variable de respuesta la conducta de asir objetos sonoros. Para ello se desarrolló una técnica consistente en presentarles a niños de pocos meses de edad un objeto sonoro en diferentes posiciones y distancias en una sala de pruebas a oscuras y registrar su respuesta con video filmadora infrarroja. Así, sin claves visuales disponibles, los infantes responden sólo en base a las claves auditivas y a la retroalimentación propioceptiva derivada del movimiento de su cuerpo.

En 1991, Clifton, Perris y Bullinger realizaron dos estudios con infantes de entre 6 y 7 meses para determinar si percibían la distancia a la que se les presentaba un objeto sonoro en la oscuridad. En el primer estudio, presentaron un juguete sonoro a la izquierda o la derecha en dos condiciones: al alcance del niño (15 cm) o a distancia lejana (60 cm). Se intercalaron algunos ensayos en condición de luz a distancia cercana, para recordarle al niño la tarea. Los resultados mostraron que los infantes realizaron más intentos de asir el juguete sonoro cuando éste se encontraba a una distancia próxima respecto a cuando se encontraba lejos. En un segundo estudio se conservó el mismo diseño salvo que los juguetes fueron presentados enfrente del niño en los ensayos en la luz y desplazados a la derecha o izquierda en la oscuridad, para controlar el efecto de la vista previa del juguete. El resultado fue similar al del primer estudio: en los ensayos en la oscuridad, los infantes intentaron asir sólo los juguetes que estaban próximos.

Posteriormente Litovsky y Clifton (1992) realizaron un estudio con adultos y bebés de 6 meses de edad para investigar si los participantes discriminaban la distancia a la que se les presentaban estímulos sonoros basándose sólo en claves de intensidad. Para ello, presentaron a los participantes objetos sonoros en la oscuridad a distancias cercana (15 cm) y lejana (100 cm). En algunos ensayos, la distancia y las claves de intensidad variaban de manera consistente con lo que sucede en la realidad (fuentes sonoras más cerca suenan más intensas) y en otros estas variaciones eran inconsistentes (más cerca, más débiles). En contraposición a lo esperado, los resultados mostraron que los niños tuvieron un mejor rendimiento que los adultos en el sentido que no fueron engañados con la manipulación experimental: los infantes sólo intentaron asir objetos que realmente estaban más cerca sin importar si sonaban más fuertes o más débiles. Así, concluyeron que los infantes no juzgaron la distancia de los objetos sonoros de la misma manera que los adultos sino que, cuando las claves de intensidad no eran consistentes, parecían basarse en otro tipo de claves, como por ejemplo, las claves espectrales. Es interesante notar que adultos entrenados también pueden lograr este

rendimiento (Ashmead, LeRoy & Odom, 1990, citado por Litovsky & Clifton, 1992).

Por otra parte, Morrongiello, Hewitt y Gotowiec (1991) también analizaron la incidencia de las claves de intensidad en la habilidad de infantes de 6 y 12 meses para percibir la distancia en la que se encontraba una fuente sonora. En este caso, evaluaron a los infantes en una sala iluminada y la respuesta que midieron fue el condicionamiento del giro de la cabeza. Los autores presentaron, en primer lugar, un estímulo inicial emitido desde un parlante de referencia colocado a 90º a la derecha a 110 cm del infante. Los otros parlantes se ubicaron adelante o detrás del de referencia. Luego del estímulo inicial los sonidos se emitían aleatoriamente desde parlantes más cerca o más lejos del niño o, por el contrario, se cambiaba la intensidad del estímulo sin variar su posición real, simulando que la fuente estaba más cerca o más lejos. Los niños fueron condicionados para girar su cabeza sólo si percibían algún cambio en la estimulación sonora. En coincidencia con el estudio descrito anteriormente, los resultados mostraron que los infantes tuvieron un mejor rendimiento cuando hubo un cambio real en la distancia de la fuente y no cuando éste era simulado. No se observaron diferencias en función de la edad. También se encontró que los niños discriminaron mejor la distancia si los sonidos se escuchaban más cerca. Esta habilidad es ecológicamente relevante y también se observa en adultos (Morrongiello *et al*., 1991).

Localización de sonidos reflejados: el efecto precedente

Aspectos teóricos relevantes. Los seres humanos pasan la mayor parte del tiempo en ambientes cerrados, donde el sonido se propaga en múltiples direcciones y sufre cambios físicos de importancia al reflejarse en las superficies cercanas como paredes, techos y objetos. El sistema auditivo se enfrenta así con una batahola de información sonora y debe ser capaz de resolver la competencia perceptual que se produce entre el sonido original o directo y sus reflexiones. Es útil recordar que la fuente que genera el sonido original o directo se denomina fuente primaria, por ejemplo un perro que ladra, y la que genera la reflexión, fuente secundaria. En general, la reflexión es una copia coherente, retardada y atenuada del sonido original que no se escucha como evento separado. El término eco se utiliza cuando la reflexión se percibe como un evento sonoro independiente, es decir, separada del sonido directo.

Una estrategia inconsciente utilizada por el individuo para enfrentar la información conflictiva de los ambientes cerrados, es el efecto precedente. Ha sido definido como el fenómeno de audición espacial que ocurre cuando dos sonidos similares se presentan desde diferentes lugares separados por un breve retardo de tiempo (Arias & Ramos, 2003; Litovsky, Colburn, Yost & Guzman, 1999). Históricamente se lo refiere como un fenómeno de fusión y dominancia del sonido que llega primero (líder) y se lo describe como un mecanismo supresor de ecos (sonido retardado). Este mecanismo le ayudaría al individuo a localizar con precisión la fuente sonora primaria, que es la que tiene mayor significación vital, pues le atribuye un fuerte pesaje al sonido directo y reduce la influencia de la información direccional de los sonidos retardados. En otras palabras, el eco provoca un conflicto, que generalmente se resuelve a favor de la información que llega primero. No obstante, la información contenida en el sonido retardado se preserva, modificando la percepción y posición aparente del líder (Clifton, Freyman, Litovsky & McCall, 1994). Lo mencionado se comprueba además en situaciones reales, donde las reflexiones de un recinto, a pesar de no escucharse como eventos separados, influyen sobre varios parámetros de la imagen fusionada, tales como sonoridad, espacialidad y altura tonal. Estos cambios perceptuales a su vez, también dependen entre otras variables, del tipo de estímulo, nivel sonoro y dirección de las fuentes sonoras.

Tres preceptos están involucrados en el efecto precedente: fusión, dominancia en la localización y supresión de la discriminación del sonido retardado (Arias & Ramos, 2003; Litovsky & Shinn-Cunningham, 2001). El primero se refiere a la fusión de los dos sonidos (líder y retardado) en una sola y coherente imagen auditiva, lo cual resulta útil para evitar imágenes sonoras múltiples que puedan dificultar la localización auditiva de la fuente primaria, que como se mencionó es la que tiene mayor relevancia. Se denomina umbral del eco al valor en milisegundos a partir del cual el sonido líder y retardado se escuchan como dos eventos separados. Este retardo varía en función del tipo de estímulo empleado, para las personas adultas alcanza los 35 ms en el caso de estímulos verbales y los 5 a 10 ms en el caso de los *clics* (Freyman,

Clifton & Litovsky, 1991).

El segundo precepto de dominancia en la localización se refiere al procesamiento de la información direccional, esto es, dónde se localiza la imagen auditiva y cuánto la posición del sonido líder domina esta percepción.

El tercer precepto se refiere a la habilidad del participante para discriminar cambios angulares en la posición del sonido retardado, que no se percibe como un evento separado.

Estudios realizados en adultos y niños indican que los cambios en la posición del sonido retardado son mucho más difíciles de discriminar que los cambios en el sonido líder (Litovsky, 1997; Litovsky & Macmillan, 1994; Litovsky & Shinn-Cunningham, 2001). La dificultad para extraer información direccional del sonido retardado se debería al mecanismo supresivo mencionado anteriormente, que es fuerte para retardos que están por debajo del umbral del eco y se vuelve menos efectivo a medida que el retardo aumenta.

Trabajos recientes realizados con adultos indican que el efecto precedente tiene componentes dinámicos que ponen en evidencia activos procesos cognitivos (Clifton *et al.*, 1994; Freyman *et al.*, 1991; Freyman & Keen, 2006). Si se presenta un único par de sonidos –por ejemplo un *clic* y su reflexión simulada retardada en 8 ms– el participante escuchará dos eventos separados. Sin embargo, cuando se presenta el mismo par de sonidos en la forma de trenes de pares de sonidos (cuatro pares por segundo, por ejemplo), el participante escuchará dos eventos separados pero sólo durante los primeros cuatro a ocho pares después de lo cual el eco se hace inaudible como evento separado, es decir, se produce la fusión. En otras palabras, el umbral del eco se incrementa durante el curso de una secuencia de sonidos idénticamente presentados (Freyman *et al.*, 1991). Este fenómeno se denomina mecanismo de incremento gradual en la supresión del eco (*build up of echo supression*). Cuando ocurren cambios repentinos en la configuración del estímulo o cuando aparece información nueva este mecanismo dinámico se libera, proceso que se denomina rompimiento de los fenómenos de precedencia o liberación de la supresión (*breakdown of precedence phenomena o release from suppression*; Clifton, 1987).

En la mayoría de los estudios sobre efecto precedente, se utiliza el estímulo líder- retardado o un par de clics, que simulan un sonido original y su reflexión. Aunque difiere en varios sentidos de la realidad, se sostiene que estas configuraciones optimizadas, que minimizan la complejidad de los estímulos, aunque no sean reales, son esenciales como un primer paso para comprender los procesos auditivos básicos del efecto precedente.

Principales estudios evolutivos

Las primeras investigaciones realizadas sobre el desarrollo de la habilidad para percibir sonidos bajo condición de precedencia se realizaron con recién nacidos e indagaron el aspecto de dominancia en la localización. En general, empleaban dos parlantes ubicados a 90º a la izquierda y derecha del niño. Como estímulo sonoro se utilizaba el sonido grabado de un sonajero, trenes de clics o la grabación de una voz significativa para el niño. Se les presentaba a los infantes dos condiciones experimentales: a) sin efecto precedente (sólo sonido directo); b) con efecto precedente (sonido líder y retardado separados por un breve retardo de tiempo). La condición sin efecto precedente se incluye como control.

Los resultados obtenidos fueron negativos: los neonatos no giraron cuando se les presentaron pares de sonidos configurados bajo precedencia pero sí lo hicieron en la condición control (Clifton, Morriongello, Kulig & Dowd, 1981; Morrongiello, Clifton & Kulig, 1982; Muir *et al.*, 1989).

En la búsqueda de un estímulo más adecuado para los niños pequeños, Clifton, Morrongiello y Dowd (1984) realizaron una prueba con infantes de 2 meses en el cual utilizaron la voz grabada de mujer que pronunciaba una frase significativa para el niño ("Hola bebé" "¿Cómo estás?" "¡Acá está!"). Sin embargo, los resultados mostraron que el porcentaje de giros de cabeza hacia la voz grabada superó el nivel de azar sólo en la condición control.

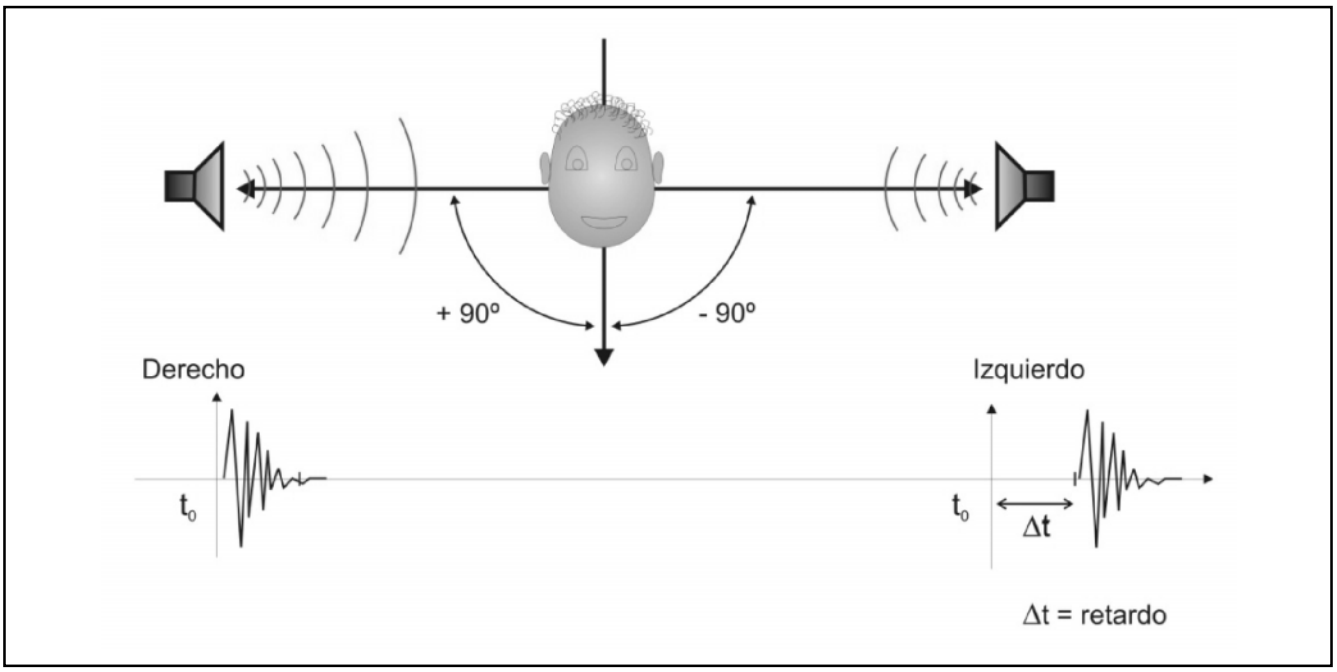

Figura 3. Localización de sonidos reflejados – efecto precedente. El sonido líder (parlante derecho) y retardado (parlante izquierdo) se presentan con un breve retardo de tiempo △t entre ambos.

Clifton *et al.* (1984) también evaluaron a bebés de entre 2 y 6 meses. Utilizaron como estímulos trenes de *clics* configurados bajo condición de precedencia con un retardo de 8 ms entre el sonido líder y retardado, o trenes de un sólo *clic* (condición control). Los resultados mostraron que el porcentaje de respuestas de los niños de 2 meses fue muy bajo tanto para los sonidos configurados bajo efecto precedente como para la condición control, en coincidencia con la disminución de respuestas observada durante la función en U mencionada anteriormente. A los 6 meses los infantes ya respondieron a ambos tipos de estimulación.

Posteriormente, Muir *et al.* (1989) realizaron un estudio longitudinal de características similares a los anteriores con infantes de 3 días a 7 meses de edad utilizando como estímulo el sonido del sonajero grabado. Observaron que los infantes de 2, 3 y 4 meses giraron su cabeza hacia el sonido directo en el 55%, 78% y 92% de los ensayos, respectivamente, mientras que bajo condición de precedencia, lo hicieron en el 38%, 65% y 76% de los ensayos. Los autores postularon que las primeras respuestas confiables y válidas hacia este tipo de estimulación ocurren a los 4 meses, cuando finaliza la función en U mencionada anteriormente.

Un estudio posterior realizado por otro equipo de investigación comparó la respuesta de: a) un grupo de infantes a término de 7 meses de edad, b) un grupo de infantes a término de 10 meses de edad, c) un grupo de bebés prematuros de 10 meses de edad cronológica y 7 meses de edad corregida (Burnham, Taplin, Henderson-Smarta, Earnshaw-Brown & O'Grady, 1993). Los resultados obtenidos mostraron que los umbrales para los niños prematuros fueron similares a los de los niños a término de 7 meses, es decir, correspondieron a su edad corregida y no a la cronológica. Los autores concluyeron que los cambios que presenta este fenómeno perceptual durante los primeros meses de vida no dependen del aprendizaje sino de la edad madurativa considerada desde el momento de la concepción.

Finalmente, Litovsky (1997) indagó aspectos evolutivos vinculados a la dominancia en la localización y la supresión de la discriminación del sonido retardado con la técnica de estimación del MAA mencionada anteriormente, que permite obtener la mínima diferencia angular que puede ser discriminada por el participante. La autora evaluó los umbrales alcanzados por infantes de 18 meses, niños de 5 años y adultos en tres condiciones experimentales: a) sin efecto precedente (condición

control), b) con efecto precedente -discriminación de cambios en la posición del sonido líder, c) con efecto precedente -discriminación de cambios en la posición del sonido retardado. Como estímulos sonoros se utilizaron *bursts* (descargas) de ruido, es decir, una secuencia de trenes de pulsos de ruido blanco. En la condición control, los primeros 4 *burst* de ruido fueron presentados desde la línea media, seguidos por 11 *burst* de ruido presentados desde el parlante de la derecha o de la izquierda. En ambas condiciones con efecto precedente (dos fuentes sonoras), los ensayos también comenzaban con 4 *burst* de ruido de una sola fuente desde la línea media. En los 11 *burst* de ruido que seguían, había 2 muestras de ruido por *burst* (par líder-retardado), con el comienzo de una muestra retardada en 5 ms en relación al comienzo de la otra. En la condición de precedencia - discriminación del líder, la fuente líder provenía de la derecha o de la izquierda y la fuente retardada provenía de la línea media. En la otra condición de precedencia - discriminación de la retardada, ocurría lo opuesto, o sea que la fuente retardada provenía de la derecha o de la izquierda mientras que la fuente líder provenía de la línea media.

Los resultados obtenidos en este estudio mostraron que en la condición control, los umbrales de MAA fueron de 0.78º para adultos, 1.55º para niños de 5 años y 5.65º para los bebés de 18 meses. Para la condición de discriminación del líder se obtuvieron 1.15º, 4.4º y 23.05º, respectivamente. Para la condición de discriminación del sonido retardado los valores de MAA alcanzaron los 1.71º, 27.5º y 64.58º. Como puede observarse, en todas las edades fue más fácil localizar sonidos directos que reflejados. La condición de discriminación del líder fue más difícil que la de una sola fuente, sugiriendo que la presencia del sonido retardado en la línea media afecta la localización. A su vez, la condición de discriminación de la retardada fue más difícil que la condición líder. Es decir, los cambios de posición angular del sonido retardado fueron más difíciles de percibir que los cambios en el sonido líder. Respecto a la edad, en las tres condiciones experimentales los infantes de 18 meses presentaron un rendimiento significativamente más bajo que los niños de 5 años y los adultos. Bajo condición de discriminación de la retardada se observó que las diferencias en función de la edad fueron más notorias en detrimento de los niños de menor edad (Litovsky, 1997).

Por otra parte, Morrongiello, Kulig y Clifton (1984) realizaron un estudio de fusión con adultos, niños de 5 años y bebés de 6 meses de edad. Para ello ubicaron dos parlantes a 90º, uno a la izquierda y otro a la derecha del participante. En el caso de los adultos y los niños emplearon dos tipos de estímulos configurados bajo efecto precedente, *clics* y el sonido de un sonajero grabado. El umbral del eco se determinó variando el tiempo de retardo entre el sonido líder y retardado en un rango entre 2 ms y 24 ms para los *clics* y entre 25 ms y 50 ms en el caso del sonido del sonajero. La tarea consistía en informar de manera verbal la dirección de la cual provenían los sonidos en cada caso. En el caso de los bebés se utilizó un procedimiento de condicionamiento del giro de cabeza. Para ello emplearon sonidos tipo *clic* con un retardo variable entre sonido líder y retardado en un rango de 12 ms a 42 ms.

Los resultados mostraron diferencias en función de la edad para los estímulos tipo clic: los infantes de 6 meses obtuvieron un umbral promedio de 25 ms, valor que fue aproximadamente el doble con referencia al obtenido por los niños de 5 años (12 ms) siendo similar al de los adultos. Cuando se utilizaron sonidos naturales como el del sonajero, el umbral de los niños de 5 años alcanzó los 30 ms, mientras que el de los adultos fue un poco más bajo de 25 ms.

En un estudio posterior, Litovsky, Godar y Yu (2004) analizaron la relación entre dominancia y fusión en niños de 4 a 5 años de edad. Los autores se preguntaron por la respuesta de los niños para retardos mayores al umbral del eco, es decir, la dominancia del líder cuando se escuchan dos sonidos separados. Para ello se colocó a cada participante frente a un semicírculo conteniendo 7 parlantes ubicados en el plano horizontal. Los estímulos sonoros fueron *bursts* de ruido con un retardo variable entre sonido líder y retardado de 5 ms a 100 ms. Los niños resolvieron una tarea de fusión (debían señalar verbalmente si escuchaban uno o dos sonidos) y otra de localización (debían señalar de qué lugar provenían los sonidos). Los resultados mostraron que el umbral del eco varió entre 15 ms a 35 ms. Por debajo del umbral del eco, los niños localizaban los estímulos en la posición del sonido líder. Por encima del umbral, el rendimiento en la localización del sonido retardado fue pobre, indicando que a esta edad la dominancia del líder persiste aún para retardos que están por encima del umbral del eco, aún para retardos de hasta 100 ms. Es decir, el sonido líder, que como se recordará es el que tiene mayor significación vital, sigue dominando

la posición percibida a pesar de que se escuchan dos sonidos separados.

Finalmente, un estudio realizado con niños con alguna patología sensorial o neurológica indica que la percepción de sonidos reflejados puede afectarse bajo numerosas circunstancias. Hochster y Kelly (1981) evaluaron a niños de 6 a 16 años en una tarea de localización de sonidos configurados bajo efecto precedente. Analizaron el rendimiento de tres grupos: a) niños con audición normal, b) niños con epilepsia del lóbulo temporal sin otra patología asociada, c) niños con pérdida auditiva de un sólo oído. Los estímulos consistieron en trenes de *clics* con un retardo variable entre líder y retardado de 1, 4, 8 y 16 ms. Los autores encontraron que los niños con discapacidad auditiva presentaron un rendimiento inferior al de los de audición normal tanto para la condición control como para la de precedencia. Los niños con epilepsia pudieron localizar sonidos directos pero no los configurados bajo efecto precedente. Cabe destacar que el lóbulo temporal es una porción de la corteza cerebral que desempeña un papel importante en la recepción y procesamiento de la información auditiva. Estos resultados indican que esta estructura cortical estaría involucrada en el procesamiento de los sonidos bajo condición de precedencia.

Discusión

La investigación sistemática sobre el desarrollo de la habilidad para localizar fuentes sonoras comenzó recién en la década del 80. La evidencia experimental obtenida ha permitido establecer que a pocos minutos de nacer el bebé es capaz de orientar su cabeza hacia los sonidos. La respuesta a esta edad es lenta, poco precisa y no está acompañada por búsqueda visual. Si bien se asemeja a un patrón motor innato relativamente fijo, existe evidencia de que los neonatos tienen cierta capacidad para modificar la respuesta de giro cuando cambia la posición de la fuente sonora.

Durante los primeros meses de vida la respuesta de giro de cabeza sigue una función en forma de U: aparece en el nacimiento, casi desaparece como respuesta confiable y válida, entre el primer y segundo mes, posteriormente reaparece para incrementarse hacia los 3 ó 4 meses de edad. A los 4 ó 5 meses la respuesta de orientación de la cabeza es rápida, mucho más precisa y está acompañada de búsqueda visual. A esta edad, la sensibilidad a las diferencias binaurales está bien desarrollada y los estudios realizados con la técnica del MAA indican que los infantes de 6 meses tienen habilidad para percibir ciertos cambios angulares en la posición de fuentes sonoras en el plano horizontal y vertical. Entre los 6 y 18 meses esta habilidad mejora significativamente. Litovsky (1997) indica que después de los 18 meses el rendimiento en pruebas de localización de sonidos directos en el plano horizontal continúa mejorando y a los 5 años los niños obtienen umbrales similares a los de los adultos.

En cuanto a la percepción de distancia, los estudios aún muy incipientes, indican que a los 5 ó 6 meses los infantes tienen capacidad para discriminar cambios en la distancia a la que se encuentra un objeto sonoro. Aunque no se conoce el peso relativo de las claves involucradas, hay evidencia de que los bebés no son engañados, como los adultos, cuando se manipulan inconsistentemente las claves binaurales de intensidad en relación a la distancia (sonidos de mayor intensidad suenan como provenientes de fuentes más lejanas, en lugar de la asociación que se produce entre sonidos más débiles y fuentes sonoras lejanas y viceversa).

En relación a la localización de sonidos reflejados, la evidencia experimental indica que las primeras respuestas a estímulos configurados bajo condición de efecto precedente se observan cerca de los 4 y 5 meses, poco después de la reaparición de la respuesta de giro de cabeza hacia sonidos directos. Esta habilidad mejora con la edad: a los 18 meses el rendimiento es inferior en comparación con el de los niños de 5 años y a su vez, éste aún no alcanza el nivel de rendimiento del adulto, lo que sugiere que esta habilidad continúa mejorando aún después de dicha edad. Tanto a los niños pequeños, como a los adultos, les resulta más difícil percibir cambios angulares en la posición del sonido retardado que en la posición del líder, posiblemente debido al fuerte pesaje otorgado al sonido directo que reduce la influencia de la información direccional de los sonidos retardados.

¿Cuáles son los factores que explicarían este mejoramiento observado durante los primeros meses de vida? Se han agrupado las principales hipótesis que intentan

dar respuesta a este interrogante en las siguientes tres categorías: relativas a la maduración del sistema auditivo, senso-perceptuales y vinculadas al aprendizaje y la memoria.

Hipótesis relativas a la maduración del sistema auditivo

Hacen referencia a la importancia de los cambios madurativos que ocurren en las estructuras auditivas centrales durante los primeros meses de vida. Estudios realizados con animales muestran que la discriminación de la dirección izquierda o derecha de la que proviene un sonido, se produce a nivel subcortical mientras que la determinación de la posición de una fuente sonora en el espacio se produce a nivel cortical (Heffner, 1978; Thompson & Masterton, 1978). En el nacimiento, las estructuras encargadas de codificar las claves binaurales involucradas en la percepción de la dirección del sonido, situadas en el complejo olivar superior, están más maduras que las estructuras auditivas centrales (Hecox, 1975), que continúan madurando hasta los 12 años de edad (Moore & Guan, 2001). Cabe destacar además que la mielinización del nervio auditivo y el tallo cerebral se completa a los 6 meses mientras que la de las conexiones entre tallo y corteza continúa hasta los 5 años (Boothroyd, 1997).

Por otro lado, la evidencia indica que hacia los 3 ó 4 meses de edad la regulación de la respuesta de localización sonora pasa de un nivel subcortical a estar regulada por la corteza auditiva (Clifton *et al.*, 1984; Field *et al.*, 1980; Muir *et al.*, 1979; Muir *et al.*, 1989).

En relación con la localización de sonidos configurados bajo condición de efecto precedente, la principal hipótesis explicativa que se postula, también atribuye un rol central a la maduración de las estructuras auditivas corticales. Estudios realizados con animales aportan evidencia a favor de esta hipótesis. Ashmead, Clifton y Reese (1986) realizaron una investigación longitudinal con perros de 4 a 39 días de edad a los que les presentaron a través de parlantes, sonidos grabados de ladridos de perros adultos y cachorros configurados bajo efecto precedente. Los resultados mostraron que los cachorros localizaron sonidos directos a los 16 días pero no pudieron localizar consistentemente estímulos de precedencia en el período de edad evaluado. Los autores atribuyeron este resultado a la maduración de la corteza auditiva que ocurre durante las primeras semanas de vida de los cachorros.

En humanos el estudio de Hochster y Kelly (1981) realizado con niños con epilepsia en el lóbulo temporal, indica que un trastorno en el funcionamiento de esta zona de la corteza afecta la localización de sonidos bajo condición de precedencia pero no influye en la localización de sonidos directos. Por su parte, Burnham *et al.* (1993) mostraron que el rendimiento de niños prematuros de 10 meses de edad cronólogica y 7 meses de edad corregida, es similar al que obtiene el grupo de niños a término apareados según edad corregida. También estos autores postulan que la maduración de la corteza auditiva es la causa de la aparición de la habilidad para percibir sonidos bajo precedencia.

Aunque la maduración de la corteza auditiva es una condición necesaria para que comience a operar el efecto precedente cabe preguntarse qué otros factores siguen incidiendo en la mejora que se observa en el rendimiento durante los primeros años de vida. Estudios realizados con adultos indican que el entrenamiento favorece el rendimiento en pruebas de lateralización con estímulos configurados bajo efecto precedente (Arias, 2008; Saberi & Antonio, 2003; Saberi & Perrott, 1990). No se han encontrado estudios realizados en niños sobre el efecto del aprendizaje en la localización de este tipo de estímulos.

Hipótesis senso-perceptuales

En los bebés, la distancia anatómica entre ambos oídos es pequeña y aumenta progresivamente con el rápido crecimiento de la cabeza. Consecuentemente, también cambian las claves binaurales, ya que dependen tanto de la posición de la fuente sonora como de la distancia anatómica mencionada, lo que haría más difícil la localización auditiva para los niños pequeños.

Estudios realizados con animales han comenzado a aportar evidencia sobre la importancia del crecimiento de la cabeza y del pabellón auditivo en la audición espacial (Campbell *et al.*, 2008; Tollin, 2004). Si bien este aspecto ha sido muy poco estudiado en humanos, Ashmead *et al.* (1987) postulan que es poco probable que los aspectos sensoriales sean los de mayor peso en la explicación del mejoramiento en el rendimiento que se observa con la edad.

Hipótesis relacionadas al aprendizaje y la memoria

Este conjunto de hipótesis sostiene que el progreso observado podría reflejar un proceso de aprendizaje durante el cual claves específicas se asocian a determinadas posiciones de fuentes sonoras en el espacio. Las mejoras observadas con la edad se deberían a un proceso continuo de integración, calibración y recalibración multimodal entre la experiencia auditiva, visual, táctil y propioceptiva (Ashmead *et al*., 1991; Clifton *et al*., 1988; Morrongielo & Gotowiec, 1990). En esta dirección, Aytekin, Moss y Simon (2008) proponen que la experiencia de las consecuencias sensoriales de las propias conductas motoras es crucial para aprender a localizar fuentes sonoras.

Otro aspecto que ha sido escasamente estudiado en infantes es el rol de la memoria en la localización auditiva. En situaciones cotidianas, las respuestas de orientación hacia sonidos breves ocurren cuando los estímulos auditivos ya no están presentes. Bajo estas condiciones se requiere que las claves auditivas relevantes se almacenen en la memoria a corto plazo, llamada memoria de trabajo, que es un sistema de almacenamiento temporal en el cerebro que mantiene información disponible para guiar el comportamiento. Estudios recientes realizados con adultos han comenzado a aportar evidencia sobre su importancia en la localización auditiva (Arnott, Grady, Hevenor, Graham & Alain, 2005; Grady, Yu & Alain, 2008; Lewald & Ehrenstein, 2001) especialmente en tareas más difíciles, por ejemplo cuando se debe discriminar dos sonidos muy próximos (Merat & Groeger, 2003).

En síntesis, la evidencia obtenida hasta el momento sugiere que el desarrollo de la localización auditiva -que implica una compleja interacción del niño con el ambiente- es el resultado de la interrelación entre aspectos fisiológicos, motores, sensoriales y percepto-cognitivos.

Algunos de los interrogantes aún no resueltos en este fértil campo del conocimiento son: ¿Cuál es el peso relativo de los distintos factores que inciden en el mejoramiento observado en la localización auditiva durante los primeros años de vida?, ¿Cuál es el mecanismo que permite integrar las distintas claves motoras y sensoriales y los aspectos cognitivos para lograr la percepción de la posición de un objeto sonoro en el espacio?, ¿Qué aspectos cognitivos están implicados en la respuesta de los niños pequeños ante los sonidos reflejados?

Las aproximaciones ecológicas en el estudio de la audición, que aportan nuevos diseños y herramientas metodológicas, consideran a la percepción, acción y cognición como una unidad y llaman la atención sobre los procesos de exploración activa e intermodal directamente relacionados con las fuentes de estimulación del ambiente.

Referencias

ANSI (1999). *Acoustical terminology*. New York, EE.UU.: American National Standard Institute.

Arias, C. (2008). *Ecolocación humana y efecto precedente*. Tesis doctoral no publicada, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

Arias, C. & Ramos, O. (2003). Audición espacial en ambientes reverberantes: aspectos teóricos relevantes. *Revista Interamericana de Psicologia/ Interamerican Journal of Psychology, 37*(2), 373-382.

Arnott, S. R., Grady, C. L., Hevenor, S. J., Graham, S. & Alain, C. (2005). The functional organization of auditory working memory as revealed by fMRI. *Journal of Cognitive Neuroscience, 17*(5), 819-831.

Ashmead, D. H., Clifton, R. K. & Perris, E. E. (1987). Precision in auditory localization in human infants. *Developmental Psychology, 23*, 641-647.

Ashmead, D. H., Clifton, R. K. & Reese, E. P. (1986). Development of auditory localization in dogs: Single source and *precedence* effect sounds. *Developmental Psychobiology, 19*, 91–103.

Ashmead, D. H., Davis, D. L., Whalen, T. & Odom, R. D. (1991). Sound localization and sensitivity to interaural time differences in human infants. *Child Development*, *62*(6), 1211-1226.

Ashmead, D. H., Grantham, D. W., Murphy, W. & Tharpe, A. M. (1993). Human infants' sensitivity to interaural level differences. *Journal of the Acoustical Society of America*, *93*, 2360 (A).

Aytekin, M., Moss, C. F. & Simon, J. Z. (2008). A sensorimotor approach to sound localization. *Neural Computation, 20*(3), 603-635.

Blauert, J. (1997). *Spatial hearing: The psychophysics of human sound localization* (Revised Edition). Cambridge, MA, EE.UU.: MIT Press.

Boothroyd, A. (1997). Auditory development of the hearing child. *Scandinavian Audiology*, *26*(46), 9-16.

Brazelton, T. (1973). *Neonatal Behavioral Assessment Scale*. London: Spastics International Medical Publications.

Bundy, R. (1980). Discrimination of sound localization cues in young infants. *Child Development*, *51*(1), 292-294.

Burnham, D., Taplin, J., Henderson-Smarta, D., Earnshaw-Brown, L. & O'Grady, B. (1993). Maturation of precedence-effect thresholds: Full-term and preterm infants. *Infant Behavior and Development, 16*(2), 213-232.

Butterworth, G. & Castillo, M., (1976). Coordination of auditory and visual space in newborn human infants. *Perception, 5*(2), 155-160.

Campbell, R. A., King, A. J., Nodal, F. R., Schnupp, J. W., Carlile, S. & Doubell, T. P. (2008). Virtual adult ears reveal the roles of acoustical factors and experience in auditory space map development. *The Journal of Neuroscience, 5, 28*(45), 11557-11570.

Clarkson, M. G., Clifton, R. K. & Morrongiello, B. (1985). The effects of sound duration on newborns' head orientation. *Journal of Experimental Child Psychology, 39*(1), 20-36.

Clarkson, M. G., Clifton, R. K., Swain, I. & Perris, E. E. (1989). Stimulus duration and repetition rate influence newborns' head orientation toward sound. *Developmental Psychobiology*, *22*, 683-705.

Clifton, R. K. (1987). Breakdown of echo suppression in the precedence effect. *Journal of the Acoustical Society of America, 8*(2), 1834-1835.

Clifton, R. K. (1992). The development of spatial hearing in human infants. En L. A. Werner and E. W Rubel (Eds.), *Developmental psychoacoustics* (pp. 135-157). Washington: American Psychological Association.

Clifton, R. K., Freyman, R. L., Litovsky, R. Y. & McCall, D. (1994) Listeners' expectations about echoes can raise or lower echo threshold. *Journal of the Acoustical Society of America*, *95*(3), 1525-1533.

Clifton, R. K., Gwiazda, J., Bauer, J., Clarkson, M. & Held, R. (1988). Growth in head size during infancy: implications for sound localization. *Developmental Psychology*, *24*(4), 477-483.

Clifton, R. K., Morrongiello, B. & Dowd, J. (1984). A developmental look at an auditory illusion: the precedence effect. *Developmental Psychobiology, 17*(5), 519-536.

Clifton, R. K., Morrongiello, B., Kulig, J. & Dowd, J. (1981). Newborns' orientation toward sound: possible implications for cortical development. *Child Development*, *52*(3), 833-838.

Clifton, R. K., Perris, E. & Bullinger, A. (1991). Infants' Perception of Auditory Space. *Developmental Psychology, 27*(2), 187-197.

Field, J., Muir, D., Pilon, R., Sinclair, M. & Dodwell, P. (1980). Infants' orientation to lateral sounds from birth to three months. *Child Development*, *51*, 295-298.

Freyman, R. L., Clifton, R. K. & Litovsky, R. (1991). Dynamic processes in the precedence effect. *Journal of the Acoustical Society of America, 90*(2 Pt. 1), 874-884.

Freyman, R. L. & Keen, R. (2006) Constructing and disrupting listeners' models of auditory space. *Journal of Acoustical Society of America, 120*(6), 3957-3965.

Grady, C. L., Yu, H. & Alain, C. (2008). Age-related differences in brain activity underlying working memory for spatial and nonspatial auditory information. *Cerebral Cortex, 18*(1), 189-199.

Grantham, W. D. (1995). Spatial hearing and related phenomena. En B. C. J. Moore (Ed), *Hearing*. San Diego, CA: Academic Press.

Graven, S. N. & Browne, J. V. (2008). Auditory Development in the Fetus and Infant. *Newborn and Infant Nursing Reviews, 8*(4), 187-193.

Hecox, K. (1975). Electrophysiological correlates of human auditory development. En L. Cohen & P. Salapatek (Eds.), *Infant perception: form sensation to cognition Vol. 2,* 151-191. New York, EE.UU.: Academic Press.

Heffner, H. (1978). Effect of auditory cortex ablation on localization and discrimination of brief sounds. *Journal of Neurophysiology, 41*, 963-976.

Hochster, M. & Kelly, B. (1981). The precedence effect and sound localization by children with temporal lobe epilepsy. *Neuropsychologia, 19*, 49-55.

Lewald, J. & Ehrenstein, W. H. (2001). Spatial coordinates of human auditory working memory. *Cognitive Brain Research, 12*, 153-159.

Litovsky, R. Y. (1997). Developmental changes in the precedence effect: estimates of minimum audible angle. *Journal of the Acoustical Society of America*, *102*(3), 1739-1745.

Litovsky, R. Y. & Clifton, R. (1992). Use of sound-pressure level in auditory distance discrimination by 6 month old infant and adults. *Journal of the Acoustical Society of America*, *92*(2), 794-802.

Litovsky, R. Y., Colburn, H., Yost, W. & Guzman, S. (1999). The precedence effect. *Journal of the Acoustical Society of America*, *106*(4), 1633-1654.

Litovsky, R. Y., Godar, S. & Yu, G. (2004). Localization suppression and fusion measure of the precedence effect in young children. *Journal of the Acoustical Society of America*, *115*(5), 2535.

Litovsky, R. Y. & Macmillan, N. A. (1994) Sound localization precision under conditions of the precedence effect: Effects of azimuth and standard stimuli. *Journal of the Acoustical Society of America*, *96*(2), 752-758.

Litovsky, R. Y. & Shinn-Cunningham B. G. (2001) Investigation of the relationship among three common measures of precedence: Fusion, localization dominance, and discrimination suppression. *Journal of the Acoustical Society of America, 109*(1), 346-358.

McGurk, H., Turnure, C. & Creighton, S. (1977). Auditory-visual coordination in neonates. *Child Development*, *48*, 138-143.

Mendelson, M. & Haith, M. (1976). The relation between audition and vision in the human newborn. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, *41*, 167.

Merat, N. & Groeger, J. A. (2003). Working memory and auditory localization: demand for central resources impairs performance. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 56*(3), 531-549.

Mershon, D. H. & King, L. E. (1975). Intensity and reverberation as factors in the auditory perception of egocentric distance. *Perception & Psychophysics. 18*, 409-415.

Moore, B. C. J. (1995). *Hearing. Handbook of perception and cognition* (Second edition). San Diego, CA, EE.UU.: Academic Press.

Moore, J. K. & Guan, Y. L. (2001). Cytoarchitectural and axonal maturation in human auditory cortex. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology, 2,* 297-311.

Morrongiello, B. (1987). Infants' localization of sounds in the median sagittal plane: effects of signal frequency. *Journal of the Acoustical Society of America, 82*(3), 900-904.

Morrongiello, B. (1988). Infants' Localization of sounds along the horizontal axis: estimates of MAA. *Developmental Psychology, 24*, 8-13.

Morrongiello, B., Clifton, R. K. & Kulig, J. (1982). Newborn cardiac and behavioral orienting responses to sound under varying precedence effect conditions. *Infant behavior and development*, *5*, 249-259.

Morrongiello, B., Fenwick, K. & Chance, G. (1990). Sound localization acuity in very young infants: an observer-based testing procedure. *Developmental Psychology*, *26*(1), 75-84.

Morrongiello, B., Fenwick, K., Hillier, L. & Chance, G. (1994). Sound localization in newborn human infants. *Developmental Psychobiology*, *27*(8), 519-538.

Morrongielo, B. & Gotowiec, A. (1990). Recent advances in the behavioral study of infant audition: The development of sound localization skills. *Journal of Speech, Language, Pathology, and Audiology*, *14*, 51-63.

Morrongiello, B., Hewitt, K. & Gotowiec, A. (1991). Infants' discrimination of relative distance in the auditory modality: approaching versus receding sound sources. *Infant Behavior and Development, 14*, 187-208.

Morrongiello, B., Kulig, J. & Clifton, R. K. (1984). Developmental changes in auditory temporal perception. *Child Development*, *55*(2), 461-471.

Morrongiello, B. & Rocca, P. T. (1987a). Infants' localization of sounds in the horizontal plane: effects of auditory and visual cues. *Child Development*, *58*(4), 918-927.

Morrongiello, B. & Rocca, P. T. (1987b). Infants' localization of sounds in the median vertical plane: estimates

of minimum audible angle. *Child Development*, *43*(2), 181-193.

Morrongiello, B. & Rocca, P. T. (1990). Infants' localization of sounds within hemifields: Estimates of minimum audible angle. *Child Development, 61*(4), 1258-1270.

Muir, D. (1985). The development of infants' auditory spatial sensitivity. En S.E. Trehub & B.A. Schneider (Eds.), *Auditory Development in infancy* (pp. 51-83). New York, EE.UU.: Plenum.

Muir, D., Abraham, W., Forbes, B. & Harris, L. (1979). The ontogenesis of an Auditory localization response from birth to four months of age. *Canadian Journal of Psychology*, *33*(4), 320.

Muir, D., Clifton, R. K. & Clarkson, M. (1989). The development of a human auditory localization response: a U-Shaped function. *Canadian Journal of Psychology, 43* (2), 199-216.

Muir, D. & Field, J. (1979). Newborn infants orient to sounds. *Child Development*, *50*, 431-436.

Muir, D., Humphrey, D. & Humphrey, G. (1994). Patterns and space perception in young infants. *Spatial Vision, 8*, 141-165.

Munar, E., Roselló, J., Mas, C., Morente, P. & Quetgles, M. (2002). El desarrollo de la audición humana, *Psicothema*, *14*(2), 247-254.

Northern, J. & Downs, M. (1981). *La Audición en los niños*. Barcelona, España: Salvat Editores.

Perrott, D.R., Saberi, K; Brown, K. & Strybel, T. Z. (1990) *Auditory psychomotor coordination and visual search performance*. *Perceptions and Psychophysics, 48,* 214-226.

Saberi, K. & Antonio, J. V. (2003). Precedence-effect thresholds for a population of untrained listeners as a function of stimulus intensity and interclick interval. *Journal of the Acoustical Society of America*, *114*(1), 420-429.

Saberi, K. & Perrott, D. R. (1990). Lateralization thresholds obtained under conditions in which the precedence effect is assumed to operate. *Journal of the Acoustical Society of America*, *87*(4), 1732-1737.

Thompson, G. & Masterton, R. (1978). Brain stem auditory pathways involved in reflexive head orientation to sound. *Journal of neurophysiology*, *41*, 1183-1202.

Tollin, D. T. (2004). Development of the sound localization cues in cats. *Journal of the Acoustical Society of America, 115 (5),* 2535 (A).

Wertheimer, M. (1961). Psychomotor coordination of auditory and visual space at birth. *Science*, *134*, 1692.