

REVISIÓN DE LOS ASPECTOS MÁS RELEVANTES EN EL ESTUDIO DE LA PERCEPCIÓN AUDITIVA DE DISTANCIA

Esteban Ramón Calgagno¹

Ezequiel Lucas Abregu

Ramiro Oscar Vergara

Universidad Nacional de Quilmes, Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora, Argentina

Resumen

Un problema central en el estudio de la percepción auditiva es el de determinar las pistas utilizadas por el cerebro para ubicar fuentes sonoras. Los indicios relacionados con la percepción de la dirección del sonido (en acimut y elevación) han sido estudiados en profundidad durante el siglo pasado. Sin embargo, la percepción auditiva de distancia ha recibido menos atención por parte de los investigadores, convirtiéndose así en uno de los tópicos con mayor cantidad de interrogantes a analizar. El objetivo del presente trabajo es revisar los resultados reportados sobre este tema en la literatura desde principios de siglo XX hasta nuestros días.

Palabras Claves: Percepción auditiva, Localización espacial, Percepción de distancia

Review of the most important aspects in the study of auditory perception of distance

Abstract

A central problem in the study of auditory perception is to identify the cues used by the brain to determine the location of sound sources. The cues associated with auditory perception of sound sources angular location (in azimuth and elevation) has been extensively studied over the past century. However, the auditory perception of sound sources distance has received less attention from researchers, making it one of the topics with the largest number of questions to be analyzed. The aim of this paper is to review the results reported in the literature on auditory distance perception from the early twentieth century to the present day.

Keywords: Auditory perception, Spatial localization, Distance perception

¹ Correspondence about this article should be addressed to ramirovergara@lapso.org

Este trabajo ha sido financiado por ANPCYT (Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica), CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas) y Universidad Nacional de Quilmes. Agradecemos también al Dr. Oscar Pablo Di Liscia por sus correcciones.

Para percibir la ubicación de una fuente sonora nuestro cerebro debe reconocer tanto la dirección (en acimut y elevación) de la que proviene el sonido como la distancia a la que se encuentra la fuente que lo emite (figura 1). Para obtener esta información el cerebro debe utilizar diferentes pistas (o indicios). Los indicios relacionados con la percepción del ángulo de incidencia de los sonidos en acimut y elevación han sido extensamente estudiados. Sabemos por ejemplo que indicios binaurales, como el ITD (Interaural Time Difference) y el ILD (Interaural Level Difference), ayudan a percibir el ángulo de incidencia del sonido en el plano horizontal.

Por otro lado, indicios espectrales producidos por el filtrado que sufre el sonido al hacer contacto con diferentes partes del cuerpo (principalmente la cabeza, los hombros y la pinna), son utilizados para estimar el ángulo de incidencia del sonido en el plano vertical. Además, esta información es utilizada para distinguir si la fuente sonora se encuentra delante o detrás del

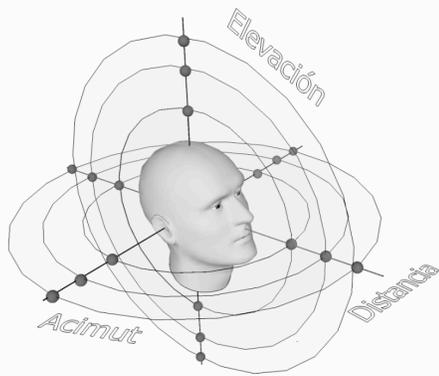


Figura 1: Representación esquemática de los tres ejes del espacio auditivo (acimut, elevación y distancia).

oyente (ver Middlebrooks & Green, 1991 y Arias & distancia a una fuente sonora es percibida con menor precisión y mayor variabilidad que el ángulo de incidencia del sonido (Zahorik et al, 2005). En general los humanos tienden a sobrestimar la distancia a la fuente cuando ésta se encuentra a menos de 2 metros, mientras que subestiman su distancia cuando se encuentra a distancias mayores (figura 2).

En la mayoría de los casos, la relación entre la distancia real a la fuente y la distancia percibida puede ajustarse mediante una función de potencia ($Y = aX^b$) con un exponente considerablemente menor que uno, lo que corresponde a una no linealidad compresiva entre la distancia física y la percibida (Zahorik et al, 2005).

Ramos, 2003, para revisar los indicios involucrados en la percepción de la procedencia angular de sonidos).

Resulta obvio que para determinar la ubicación precisa de una fuente en el espacio no basta con conocer el ángulo de incidencia del sonido sino también la distancia a la que esta se encuentra. Sin embargo, a diferencia de la percepción espacial en acimut y elevación, la Percepción Auditiva de Distancia (PAD) ha recibido menos atención por parte de los investigadores.

El estudio de la PAD se ha desarrollado mediante diferentes metodologías experimentales, en diferentes ambientes acústicos (tanto reales como virtuales) y utilizando estímulos de diversas características. Los experimentos realizados pueden dividirse, a grandes rasgos, en dos ramas: experimentos para obtener umbrales mínimos y experimentos para medir la precisión de un oyente al estimar la distancia a una fuente.

En general, para medir umbrales de PAD se han utilizado métodos de elección forzada de dos alternativas. Por otro lado, para medir la precisión con que un oyente percibe la distancia física real (distancia absoluta) de una fuente sonora, es necesario obtener curvas psicofísicas de PAD. Las curvas psicofísicas de PAD se realizan reproduciendo un estímulo desde diferentes distancias y obteniendo la distancia percibida por el oyente, generalmente mediante un informe verbal. Sin embargo, también existen experimentos donde solo se realiza una única presentación del estímulo con la fuente ubicada a una distancia determinada. Como veremos más adelante, este método, conocido como método de presentación única, se utiliza para diferenciar entre pistas absolutas y relativas de PAD (Mershon & Bowers, 1989).

En la mayoría de los estudios, la respuesta obtenida con cualquiera de estos métodos muestra que la

La PAD es un fenómeno complejo que involucra una gran cantidad de indicios diferentes (tanto acústicos como no acústicos). Una exhaustiva revisión de todos estos aspectos es fundamental para un entendimiento profundo de la PAD.

El objetivo de este trabajo entonces es revisar los resultados sobre PAD reportados en la literatura desde principios del siglo XX hasta nuestros días para generar un punto de partida a futuras investigaciones sobre el tema.

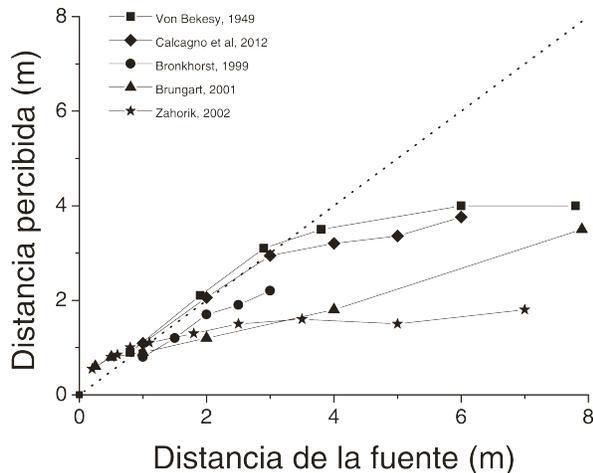


Figura 2: Resumen de curvas psicofísicas reportadas en diferentes artículos de PAD. Estos resultados fueron obtenidos mediante experimentos realizados en diferentes entornos acústicos (reales y virtuales) y con diferentes estímulos auditivos. Puede verse claramente como en distancias pequeñas la distancia a la fuente es sobrestimada mientras que en distancias mayores es fuertemente subestimada.

Indicios de Percepción Auditiva de Distancia

Cuando un sonido atraviesa un espacio sufre múltiples cambios en sus propiedades físicas antes de llegar a los oídos del oyente. Muchas de estas variaciones están relacionadas con la distancia entre el oyente y la fuente sonora. Sin embargo, como veremos más adelante, existen pistas que no tienen relación directa con los cambios que sufre la señal en su interacción con el medio y afectan de manera importante a la PAD.

Los indicios de PAD pueden dividirse entre relativos y absolutos. Los indicios relativos proporcionan información sobre la distancia a la fuente sonora mediante la comparación entre las distancias de dos o más fuentes. Estos indicios se estudian mediante procedimientos experimentales donde los estímulos son presentados de manera repetida desde diferentes distancias. Por el contrario, los indicios absolutos de distancia le brindan al oyente la información necesaria para percibir la distancia a la fuente sin necesidad de un estímulo de referencia. Los indicios absolutos de PAD se estudian mediante un método conocido como método de presentación única (Mershon & Bowers, 1989). Este método consiste en obtener la distancia aparente de la fuente en respuesta a un único estímulo auditivo proveniente de una distancia determinada. De este modo, el oyente no puede, como en el procedimiento de presentaciones repetidas, relacionar esta información con la de otros estímulos presentados previamente.

Entre el amplio espectro de factores que

influyen sobre la PAD podemos mencionar: la intensidad del sonido, los cambios en el espectro de frecuencias del estímulo, la relación de intensidades entre el sonido directo y el reverberante, indicios binaurales, la influencia de pistas visuales, el conocimiento previo del estímulo, etc.

A continuación explicaremos cada uno de estos indicios y revisaremos los resultados más relevantes publicados hasta la fecha en la literatura especializada.

Intensidad

La pista más obvia en PAD es la relación entre la intensidad del sonido que llega al oyente y la distancia a la fuente sonora. Cualquiera de nosotros puede notar que la intensidad de un sonido proveniente de una fuente fija disminuye a medida que nos alejamos de ella y viceversa. En ambientes anecoicos (sin reflexiones) la relación entre la distancia a la fuente y la intensidad con que el estímulo llega al oyente obedece a la ley del inverso del cuadrado de la distancia. Es decir, la intensidad de la señal disminuye 6dB cada vez que la distancia a la fuente se duplica y aumenta 6dB cuando la distancia a la fuente disminuye a la mitad (Gamble, 1909; Coleman 1963). Sin embargo, esta ley no puede aplicarse en ambientes reverberantes, ya que las reflexiones del sonido en las diferentes superficies de un recinto hacen que la pérdida de intensidad general del estímulo en función de la distancia sea menor (Bégault, 1991).

La simpleza de la relación entre la distancia a la fuente y la intensidad hacen de éste un indicio muy influyente en PAD. Sin embargo, es importante aclarar que, desde la perspectiva del oyente, esta pista puede ser ambigua, ya que variaciones en la potencia acústica de la fuente pueden ser confundidas con cambios en la distancia de la misma. De hecho, experimentos psicofísicos han demostrado que, cuando se manipula la intensidad de un estímulo auditivo reproducido desde una fuente fija, los oyentes tienen la sensación de que la distancia a la fuente cambia (von Békésy, 1949; Gardner, 1969).

Como mencionamos antes, la intensidad es un indicio relativo de PAD. Esto fue demostrado en un excelente artículo publicado por Mershon y King en 1975. Mershon y King utilizaron un método que consiste en obtener juicios de distancia en una cámara anecoica en respuesta a un único estímulo auditivo y por ende sin ninguna referencia previa. En estas condiciones no encontraron diferencias significativas en la distancia percibida por dos grupos de oyentes en respuesta a un mismo estímulo pero con intensidades diferentes (hasta 20 dB de diferencia). En un segundo experimento, los autores presentaron a cada grupo un estímulo proveniente de distancias diferentes (2,74 y 5,49 m). La respuesta de

ambos grupos tampoco fue significativamente diferente. Por último, Mershon y King encontraron que, si el mismo experimento era repetido en una sala reverberante, bastaba una sola presentación del estímulo para que la respuesta entre ambos grupos fuera significativamente diferente. Los autores concluyeron entonces que la intensidad es un indicio relativo de distancia mientras que factores relacionados con la reverberación pueden servir como indicios absolutos.

Debido al carácter relativo de la intensidad, los estudios interesados en estudiar el rol de este indicio en la PAD deben utilizar como mínimo dos presentaciones del estímulo para que el oyente pueda comparar entre ambas. Estudios pioneros en este tema han examinado la capacidad de los oyentes para discriminar cambios en la distancia aparente de la fuente en condiciones anecoicas, donde la intensidad es el principal indicio disponible. Gamble (1909) y Edwards (1955) reportaron que se necesita un cambio del 20% en la distancia real de la fuente para que un oyente sea capaz de percibirlo. Sin embargo, en trabajos posteriores se obtuvieron umbrales menores. Experimentos realizados por Simpson y Stanton (1973) y Strybel y Perrott (1984) reportaron umbrales de un 13 y 3 % respectivamente. Ambos trabajos muestran además que los umbrales de discriminación fueron mucho mayores cuando la fuente se encontraba a menos de 3 metros del oyente (48% y 20% respectivamente).

Además de estudiar la relación entre la intensidad del sonido y la distancia a la fuente se han realizado estudios específicos sobre la relación entre la sonoridad y la PAD. La sonoridad (del inglés "loudness") es una medida subjetiva de la intensidad con la que un sonido es percibido por un oyente. Stevens y Guirao (1962) demostraron que la sonoridad y la distancia aparente de la fuente están inversamente relacionadas en condiciones donde la intensidad es el principal indicio presente. Sus datos muestran que se requiere variar la intensidad de la señal en $\approx \pm 10$ dB para que el oyente reporte una disminución de la sonoridad a la mitad de su valor inicial o un aumento de la distancia del doble de su valor original. Resultados similares fueron obtenidos en un trabajo publicado por Warren en 1958. Warren reportó que fueron necesarios cambios de ± 6 dB para que los oyentes perciban variaciones en la distancia a la fuente del doble o la mitad (consistente con la ley de la inversa del cuadrado de la distancia).

Una forma más directa de estudiar el rol de la intensidad en la PAD es mediante la obtención de curvas psicofísicas. Casi sin excepción, los estudios que miden la eficacia de los oyentes para percibir la distancia a una fuente en ambientes anecoicos reportan una importante subestimación de la distancia

a la fuente cuando esta se encuentra a más de 2m (Simpson y Stanton, 1973). Sin embargo, como veremos luego, esta subestimación puede estar relacionada, entre otros factores, con el tipo de estímulo que se utiliza. Por ejemplo, Mershon y King (1975) y Coleman (1962) indican que esta fuerte subestimación puede ser revertida significativamente si los oyentes están familiarizados con el sonido que proviene de la fuente.

Espectro

Existen por lo menos dos fenómenos relacionados con cambios en la distancia de la fuente sonora que inducen cambios sistemáticos en el espectro de frecuencias de un sonido: el filtrado que sufre el sonido inducido por las propiedades de absorción del aire y el aumento relativo de las frecuencias bajas producidas en el campo cercano (efecto de proximidad).

Con respecto al efecto de la absorción del aire sobre el espectro de un sonido, Nyborg y Mintzer (1955) han reportado que el coeficiente de absorción para un tono de 10Khz es 20 veces mayor que para un tono de 1Khz. Es por esto que, en su viaje desde la fuente al oyente, un sonido de banda ancha pierde mayor cantidad de energía en la zona de frecuencias agudas del espectro. Es importante destacar que esta pérdida es moderada (entre 3 y 4dB por cada 100 metros a 4Khz – Ingard, 1953) y por ende puede ser percibida solamente para cambios en la distancia de la fuente relativamente grandes (>15 m según Blauert, 1997). Sin embargo, Coleman en 1968 demostró que la cantidad relativa de energía en la zona aguda del espectro puede afectar la PAD aun en distancias menores. Coleman midió la distancia aparente a una fuente en respuesta a estímulos a los que se les filtraron las frecuencias agudas (emulando el efecto del sonido atravesando grandes distancias) y comparó los resultados con los obtenidos en las mismas condiciones pero en respuesta a estímulos sin filtrar. Sus resultados muestran que los estímulos filtrados fueron percibidos a una distancia significativamente mayor que los estímulos sin filtrar; demostrando que la pérdida de energía en la zona aguda del espectro está asociada a un aumento en la distancia de la fuente sonora. Resultados similares fueron obtenidos por Little, et al en 1992. Estos autores observaron además que el nivel relativo de alta frecuencia de un sonido afecta la distancia aparente de la fuente solamente cuando los oyentes pudieron comparar entre varios estímulos con cualidades espectrales diferentes. De este modo, demostraron que, al igual que la intensidad, los cambios espectrales producidos por la absorción del aire funcionan como un indicio relativo de distancia.

Por otro lado, algunos estudios han indicado

que, cuando la fuente se encuentra a menos de 2 metros del oyente (campo cercano), el cambio espectral que sufre el sonido en relación a la distancia de la fuente es totalmente inverso al que se observa en campo lejano. Von Bekesy (1938) reportó que, en el campo cercano, el contenido de baja frecuencia de un estímulo de banda ancha aumenta cuando la distancia a la fuente sonora disminuye. Blauert (1997) sin embargo, indica que este efecto se da de forma muy tenue en el mejor de los casos y que por lo tanto no puede ser considerado como una pista influyente de PAD.

Como acabamos de ver, tanto los indicios espectrales producidos en el campo cercano como en el lejano ocurren en zonas acotadas del espectro de frecuencias. De este modo, para que estos indicios sean relevantes, es necesario que el sonido posea cierta complejidad espectral. Resultados obtenidos por Vergara et al (2010) en una sala semi-reverberante indican que las cualidades espectrales del sonido afectan de forma contundente la distancia aparente de una fuente sonora. Sus resultados muestran que es relativamente fácil estimar la distancia a la fuente cuando ésta emite un sonido espectralmente complejo (ruido blanco) mientras que es casi imposible hacerlo cuando emite tonos puros. Además los autores reportaron una correlación positiva entre el ancho de banda del estímulo y la precisión en los juicios de distancia. Por último, Vergara et al indicaron que el ancho de banda mínimo necesario para obtener juicios de distancia precisos fue menor en la zona de frecuencias agudas del espectro (en rangos de frecuencia superiores a los 4KHz).

Familiaridad con el Estímulo Auditivo

La precisión para estimar la distancia a una fuente sonora puede verse afectada notablemente si el oyente está familiarizado con el sonido que ésta emite. Uno de los sonidos más familiares para el ser humano es sin duda la voz hablada. Es por esto que la voz humana ha sido utilizada como modelo para estudiar el efecto de la familiaridad del estímulo auditivo sobre la PAD. En general, existe consenso en que la precisión de la PAD aumenta si el estímulo auditivo es familiar para el oyente.

Como vimos en el apartado de intensidad, en ambientes anecoicos los oyentes tienden a subestimar la distancia a la fuente cuando esta se encuentra a distancias mayores a 2 metros. Sin embargo, si el estímulo utilizado es una voz hablada esta subestimación es revertida significativamente (Von Békésy, 1949; Gardner, 1969). Es importante destacar que este aumento en la precisión no depende de la identidad de la persona que habla, ya que la precisión es similar cuando se compara la respuesta a

voces de personas conocidas por los oyentes con la respuesta a voces de personas desconocidas (Brungart y Scott, 2001).

Sin embargo, existen reportes que contradicen lo antedicho. Por ejemplo, en experimentos realizados en una sala reverberante por Nielsen (1991), no se encontraron diferencias significativas cuando se comparó la distancia aparente de la fuente en respuesta a voz humana grabada con la distancia aparente en respuesta a otros tipos de estímulos (ruido blanco, música grabada y grabaciones de guitarra). En el mismo orden de cosas, en un experimento realizado por Zahorik (1998) en una sala reverberante virtual, la distancia aparente de la fuente ante estímulos de voz hablada y ruido blanco no presentó diferencias significativas.

Tal vez, el hecho de que esos experimentos fueran realizados en ambientes reverberantes y que hayan utilizado un método de presentaciones repetidas, puede haber facilitado la precisión de los oyentes para percibir la distancia de los sonidos desconocidos disminuyendo así el efecto del conocimiento previo de la voz humana. Brungart y Scott (2001) sostienen además que en los experimentos de Nielsen y Zahorik no se tuvo en cuenta un importante atributo de la voz humana: el nivel de producción del discurso (la intensidad con que la persona habla). Varios autores han sugerido que la relación entre el nivel de presentación del estímulo y el nivel de producción puede funcionar como un indicio de PAD. Los sonidos del habla con bajos niveles de producción pero con niveles altos de presentación (ej, susurros que llegan con alta intensidad) indicarían transmisores cercanos, mientras que los sonidos del habla con altos niveles de producción pero con niveles de presentación bajos (ej, gritos que llegan con baja intensidad) indicarían que la persona que habla se encuentra a distancias lejanas. En 1991 Mershon y Philbeck pusieron a prueba esta hipótesis y obtuvieron resultados contundentes. Los autores midieron la distancia aparente a una fuente fija utilizando voces pregrabadas con el mismo nivel de presentación pero diferentes niveles de producción (susurro, voz normal y gritos). Sus resultados muestran que un susurro fue percibido a menos de la mitad de distancia que una voz normal mientras que un grito se percibió a una distancia tres veces mayor. Resultados similares fueron obtenidos en otros estudios tanto en ambientes reales (Traunmüller & Eriksson, 2000) como en entornos virtuales (Brungart & Scott, 2001).

Indicios Acústicos Binaurales

Además de ser crucial para la percepción del ángulo de incidencia del sonido en acimut, la información que el sistema auditivo obtiene de las

diferencias interaurales de tiempo (ITD) e intensidad (ILD), pueden servir como indicios de PAD cuando la fuente sonora se encuentra a distancias menores a un metro (Brungart, 1968; Simpson & Stanton, 1973). En este rango, los cambios de distancia a la fuente producen un aumento de ILD mayor que de ITD (Shinn-Cunningham, 2000; Brungart, 2001). En Zahorik et al (2005) se sugiere que los oyentes pueden usar esta combinación de ILD variable e ITD estático como un indicio de PAD. Esta hipótesis surge en relación a resultados obtenidos por Brungart et al en 1999. Los resultados obtenidos por Brungart indicaron que, en el campo cercano, los participantes son capaces de realizar estimaciones precisas de distancia utilizando solamente pistas binaurales cuando la fuente se presenta con un ángulo de incidencia de 90°.

Otro efecto que ha sido propuesto como una posible pista binaural de PAD es el paralaje acústico. Este efecto se produce cuando una fuente sonora se encuentra lo suficientemente cerca de la cabeza de un oyente como para producir diferencias substanciales entre los ángulos con que el sonido incide en cada oído. Esta forma de paralaje modifica el filtrado dependiente de la direccionalidad resultante de la difracción producida por los oídos, el torso y la cabeza (Ashmead et al, 1990; Blauert, 1997). Un estudio realizado por Otani & Hirahara (2009) estudió la relación entre el espectro obtenido de las HRTF (Head Related Transfer Function), calculadas mediante una simulación numérica, y la distancia a la fuente sonora (para distancias de la fuente < 3 metros). El análisis reportó que los espectros de las HRTF simuladas variaban marcadamente en respuesta a cambios en la distancia de la fuente sonora.

Además de los trabajos que estudian el efecto de las pistas binaurales a cortas distancias, existen algunos estudios que han reportado el efecto de estas pistas para distancias de la fuente mayores a un metro. Lokki et al (2011) sugieren que las reflexiones laterales afectan la PAD. Los autores reportaron que si los oyentes disponían de reflexiones laterales la fuente sonora era percibida a menor distancia que cuando solo disponían de reflexiones provenientes del plano medio.

Reverberación

En los ambientes reverberantes, existen múltiples superficies u objetos que hacen que la señal se refleje o rebote, produciendo copias del sonido emitido por la fuente. De este modo, en los ambientes con reflexiones el sonido llega al oyente a través de dos vías: la vía directa (o sonido directo) y la reverberante (o sonido reverberante). El sonido directo es el que llega al oyente desde la fuente sin

reflejarse en ninguna superficie. Por el contrario, el sonido reverberante llega al oyente después de reflejarse en, al menos, una superficie del recinto.

La reverberación es un importante indicio de PAD. Existe abundante evidencia que indica que la reverberación mejora notablemente la precisión de un oyente para percibir la distancia a una fuente sonora. Como vimos en el apartado de intensidad, en ambientes sin reflexiones, la PAD suele ser ineficaz (la distancia a la fuente es fuertemente subestimada). Sin embargo, se ha demostrado que esta subestimación disminuye significativamente en ambientes reverberantes (Mershon et al 1989). Numerosos trabajos han reportado que la distancia aparente a una fuente ubicada a una distancia determinada es mayor en ambientes reverberantes que la obtenida bajo las mismas condiciones en salas anecoicas (Nielsen, 1993; Békésy, 1938; Butler et al, 1980; Begault, 1992). En el mismo sentido, Bronkhorst & Houtgast (1999) demostraron, mediante experimentos psicofísicos en un entorno acústico virtual, que un incremento en el número de las reflexiones simuladas resulta en un aumento de la distancia aparente a la fuente.

Varios autores han sugerido que el aumento en la precisión de los juicios de distancia observado en ambientes reverberantes se debe al aporte de un importante indicio: la relación de energías que existe entre el sonido directo y el reverberante (relación D/R). En ambientes reverberantes, la intensidad del sonido directo disminuye 6dB cada vez que la distancia a la fuente se duplica, mientras que la energía del sonido reverberante permanece relativamente constante. La relación D/R es un indicio interesante ya que no depende de la intensidad de la señal y puede ser eficaz en cualquier entorno donde se produzcan reflexiones (incluso en campo abierto hay al menos una reflexión proveniente del suelo).

Múltiples trabajos indican que la relación D/R conforma una pista absoluta de PAD. Mershon y Bowers (1979) han reportado que, a diferencia de lo que ocurre en ambientes anecoicos, en ambientes reverberantes basta una sola presentación del estímulo para que los oyentes reporten la distancia de la fuente con bastante precisión. La importancia de la relación D/R fue estudiada por primera vez en un estudio realizado por Von Békésy (1938). Békésy demostró que un decrecimiento en la relación D/R resulta en un incremento en la distancia aparente de la fuente sonora. Mershon y King (1979) demostraron que el efecto de la relación D/R se da en un amplio rango de distancias entre la fuente sonora y los oyentes. La efectividad de este indicio fue probada también en ambientes acústicos virtuales (Butler et al, 1980; Begault, 1992). Desde hace años,

la relación D/R ha sido considerada uno de los indicios más influyentes en PAD. No obstante, este indicio tiene varias limitaciones. Zahorik (2002) reportó que el umbral de sensibilidad para la relación D/R resulta en valores de alrededor de 5-6 dB. Este umbral representaría un cambio en la distancia de más del 100%. Zahorik concluye entonces que la relación D/R no proporciona la información suficiente para percibir cambios finos en la distancia de la fuente sonora. Sin embargo, en un estudio reciente realizado por Larsen et al (2008), similar al publicado por Zahorik, se reportaron umbrales mucho menores (\approx 2-3 dB) para la relación D/R. Otra limitación de la relación D/R es que su valor depende fuertemente de las características acústicas del medio ambiente. Por ejemplo, una fuente cercana en una sala reverberante puede tener la misma relación D/R que una fuente distante en una habitación con menor reverberación. Sin embargo, existe suficiente evidencia en la literatura para considerar a la relación D/R como un importante indicio de PAD.

Visión

Para lograr una representación coherente del mundo exterior, nuestro sistema nervioso debe procesar información muy diversa procedente de sus diferentes modalidades sensoriales; principalmente a través de las modalidades visual y auditiva. Muy a menudo, las modalidades visual y auditiva transmiten información contradictoria y el estudio de cómo nuestro sistema nervioso resuelve esta discrepancia ha atraído mucha atención durante los últimos años (ver King, 2009). En estos casos, el cerebro tiende a resolver el conflicto a favor de la modalidad más precisa o más apropiada. Un ejemplo es el famoso "efecto ventrílocuo" donde la presencia de un estímulo visual atrae la localización angular de una fuente sonora (Radeau y Bertelson, 1974; Recanzone, 1998).

La mayoría de los trabajos que estudian la interacción entre la localización visual y auditiva se han enfocado en la localización angular en acimut. Sin embargo, un reducido número de estudios han reportado sesgos similares al producido por el efecto ventrílocuo en distancia. Un estudio pionero sobre el rol de la visión en la PAD fue publicado por Gardner en 1968. Gardner hizo estos experimentos en una sala anecoica en la que dispuso cinco parlantes ubicados en línea recta a diferentes distancias del participante. Los parlantes fueron ubicados al nivel de los ojos de los participantes, de modo que estos solamente podían ver el parlante más cercano durante el experimento. Los resultados de Gardner mostraron que, aunque el estímulo fue reproducido siempre desde el parlante más lejano, los oyentes reportaron, sin excepción, que el sonido provenía del primer

parlante, justamente el único que podían ver. De esta manera se demostró que la imagen del primer parlante producía un efecto de atracción, similar al efecto ventrílocuo, sobre la ubicación en distancia de la fuente que emitía el sonido. Gardner llamó a este fenómeno perceptivo "efecto de proximidad de la imagen" (Gardner, 1968). Resultados similares fueron obtenidos por Mershon et al (1980) donde se reporta que el efecto de proximidad de la imagen ocurre tanto en entornos anecoicos como en reverberantes y además que la distancia de la fuente sonora puede ser sobrestimada o subestimada dependiendo de la posición del objeto visual.

Con el propósito de reexaminar este fenómeno, Zahorik (2001) realizó experimentos en un ambiente semireverberante pero utilizando un dispositivo similar al de Gardner. Este experimento sugiere que el efecto de captura visual en distancia no es tan general como suponían los estudios anteriores. De hecho, sus resultados mostraron que la presencia de pistas visuales incrementó la precisión de los oyentes para percibir la distancia de la fuente sonora.

Resultados similares fueron obtenidos por Calcagno et al en 2012. En este trabajo los autores realizaron experimentos en una sala semireverberante en completa oscuridad pero en presencia y ausencia de pistas visuales mínimas. De este modo, los participantes no podían ver el parlante de prueba en ningún momento evitando así que el efecto de proximidad de imagen afecte la respuesta. Los resultados de este trabajo reforzaron la idea de que la información visual afecta la PAD. Los autores observaron que en ausencia de pistas visuales la distancia a la fuente era fuertemente subestimada cuando se encontraba a distancias mayores a 3 m. Sin embargo, cuando el experimento fue realizado en presencia de pistas visuales esta subestimación fue revertida. Como agregado, los resultados de Calcagno et al (2012) muestran que la información visual obtenida por los participantes durante el experimento puede ser guardada en su memoria para ser utilizada, minutos después, como referencia espacial en experimentos realizados sin pistas visuales. De hecho, obtuvieron una respuesta muy precisa en la oscuridad cuando se les permitió a los oyentes inspeccionar visualmente la sala de pruebas antes de realizar el experimento. Los autores concluyen que el rol de la visión en la PAD es la de brindarle al cerebro información confiable sobre las características espaciales (dimensiones) del lugar donde se producen los acontecimientos auditivos (en este caso, los cambios en la distancia de la fuente), con el fin de calibrar la información procedente de señales auditivas de PAD (en su mayoría relativas) para asignar un valor de distancia a la fuente de sonido dentro de este espacio.

Conclusiones

La PAD ha recibido relativamente poca atención por parte de los investigadores en comparación con otros aspectos de la percepción auditiva del espacio. En general se ha explicado este hecho por la diferencia en la complejidad y cantidad de los indicios involucrados en cada caso. La PAD involucra información proveniente de un gran número de indicios muy variables dependientes tanto del estímulo sonoro como de las características del ambiente donde este se desarrolla. También influyen en la PAD factores cognitivos de alto nivel como el conocimiento previo del estímulo o el conocimiento de las dimensiones del espacio donde se desarrolla el sonido.

Hemos visto que la mayoría de estas pistas necesitan algún tipo de referencia para ser efectivas. Por otro lado revisamos indicios que contienen información que nos permite estimar la distancia a una fuente sonora sin necesidad de compararlas con información previa. Este tipo de pistas, como por ejemplo la relación D/R, son conocidas como indicios absolutos de PAD. El cerebro utiliza, dependiendo de cada situación, la información proveniente de cada uno de estos indicios con el fin de estimar, lo más precisamente posible, la distancia a la que se encuentra la fuente de sonido. Sin embargo, muchos autores han reportado que, aun en presencia de múltiples pistas auditivas, la PAD dista de ser eficaz.

La gran mayoría de los estudios de PAD han reportado que la distancia a la fuente es fuertemente subestimada cuando se encuentra a más de 2 metros del oyente (Zahorik et al, 2005). La distancia donde comienza a producirse esta compresión se conoce comúnmente como horizonte auditivo (Bronkhorst & Houtgast, 1999; Zahorik, 2002). Se ha sugerido que el horizonte auditivo ocurre a distancias donde el campo acústico reverberante domina completamente el sonido directo. Sin embargo, los resultados obtenidos en los trabajos de Zahorik (2001) y Calcagno et al (2012) indican que la distancia donde ocurre el horizonte auditivo depende también de factores que no están relacionados con las características acústicas del ambiente. En Calcagno et al (2012) se propone que esta mejoría se debe a que las claves visuales le brindan al participante información sobre el tamaño del recinto donde se desarrolla el experimento. Los autores sugieren que esta información ayuda a calibrar la información auditiva de distancia (en su mayoría relativa) para otorgarle a la fuente sonora una ubicación dentro de un espacio determinado. Sugieren además que no solamente el sistema visual puede brindar este tipo de información ya que la reverberación también contiene indicios relacionados con el tamaño del

recinto y que por ende ayudan a calibrar las demás pistas para que la respuesta este asociada a un lugar específico.

Estos resultados abren un nuevo horizonte en el estudio de la PAD, debido a que la mayoría de los estudios en este tema se llevaron a cabo en la oscuridad y en ambientes desconocidos por los oyentes (en muchos casos, salas con tratamiento acústico). Quizás este cambio de paradigma dentro del estudio de la PAD pueda explicar el por qué de la subestimación histórica reportada por estudios anteriores.

El hecho de que no existan muchos grupos en el mundo que estudien la PAD hace que el avance sobre el tema no sea tan exhaustivo como en otros campos. Además, como mencionamos repetidas veces en este texto, muchos de los resultados en esta área son contradictorios y en muchos casos los experimentos están realizados en condiciones experimentales muy disímiles.

Por estas razones nosotros consideramos esta área como un campo fértil para futuras investigaciones las cuales permitirán comprender mejor los mecanismos involucrados en la PAD.

Referencias

- Arias, C & Ramos, OA (2003): Audición espacial en ambientes reverberantes: aspectos teóricos relevantes. *Interam. J. Psychol.* 37 (2), 373-382.
- Ashmead D. H., LeRoy D. & Odom R. D. (1990). Perception of the relative distances of nearby sound sources. *Perception & Psychophysics*, 47, 326-331.
- Begault, D. (1991). Preferred sound intensity increase for sensation of half distance. *Perceptual and Motor Skill*, 71, 1019-1029.
- Begault, D. R., (1992). Perceptual effects of synthetic reverberation on three-dimensional audio systems. *Journal of the Audio Engineering Society*, 40, 895-904
- Békésy, von G. (1938). Über die Entstehung der Entfernungsempfindung beim Hören (On the origin of the sensation of distance in hearing). *Akustische Zeitschrift*, 3, 21-31.
- Békésy, von G (1949) The moon illusion and similar auditory phenomena. *American Journal of Psychology*, 62, 540-552.
- Blauert J. (1997). *Spatial hearing (rev. ed.)*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Bronkhorst, A. W. & Houtgast, T. (1999). Auditory distance perception in rooms. *Nature*, 397, 517-520
- Brungart, D. S. (1999). Auditory localization of nearby sources. *Journal of Acoustical Society of America*, 106(6), 3589-602.

- Brungart, D. S. (1999). Auditory parallax effects in the hrtf for nearby sources. *Proceedings of the 1999 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, 171–174.
- Brungart, D. S. & Rabinowitz, W. M. (1999). Auditory localization of nearby sources I: Head-related transfer functions. *Journal of Acoustical Society of America*, 106, 1465–1479.
- Brungart, D. S. & Scott, K. R. (2001). The effects of production and presentation level on the auditory distance perception of speech. *Journal of Acoustical Society of America*, 110, 425–440.
- Butler, R. A., Levy, E. T. & Neff, W. D. (1980). Apparent distance of sounds recorded in echoic and anechoic chambers. *The Journal of Experimental Psychology*, 6, 745–750.
- Cabrera D., Azzali A., Capra A., Farina A., Martignon P. (2006). Perceived room size and source distance in five simulated concert auditoria. *12th International Congress on Sound and Vibration Lisbon, Portugal*.
- Calcagno E. R., Abregu E. L., Eguía M. C. & Vergara R. O. (2012). The Role of Vision in Auditory Distance Perception. *Perception*, volume 41(2) pages 175 – 192
- Coleman, P. D. (1962). Failure to localize the source distance of an unfamiliar sound. *Journal of Acoustical Society of America*, 34, 345–346.
- Coleman, P. D. (1963). An analysis of cues to auditory depth perception in free space. *Psychological Bulletin*, 60, 302–315.
- Coleman, P. D. (1968). Dual role of frequency spectrum in determination of auditory distance. *Journal of Acoustical Society of America*, 44, 631–634.
- Edwards, A. S. (1955). Accuracy of auditory depth perception. *The Journal of General Psychology*, 52, 327–329.
- Gamble, E. A. (1909). Intensity as a criterion in estimating the distance of sounds. *Psychological Review*, 16, 416–426.
- Gardner, M. B. (1968). Proximity image effect in sound localization. *Journal of Acoustical Society of America*, 43, 163.
- Gardner, M. B. (1969). Distance estimation of 0 degrees or apparent 0 degree-oriented speech signals in anechoic space. *Journal of Acoustical Society of America*, 45, 47–53.
- Ingard, U. (1953). A review of the influence of meteorological conditions on sound propagation. *Journal of Acoustical Society of America*, 25, 405–411.
- Jesteadt, W., Luce, R.D., y Green, D.M. (1977). Sequential effects in judgments of loudness. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 3, 92–104.
- King, A. J. (2009). Visual influences on auditory spatial learning. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 364, 331–339.
- Lienard, J. S. & Benedetto, M. G. D. (1999). Effect of vocal effort on spectral properties of vowels. *Journal of Acoustical Society of America*. 106, 411–422.
- Little, A. D., Mershon, D. H. & Cox P. H. (1992). Spectral content as a cue to perceived auditory distance. *Perception*, 21, 405–416.
- Lokki, T. & Pätynen J. (2011). Lateral reflections are favorable in concert halls due to binaural loudness. *Journal of Acoustical Society of America*, 130 (5), EL345-EL351.
- Lokki, T., Pätynen J., Tervo, S., Siltanen, S. & Savioja, L. (2011). Engaging concert hall acoustics is made up of temporal envelope preserving reflections. *Journal of Acoustical Society of America*, 129, EL223–EL228.
- Mershon, D. H. & King, L. (1975). Intensity and reverberation as factors in the auditory perception of egocentric distance. *Perception & Psychophysics*, 18, 409–415.
- Mershon D. H. & Bowers J. N. (1979). Absolute and relative cues for the auditory perception of egocentric distance, *Perception*, 8, 311–322.
- Mershon D. H., Ballenger W. L., Little A. D., McMurtry P. L. & Buchanan, J. L. (1989). Effects of room reflectance and background noise on perceived auditory distance. *Perception*, 18, 403–416.
- Mershon D H, Desaulniers D H, Amerson T L, Kiefer S A (1980). Visual capture in auditory distance perception: proximity image effect reconsidered. *Journal of Auditory Research*, 20, 129–136.
- Middlebrooks J. C. & Green D. M. (1991). Sound Localization by Human Listeners. *Annual Review of Psychology*, 42, 135–159.
- Nielsen, S. H. (1993). Auditory distance perception in different rooms. *Journal of the Audio Engineering Society*, 41, 755–770.
- Nyborg, W., Mintzer, D. (1955). *Review of sound propagation in the lower atmosphere*. U.S. Air Force WADA Tech. Rept 54–60.
- Otani, M., Hirahara T. (2009). Numerical study on source-distance dependency of head-related transfer functions. *Journal of Acoustical Society of America*, 125 (5), 3253–3261.
- Radeau M., Bertelson P. (1974). The after-effects of ventriloquism. *Quarterly Journal of*

- Experimental Psychology*, 26, 63-71.
- Recanzone, G. H., (1998). Rapidly induced auditory plasticity: the ventriloquism aftereffect. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 95, 869-875
- Sheeline C. W. (1984). An investigation of the effects of direct and reverberant signal interaction on auditory distance perception. *Ph.D. Dissertation Department of Hearing and Speech Sciences, Stanford University*.
- Simpson, W. E. & Stanton, L. D. (1973). Head movement does not facilitate perception of the distance of a source of sound. *American Journal of Psychology*, 86, 151-159.
- Stein, B. E., Meredith, M. A., Huneycutt, W. S. & McDade, L. (1989). Behavioral indices of multisensory integration: orientation to visual cues is affected by auditory stimuli. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1, 12-24.
- Stevens, S. S. & Guirao, M. (1962). Loudness, reciprocity and partition scales. *Journal of Acoustical Society of America*. 34, 1466-1471.
- Strybel, T. Z. & Perrott, D. R. (1984). Discrimination of relative distance in the auditory modality: The success and failure of the loudness discrimination hypothesis. *Journal of Acoustical Society of America*, 76, 318-320.
- Traunmüller, H., & Eriksson, A. (2000). Acoustic effects of variation in vocal effort by men, women, and children. *Journal of Acoustical Society of America*, 107, 3438-3451.
- Vergara, R. O., Calcagno E. & Eguía M. C. (2010). The role of spectral cues and minimum bandwidth in the auditory perception of distance". *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(4), 2455
- Von Békésy, G. (1949). The structure of the middle ear and the hearing of one's own voice by bone conduction. *Journal of Acoustical Society of America*. 21, 217-232.
- Warren, R. M. (1958). A basis for judgments of sensory intensity. *American Journal of Psychology*, 71, 675-687.
- Wenzel, E. M., Arruda, M., Kistler, D. J. & Wightman, F. L. (1993). Localization using nonindividualized head-related transfer functions. *Journal of Acoustical Society of America*, 94, 111-123.
- Zahorik, P. (1998). Experiments in Auditory Distance Perception. *Ph.D. thesis, University of Wisconsin—Madison*.
- Zahorik, P. (2001). Estimating sound source distance with and without vision. *Optometry & Vision Science*, 78, 270-275.
- Shelton B. R., Searle C .L., (1980). The influence of vision on the absolute identification of sound-source position. *Perception & Psychophysics* ,28, 589-596.
- Shinn-Cunningham B. G. (2000). Learning reverberation: Considerations for spatial auditory displays. *In Proceedings of the 2000 International Conference on Auditory Displays Atlanta*.
- Zahorik, P. (2002). Assessing auditory distance perception using virtual acoustics. *Journal of Acoustical Society of America*, 111, 1832-1846.
- Zahorik, P. (2002). Auditory display of sound source distance. *Proceedings of the 8th International Conference on Auditory*. Kyoto, Japan, 239-243.
- Zahorik P., Brungart D. S. & Bronkhorst A. W. (2005). Auditory Distance Perception in Humans: A Summary of Past and Present Research. *Acta Acustica united with Acustica*, 91, 409-420.

Received: 25/07/2012
Accepted: 17/11/2014