

La distancia como dimensión estructural en la música

**Ezequiel Lucas Abregú,
Esteban Ramón Calcagno
Ramiro Vergara**

Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora (LAPSo),
Universidad Nacional de Quilmes

La distancia como dimensión estructural en la música

El presente trabajo trata sobre el manejo del espacio sonoro en la música. Específicamente es revisado el plano auditivo de distancia y su relación con la composición musical tanto instrumental como electroacústica. En primera instancia se presenta una breve revisión de los avances científicos relacionados con los indicios involucrados en la percepción auditiva de distancia. En segundo lugar realizamos una revisión de algunas estrategias utilizadas por compositores para simular la ubicación de fuentes sonoras en el plano de distancia tanto en ambientes reales como virtuales. Por último desarrollamos conceptos sobre la creación del espacio sonoro a través de múltiples capas sonoras como también mediante la utilización de fuentes fijas de referencia.

Palabras clave: distancia; percepción; profundidad; perspectiva; espacialización

Distance as Structural Dimension in Music

This paper deals with the treatment of soundscapes in music. Specifically the plan is to review the auditory perception of distance and its relation to the composition, both in instrumental and electroacoustic music. Firstly, a brief review of scientific evidence related —to involved in auditory— perception of distance. Secondly we review some strategies used by composers to simulate the location of sound sources in terms of distance, in real and virtual environments. Finally we develop concepts about sound production through multiple layers of emitting sound source as well as through the use of stationary sources of reference

Keywords: distance; perception; depth; perspective; spatialization

Introducción

La espacialidad en la música representa una variable compositiva que cuenta con una larga historia. Aunque las técnicas compositivas referidas al manejo estructurado del espacio sonoro data de varios siglos de desarrollo, la utilización sistemática de las dimensiones espaciales en la música se inicia a principios del siglo XX, donde varios compositores han utilizado el espacio sonoro como un factor estructural clave de su discurso musical. Obras como *Universe Symphony* (1911-51) de Charles Ives, *Déserts* (1954) y *Poème électronique* (1958) de Edgard Varese, *Gruppen* (1955-57) de Karlhein Stockhausen y *Persephassa* (1956-66) de Iannis Xenakis utilizan la concepción del espacio como una dimensión independiente y estructural, la cual se encuentra interrelacionada con el timbre, la dinámica, la duración y la altura. En particular, es importante destacar que en varias de las obras mencionadas no sólo se consagra identidad al espacio sonoro como una nueva dimensión musical, sino que también se generan teorías detrás de la espacialización del sonido basadas, entre otros, en principios físicos, poéticos, pictóricos y de percepción auditiva.

Focalizando nuestro interés en éste último campo, podemos advertir que los compositores han elaborado teorías compositivas basadas en artículos de divulgación de diversas ramas científicas provenientes de la psicología y la física, en especial la psicofísica y la psicoacústica. Estos campos científicos estudian principalmente la relación entre la magnitud de los estímulos sonoros y la manera en que son percibidos por un oyente. Un ejemplo de lo antedicho puede verse reflejado en la investigación sobre las técnicas de espacialización del sonido mediante parlantes. Las mismas se han desarrollado, en gran parte, basándose en principios y modelos psicoacústicos para desarrollar hardware o software de espacialización multicanal. También se han realizado tesis y artículos de investigación que abordan con gran precisión cuales son los indicios necesarios para generar una imagen acústica de una fuente virtual y de qué manera deben ser emulados, ya sea mediante un circuito electrónico o un algoritmo computacional.

Sin embargo, no podemos afirmar que las técnicas musicales referidas a la distancia en el espacio sonoro hayan podido valerse de los estudios realizados por las ciencias perceptivas de una manera global ya que, como veremos luego, en muchos casos son tenidos en cuenta solo algunos de los indicios involucrados en la percepción auditiva de distancia, dejando de lado otros que son necesarios para obtener una imagen acústica convincente.

La percepción de una fuente en el espacio está referida a la posición de ésta en el eje horizontal (azimut), en el vertical (elevación) y en el de distancia (Fig. 1). Los dos primeros ejes han sido profundamente estudiados en el siglo pasado (y lo siguen siendo) y las pistas que ayudan a localizar un objeto en ambos han sido tratadas en numerosos trabajos¹. Por el contrario, el estudio

1 Lord Rayleigh: "On Our Perception of Sound Direction", *Philosophical Magazine*, 13 (1907),

de la percepción de distancia a una fuente sonora, tanto en la música como en la psicofísica, involucra una gran cantidad de pistas aún no estudiadas en profundidad, convirtiéndose así en uno de los tópicos con mayor cantidad de enigmas a resolver.

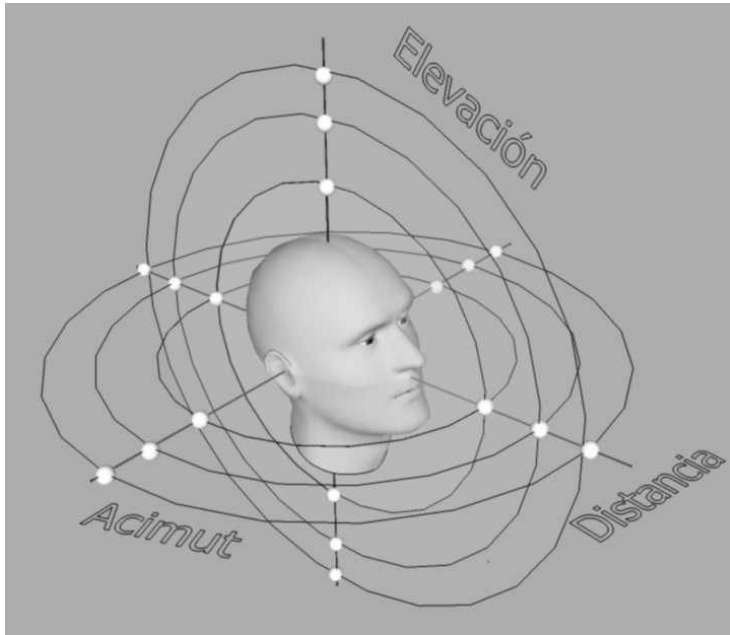


Figura 1: Representación esquemática del espacio tridimensional

El objetivo del presente trabajo es dar un panorama general sobre las herramientas compositivas utilizadas en el manejo de la distancia como factor estructural del discurso musical. De esta manera podremos determinar con certeza que la distancia puede constituir un elemento estructural del discurso musical. Comenzaremos revisando los resultados más relevantes en la literatura científica especializada con el fin de conocer los indicios que intervienen en la percepción de profundidad de fuentes sonoras. De esta manera podremos evaluar las coincidencias y disidencias entre el conocimiento científico y proveniente del ámbito musical. Intentaremos entonces establecer una correspondencia plausible entre la utilización de la distancia en la música y los estudios perceptivos referidos a la misma. Advirtiendo que la bibliografía en este campo de estudio es escasa a nivel internacional, y prácticamente nula a nivel local, intentaremos dar un panorama general sobre el estado actual del tema, indagando en la interrelación

pp. 214–32; Lloyd Jeffress: "A Place Theory of Sound Localization", *Journal of Comparative Physiological Psychology*, 41(1)(1948), pp. 35–39; Henrik Møller, Michael Friis Sorensen, Dorte Hammershøi y Clement Boje Jensen: "Head-related Transfer Functions of Human Subjects", *Journal of the Audio Engineering Society*, 43 (1995), pp. 300–321; Masakazu Konishi: "Coding of Auditory Space", *Annual Review of Neuroscience*, 26 (2003), pp. 31–35.

entre música y ciencia con respecto al campo menos estudiado en la percepción del espacio sonoro: la Percepción Auditiva de Distancia (PAD).

Percepción Auditiva de Distancia

Antes de abordar el uso de distancia en la música, revisaremos los indicios más relevantes que utiliza el ser humano para percibir la distancia a una fuente sonora.

En el campo científico durante los últimos 100 años se ha hecho un gran esfuerzo por comprender las estrategias que utiliza nuestro sistema nervioso para estimar la ubicación espacial de fuentes sonoras en azimut, elevación y distancia. A pesar de este hecho, es escaso el conocimiento respecto a las estrategias que utiliza nuestro sistema nervioso para estimar la distancia a una fuente sonora². Sabemos sin embargo, que la habilidad de los humanos para estimar la distancia a una fuente es, en general, mucho menos efectiva que la habilidad para determinar la procedencia angular del sonido. Los oyentes típicamente subestiman las distancias a fuentes lejanas y sobrestiman la distancia de las fuentes que se encuentran cercanas al oyente (a menos de 2 metros). Para percibir auditivamente la distancia a una fuente sonora nuestro cerebro debe analizar una gran variedad de indicios que tienen diferentes grados de importancia dependiendo de las características del estímulo, el medio ambiente acústico, la experiencia del oyente, etc³. Esto es así ya que, contrariamente a lo que ocurre con la visión, el sistema auditivo no dispone de una representación concreta del espacio circundante al nivel de sus receptores sensoriales. Es por esto que la PAD se realiza con información ruidosa o incompleta proveniente de uno o más indicadores de distancia.

A continuación, examinaremos los principales indicios involucrados en la PAD.

Indicios vinculados a la PAD

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 ha notado que la intensidad del sonido proveniente de una fuente fija disminuye a medida que nos alejamos de la misma. Aunque los cambios de la intensidad dependen siempre de las propiedades del sonido, en particular su relación con la distancia a la fuente puede ser explicada bajo la ley de la inversa del

2 Pavel Zahorik, Douglas Brungart y Adelbert Bronkhorst: "Auditory Distance Perception in Humans: A Summary of Past and Present Research", *Acta Acustica*, 91(2005), pp. 409-420.

3 David Moore and Andrew King: "Auditory Perception: The Near and Far of Sound Localization", *Current Biology*, 9 (1999), pp. 361-63.

cuadrado de la distancia (en inglés, *Inverse Square Law*). Esta ley explica que cuando la distancia a una fuente sonora se duplica la presión sonora en la posición del oyente disminuye en 6 dB y cuando esta distancia disminuye a la mitad la presión sonora aumenta 6 dB⁴. Sin embargo, esta ley no es aplicable en ambientes reverberantes ya que, las reflexiones del sonido en las diferentes superficies de un recinto reducen significativamente la pérdida de intensidad global del estímulo en función de la distancia⁵.

La intensidad es un indicio muy influyente en PAD. Por ejemplo, experimentos psicofísicos muestran que si se manipula la intensidad de un estímulo auditivo proveniente de una fuente fija, los oyentes tienen la sensación de que la distancia aparente a la fuente cambia⁶. Sin embargo, la intensidad es en general un indicio que brinda información relativa de distancia. Es decir, si el oyente cuenta solamente con este indicio, puede percibir si una fuente se encuentra más cerca o más lejos que otra pero no la distancia real de la misma. La intensidad brinda información sobre la distancia real de la fuente solamente cuando el sonido es conocido por el oyente (por ejemplo la voz humana). En estos casos la intensidad pasa de ser un indicio relativo a ser uno absoluto y el oyente puede percibir la distancia a la fuente sin necesidad de realizar comparaciones con otros estímulos.

Debemos considerar además que la intensidad es altamente dependiente de la frecuencia. Esta dependencia para tonos puros la podemos apreciar en la “curva de igual sonoridad”⁷ la cual indica que es necesaria más presión sonora en los extremos del espectro de frecuencias audibles (graves y agudos) que las producidas en la región media. Aquí la intensidad del sonido está aparentemente correlacionada con otra dimensión perceptiva: la sonoridad, es decir, la intensidad subjetiva del sonido. Esta intensidad subjetiva es dependiente de varios atributos del sonido y su contexto, como puede ser: la intensidad física, la distribución en frecuencia y la relación con el sonido de fondo (*background*).

Características espectrales

Existen por lo menos dos fenómenos que provocan cambios sistemáticos en el espectro de frecuencias de un sonido en función de la distancia. Para distancias menores a un metro se produce un aumento relativo de las frecuencias bajas

4 Eleanor Acheson Gamble: “Intensity as a Criterion in Estimating the Distance of Rounds”, *Psychological Review*, 16 (1909), pp. 416–26; Paul Coleman: “An Analysis of Cues to Auditory Depth Perception in Free Space”, *Psychological Bulletin*, 60 (1963), pp. 302–315; Jens Blauert: *Spatial hearing* (Cambridge: MIT Press, 1997).

5 Durand Begault: “Preferred Sound Intensity Increase for Sensation of Half Distance”, *Perceptual and Motor Skills*, 72 (1991), pp. 1019–29.

6 Mark Gardner: “Distance Estimation of 0 Degrees or Apparent 0 Degree Oriented Speech Signals in Anechoic Space”, *Journal of the Acoustic Society of America*, 45 (1969), pp. 47–53.

7 Harvey Fletcher y Wilden Munson: “Loudness, its Definition, Measurement and Calculation”, *Journal of the Acoustic Society of America*, 5 (1933), pp. 82–108.

("efecto de proximidad"). Por otro lado, cuando la fuente sonora se encuentra a más de 15 metros, las propiedades de absorción del aire afectan más a las frecuencias altas que a las bajas causando una pérdida de 3 a 4 dB por cada 100 metros a 4 MHz resultando un efecto similar a un filtro pasa bajos.

Sin embargo, experimentos realizados por Vergara⁸ *et al.* (2010) muestran que las cualidades espectrales del sonido pueden afectar la PAD independientemente de la distancia a la que se encuentra la fuente sonora. Sus resultados muestran que es relativamente fácil estimar la distancia a una fuente cuando se utiliza un estímulo espectralmente complejo (ruido blanco) mientras que es casi imposible hacerlo cuando se utilizan tonos puros. Además demostraron que la información relevante para percibir la distancia a la fuente de manera efectiva se encuentra en la zona del espectro superior a los 4 kHz.

Conocimiento previo o familiaridad

La información previa acerca de las características de la fuente sonora puede influenciar significativamente la PAD. En 1962⁹, Coleman realizó una serie de experimentos donde se expuso a los participantes a un estímulo desconocido, para luego repetir varias veces la misma tarea con el mismo estímulo. De esta manera Coleman observó que cada vez que se repetía el experimento, la experiencia adquirida por los sujetos les ayudó a realizar la tarea de manera más eficaz.

Uno de los estímulos más conocidos por los humanos es sin duda la voz hablada. Las propiedades acústicas de la voz cambian sistemáticamente con el nivel del hablante, por lo que se puede conocer la distancia de este en un campo libre solamente comparando sus diferentes niveles de producción¹⁰. En el mismo sentido, un artículo de Mershon y Philbeck¹¹ (1991) muestra resultados dramáticos con respecto a diferentes formas de presentar un estímulo de voz. En los experimentos se demostró que una voz susurrada fue percibida a menos de la mitad de distancia que una voz normal y un grito se percibió unas tres veces más lejos. Por último, es interesante el resultado que obtienen Brungart y Scott (2001)¹², donde la eficacia de los oyentes para determinar la distancia de una voz hablada disminuyó considerablemente cuando ésta fue reproducida al revés, demostrando de esta forma que el conocimiento de la fuente no es un fenómeno

8 Ramiro Vergara, Esteban Ramón Calcagno y Manuel Camilo Eguía. "The Role of Spectral Cues and Minimum Bandwidth in the Auditory Perception of Distance", *Journal of the Acoustic Society of America*, 128(4) (2010), pp. 2455.

9 Coleman: "Cues to Perception", p. 304.

10 Douglas Brungart y K. R. Scott: "The Effects of Production and Presentation Level on the Auditory Distance Perception of Speech", *Journal of the Acoustic Society of America*, 110 (2001), pp. 425-40.

11 Donald Mershon y John Philbeck: "Auditory Perceived Distance of Familiar Speech Sounds". Annual meeting of the Psychonomic Society, Ontario, 1991.

12 Brungart y Scott: "The Effects of Production and Presentation Level", p. 431.

solamente relacionado al espectro de la señal sino con funciones cognitivas de alto nivel. Esto establece firmemente que, sumado a la diferencia en el espectro de la señal sonora, el efecto de familiaridad con el sonido es el resultado de una larga exposición previa, la cual produce una contextualización inmediata en el espacio acústico.

Relación en la energía del sonido directo y la energía reverberante (D/R)

Cuando una señal sonora se encuentra en una sala cerrada, además de la señal directa entre la fuente y el oyente, se producen otras producidas por las reflexiones del sonido en los elementos físicos del recinto. Esas reflexiones son a lo que llamamos reverberación. La señal directa llega al punto de audición con una intensidad que es proporcional a la distancia de la fuente de acuerdo a la ley del inverso del cuadrado de la distancia. En el caso de la reverberación, la energía que llega al oyente es más o menos constante independientemente de la distancia a la que se encuentre la fuente. De este modo, esto parece indicar que lo que cambia cuando una fuente sonora se acerca o se aleja es la proporción entre la intensidad de la señal directa y la reverberante (relación D/R) cambia. Trabajos previos demostraron que la PAD es más precisa en ambientes reverberantes que en un entorno sin eco. La efectividad de la pista que se basa en la relación D/R fue probada también en ambientes acústicos virtuales¹³ y mediante técnicas de reverberación digital. A partir de estos y muchos otros estudios varios autores han destacado a la relación D/R como uno de los indicios principales para la PAD en entornos reverberantes.

Pistas Visuales

Hasta este punto hemos tratado la audición como un modo perceptivo aislado, pero debemos advertir que en realidad conforma una compleja actividad que envuelve más de una modalidad sensorial. El oído en si mismo constituye una concreta evidencia de conexión entre la orientación y la audición. Representa también una íntima correspondencia con la musculatura del ojo, como un indicador natural de cooperación perceptiva en si mismo.

Los oídos son receptores de nuestra atención hacia la actividad u objeto que requiere de investigación y/o concentración. La determinación más exhaustiva de los objetos es reservada por el sentido de la vista. El dominio de la visión sobre la audición es suficientemente obvio en el caso de un film: los objetos visuales llegan a ser inmediata e inequívocamente la fuente sonora aparente, incluso cuando la posición de la fuente sonora es diferente a la de la imagen. Varios estudios sensoriales integraron las modalidades visual y auditiva enfocándose sobre la localización en el eje horizontal, como por ejemplo el famoso efecto ventrílocuo¹⁴.

13 Begault: "Preferred Sound Intensity Increase", p. 1025.

14 Charles Jack y Willard Thurlow: "Effects of Degree of Visual Association and Angle of

Un estudio pionero sobre el rol de la visión en la PAD fue publicado en Gardner¹⁵ (1968). El dispositivo consistió en la ubicación de 5 parlantes en fila a distintas distancias frente al oyente de manera que éste podía ver solamente el primero. Los resultados revelaron que a pesar de que los sonidos fueron reproducidos por el último parlante de la fila los oyentes reportaron, sin excepción, que provenía del primer parlante. Este efecto fue llamado “efecto de proximidad de imagen”. En 1980 Mershon llegó a la conclusión de que la distancia a la fuente sonora puede ser sobreestimada o subestimada dependiendo de la posición del objetivo visual.

Revisando el efecto de proximidad de imagen, Zahorik (2001)¹⁶ realizó experimentos utilizando un dispositivo similar al de Gardner. Sus resultados mostraron que la presencia de múltiples pistas visuales incrementa la efectividad de los oyentes para percibir las distancias de la fuente sonora en comparación a la respuesta obtenida en las mismas condiciones experimentales pero sin pistas visuales. Calcagno *et al.*¹⁷ obtienen resultados que apoyan esta idea. Adicionalmente sus resultados muestran que la información visual obtenida por los participantes durante el experimento puede ser guardada en su memoria para ser usada, minutos después, como referencia en condiciones en donde las pistas visuales estuvieron ausentes. Los autores concluyen que la modalidad visual brinda información sobre las dimensiones donde ocurren los eventos sonoros. De este modo el cerebro puede calibrar los indicios auditivos de distancia (en su mayoría relativos) en un espacio dado.

Música y distancia

Hasta aquí hemos revisado los indicios involucrados en la PAD desde un punto de vista psicofísico. Como se expuso anteriormente, el trabajo experimental presenta la gran ventaja de poder aislar una característica del sonido determinada para focalizar el estudio sobre la misma. Como veremos a continuación, esto es algo que difícilmente encontraremos en el campo de la música instrumental, dado que las pistas involucradas en PAD se encuentran interrelacionadas de forma tal que sería muy difícil manipular una sin involucrar a la demás.

La creación de la perspectiva auditiva (la ubicación de las fuentes sonoras en distancia) se presenta como un rasgo de especial atención en la música debido a que la localización de fuentes sonoras en un espacio real, o imaginario, es

Displacement on the “Ventriloquism” Effect”, *Perceptual and Motor Skills*, 37 (1973), pp. 967–79.

15 Mark Gardner: “Proximity Image Effect in Sound Localization”. *Journal of the Acoustic Society of America*, 43 (1968), p. 163.

16 Pavel Zahorik: “Estimating Sound Source Distance With and Without Vision”, *Optometry & Vision Science*, 78 (1991), pp. 270-75.

17 Esteban Ramón Calcagno, Ezequiel Lucas Abregú, Manuel Camilo Eguía y Ramiro Vergara: “The Role of Vision in Auditory Distance Perception”, *Perception*, 41 (2012), pp. 175-92.

considerado como un elemento compositivo estructural. La perspectiva auditiva en la música intenta disparar la imaginación creando un espacio sonoro concreto mediante instrumentos, auriculares o parlantes. Este hecho se presenta de forma análoga a lo que ocurre con la perspectiva visual, en donde se construye la ilusión de un espacio tridimensional desde uno bidimensional.

Un recurso compositivo drástico utilizado para generar diferentes planos de profundidad en la música es manipular directamente la distancia entre la fuente y el espectador, lo cual afecta de manera coherente a una gran cantidad de indicios de PAD. Un ejemplo de esto son las obras de la Escuela Veneciana del siglo XVII, en la cual los compositores variaban directamente la distancia entre grupos corales para generar diferentes planos sonoros. Es el caso de los salmos de Willaert a ocho voces, uno de los más tempranos ejemplos (1550) de efectos de “eco distante” mediante el contraste de intensidad entre los grupos corales. Otro caso célebre es el tercer movimiento, de la *Sinfonía Fantástica* de Berlioz (1830) (Fig. 2) en donde un dueto pastoral imaginario se presenta con el corno inglés en escena y con el oboe fuera del escenario.

The image shows a musical score for two instruments: Oboe and Corno Inglés (English Horn). The tempo is marked 'Adagio' with a quarter note equal to 84 beats per minute. The time signature is 6/8. The Oboe part begins with a whole rest, followed by a melodic line starting on a high note, marked 'fuera de escena' (off-stage) and 'p' (piano). The Corno Inglés part begins with a quarter rest, followed by a melodic line starting on a lower note, also marked 'p' (piano). The score is written on two staves with treble clefs and a key signature of one flat (B-flat).

Figura 2: El Oboe fuera de escena implica varios indicios de PAD - *Sinfonía Fantástica*, 3° mov. (Berlioz, 1830)

En este caso, el compositor genera diferentes planos sonoros manipulando directamente la distancia entre los instrumentos. Obviamente, el efecto que se produce es llamativo dado que están involucrados una multiplicidad de indicios claves de PAD. Por un lado, al emitirse fuera del escenario, el sonido que llega al oyente proveniente del oboe no es el directo sino el proveniente de las reflexiones. Al mismo tiempo, el filtrado que producen las paredes de la sala y otras superficies absorbentes producen un cambio espectral lo suficientemente convincente para que el oyente perciba una imagen auditiva distante. Sumado a esto, el hecho de que el espectador no vea la fuente genera en éste una contradicción: el sonido del oboe se escucha “en la sala”, pero no se puede ver la localización de la fuente. Esto, sumado a los demás cambios antes nombrados, contribuye a enfatizar la sensación de lejanía. Un ejemplo similar es el efecto de “llamado” de trompeta distante de Fidelio, en la Obertura de Leonora N° 3 (Op. 72) compuesta por Beethoven en 1806. En este pasaje, no es suficiente que el instrumentista toque suavemente (menor intensidad) para simular un

aumento en la distancia de la fuente sino que debe ubicarse a cierta distancia de los cantantes y la orquesta con el fin de que la trompeta adquiera el timbre deseado.

Ya dijimos que los recursos antes nombrados son drásticos debido a que el efecto de profundidad se logra variando la distancia de la fuente sonora. Históricamente en la música se han implementado una variedad de técnicas compositivas para simular cambios de profundidad desde fuentes fijas. Las primeras herramientas utilizadas en la música para generar diferentes planos de profundidad desde fuentes fijas (los diferentes instrumentos de la orquesta) fueron: el control de la dinámica, inherente al período barroco, y el manejo de las posibilidades tímbricas instrumentales. Esto se implementó mediante técnicas sencillas, como la reducción o multiplicación del número de instrumentos y la regulación del desarrollo dinámico de un evento musical.

Dijimos antes que un indicio obvio en PAD es la relación entre la intensidad y la distancia a la fuente sonora. No sorprende entonces que los cambios en la dinámica hayan sido un recurso muy utilizado para simular distancia.

La intensidad en la música instrumental básicamente se implementa a través de la dinámica, las articulaciones y el fraseo. La dinámica se encuentra estrechamente relacionada con la intensidad (objetiva) y sonoridad (subjetiva) del sonido, mientras que la articulación y el fraseo afectan a la envolvente dinámica global. Dada esta característica, podemos observar que a diferencia del material sonoro involucrado en los experimentos de laboratorio, en un contexto musical la dinámica es altamente dependiente de la subjetividad, la interpretación del instrumentista y el contexto musical.

La precisión en la escritura de dinámicas y articulaciones no apareció hasta el siglo XVIII, en donde encontramos un abanico de indicaciones más amplio que un simple contraste entre *p* y *f*. De ahí en más, las intensidades del fraseo musical fueron evolucionando desde una simple escala de valores relativos entre *ppp* a *fff*, pasando por las complejidades racionales del serialismo integral, hasta la escritura analógica más inclinada a la medición de la intensidad física. De esta manera, el desarrollo de la dinámica en la música se ha convertido de un simple (aunque efectivo) factor de contraste a un campo técnico y expresivo que abarca más de una dimensión musical: la dinámica musical también implica aspectos estéticos, expresivos y compositivos.

Como mencionamos antes, la evolución en el uso de la dinámica en la música se ha desarrollado en función de las diferentes necesidades expresivas y estéticas. A continuación veremos que el uso de la dinámica también se ha expandido a otros campos, en particular al del espacio sonoro.

En la música instrumental la utilización de la intensidad se encuentra correlacionada con el cambio de la envolvente espectral. Esta característica, inherente a los instrumentos acústicos, presenta un fuerte vínculo con el alejamiento o acercamiento de la fuente sonora. Por citar un ejemplo didáctico, si un violín se toca fuerte aumentará tanto la intensidad como la magnitud de

los componentes en alta frecuencia de la señal, incluso con la utilización de sordina. En cambio, si toca suavemente los componentes de alta frecuencia serán atenuados. Este hecho, aunque parezca obvio, determina drásticamente la ubicación aparente de la fuente en el espacio sonoro (recordemos que, al igual que la pérdida de intensidad, una baja en el componente de altas frecuencias está relacionado con un aumento en la distancia a la fuente) y puede ser incrementado aún más si es combinado con la ubicación espacial del instrumentista. En este ejemplo podemos apreciar como la utilización de un recurso simple (variar la dinámica de la ejecución) genera información relacionada con la ubicación aparente de la fuente en distancia a través del control sobre indicios diferentes de la PAD. Esto representa una correspondencia directa con los experimentos realizados en laboratorio¹⁸, en donde se ha demostrado que los cambios espectrales de la señal sonora a una misma distancia tienen un fuerte impacto sobre la PAD.

En los instrumentos acústicos los cambios espectrales, o sea tímbricos, se producen mediante distintos modificadores y técnicas de ejecución. Dado el gran avance de los recursos instrumentales desarrollados hasta la actualidad, la modificación espectral del sonido emitido por instrumentos acústicos se ha expandido hasta límites insospechados hace unos 60 años. Por nombrar un modificador tímbrico elemental, podemos observar que para casi todos los instrumentos de la orquesta sinfónica moderna existe al menos un tipo específico de sordina. Como ya es sabido, con este recurso, el timbre "natural" del instrumento es modificado atenuando mayormente las frecuencias más altas del espectro, otorgando al sonido una cualidad más velada. El uso de este tipo de técnica actúa significativamente sobre el espectro general del instrumento. La atenuación en altas frecuencias producido por el uso de la sordina evoca al indicio de absorción causada por el aire cuando la fuente se encuentra a una distancia considerable. Además, como mencionamos previamente, estos dispositivos causan una disminución en la intensidad global del sonido, lo cual representa otro indicio importante en la PAD.

Los modificadores y las técnicas instrumentales poseen la cualidad de ser efectuados con diverso grado de control, dependiendo del registro, el tipo de técnica y las posibilidades de cada instrumentista. Mediante la combinación e interacción de los factores mencionados, a través de la historia de la música han surgido técnicas de modificación tímbrica para simular distancia de manera efectiva. Un claro ejemplo de lo antedicho lo podemos encontrar en el segundo movimiento la obra de Rimsky-Kórsakov llamada *Capricho Español* (1887), en donde de los sonidos naturales del corno se suceden con los "bouchés" (Fig. 3). En el siguiente pasaje es notable como una fuente fija, representada por el corno, puede generar el efecto de distancia modificando sólo el timbre y la intensidad.

18 Mershon y Philbeck, "Auditory"

Andante con moto ♩=112

Corno en F

Violin I

Violin II

Viola

Violoncello

Contrabass

Figura 3: Modificador tímbrico para simular distancia a la fuente (Rimsky-Kórsakov: Capriccio Español - 2º Mov.)

Como vimos anteriormente, Vergara¹⁹ demostró que los sonidos espectralmente complejos son más sencillos de ubicar en distancia que los de espectro simple. Las características espectrales en el ámbito instrumental presentan resultados perceptivos similares a los descritos por Vergara. Dado que la PAD es dependiente no solo de la frecuencia sino también del ancho de banda, la utilización de timbres análogos a los tonos puros sinusoidales o de banda angosta (como los armónicos en los instrumentos de cuerda) puede resultar con mayor grado de ubicuidad que los instrumentos que presentan un ancho de banda más amplio, como puede ser el caso de un platillo. Como veremos más adelante, esta característica es de utilidad cuando se requiere estructurar la textura en diversos estratos distribuidos en el plano de la distancia. Es decir, desde este punto de vista sería contradictorio superponer en distancia diferentes estratos con sonidos de espectro simple dada la ubicuidad característica de los mismos.

Es notable la manera en que nuestro sistema perceptivo parece intentar otorgarle algún tipo de forma física a materiales que no los son. Los sonidos musicales claramente tonales sugieren formas regulares y simples, y los sonidos ruidosos indican formas más complicadas, pero incluso esta relación se mantiene sólo en los casos en que el objeto de origen es idéntico o muy aliado con el sonido

19 Vergara, Calcagno y Eguía. "The Role of Spectral Cues and Minimum Bandwidth", p. 2460.

real productor. De esta manera podemos inferir que una vaga idea deriva de una forma de una fuente no-familiar dada su falta de representación mediante un significado. Stockhausen²⁰ menciona la siguiente experiencia: si alguien susurra al oído muy suavemente solemos asociarlo con cercanía, a pesar de que el sonido posea una amplitud alta. En cambio, si escuchamos un trueno que esta ocurriendo a más de 10 Kilómetros lo asociamos con lejanía. Ambos sonidos poseen la misma amplitud, pero se perciben espacialmente de forma radicalmente distintas. Es aquí donde observamos que la PAD está determinada no solo por la información que brindan los indicios antes mencionados sino, además, por el conocimiento previo del estímulo. Tomando en cuenta los estudios psicofísicos de PAD podemos suponer que resultará más sencillo generar diferentes estratos en distancia utilizando sonidos conocidos que sonidos desconocidos ya que estos últimos son más difíciles de ubicar en el eje de la distancia.

La distancia en la música electroacústica

A diferencia de lo que ocurre con la música instrumental, en la música electroacústica los compositores no están limitados a fuentes sonoras pre-existentes. Esta particularidad otorga a los compositores la posibilidad de diseñar sonidos que den soporte específico a la espacialidad musical. Pero también pueden explorar ámbitos acústicos que sugieran derribar la validez física del espacio sonoro. Cuando una música es tocada con instrumentos acústicos en una sala real nos ofrece una variedad de pistas a nivel físico tanto visuales como acústicas, las cuales permiten que el oyente genere una experiencia espacial sobre el mundo físico. En la música electroacústica, la experiencia ante los fenómenos que se producen en un espacio acústico real ha sido uno de los puntos centrales de estudio, pero la tecnología de reproducción multicanal amplía de una manera radical el alcance y la complejidad de la espacialidad generada. Es por eso que uno de los aspectos más importantes que diferencian a la música electroacústica de la acústica es el rango expandido de su paleta espacial, determinada por la interacción entre la tecnología y la respuesta del oyente. Sin embargo, esta característica en ocasiones se presenta como una desventaja: la descripción física de los indicios en un entorno acústico virtual provee solo una precaria guía para generar una imagen auditiva en el oyente, dada la esencia inmaterial de la música emanada de parlantes.

En el campo de la música por computadora, la mayoría de las investigaciones concernientes a la percepción auditiva del espacio sonoro pueden encontrarse en dos líneas de estudio: 1) la investigación sobre la percepción y la cognición en la audición espacial y 2) la investigación aplicada sobre la reproducción sonora. Con esta tecnología, los compositores pudieron controlar, a diferencia de lo que ocurre en el ámbito instrumental, diferentes indicios espaciales de manera aislada. Esto les permitió a los compositores hacer

20 Robin Maconie (ed.): *Stockhausen on music*. (London, Marion Boyars, 1989).

del espacio sonoro un parámetro controlable aunque, a la fecha, con resultados efectivos muy variables. Sin dudas es en este ámbito donde se produce el mayor cruce entre los estudios psicofísicos, las técnicas de espacialización y el imaginario compositivo.

Un ejemplo de la especificidad del manejo de los indicios de la PAD en la música electroacústica es el control de la intensidad. A diferencia de la música instrumental, la utilización de la tecnología en la música electroacústica le permite al compositor, mediante un software, modificar la amplitud de la señal de la fuente virtual de manera proporcional a la distancia entre ésta y el oyente sin afectar otros indicios de distancia. Esto muestra un correlato directo entre las investigaciones psicofísicas referentes a la intensidad del sonido en distancia. Para ejemplificar lo antedicho, podemos citar el modelo aplicado por John Chowning en *Turenas* (1972) en donde implementa un sistema cuadrafónico (cuatro parlantes) para simular un espacio sonoro determinado mediante un modelo matemático. Este modelo utiliza un multiplicador de intensidad que actúa de acuerdo a la ley del cuadrado inverso de manera independientemente en cada canal dependiendo de las diferentes posiciones de la fuente. Este tipo de procedimiento es uno de los más difundidos para simular la ubicación y desplazamiento de una fuente sonora en el espacio auditivo. Mediante el desplazamiento de esta “fuente fantasma” en el eje horizontal y de distancia es posible obtener una gran cantidad de trayectorias. Por citar un ejemplo célebre, en el libro de Wishard²¹ *On Sonic Art*, encontramos diagramas y esquemas de posibles gestos espaciales bidimensionales. Sin embargo, debemos advertir que muchas de las trayectorias planteadas por Wishard pueden ser prácticamente indistinguibles entre sí: no es lo mismo diagramar visualmente una trayectoria que escucharla. Un clásico ejemplo es la trayectoria basada en curvas de Lissajous que cumple un rol fundamental en *Turenas*. Chowning concluyó que la trayectoria de la “fuente fantasma” era mucho más convincente tomando como referencia curvas simples, claras y bien estructuradas para lograr trayectorias que puedan ser percibidas y así robustecer la dinámica espacial del discurso musical. En la figura 4 mostramos el movimiento de *Turenas* como un ejemplo clásico de una trayectoria compleja en el eje horizontal y de profundidad utilizando figuras basadas en las curvas de Lissajous.

Desde mediados del siglo XX se han desarrollado sistemas de espacialización del sonido para simular un determinado espacio acústico mediante parlantes. Ejemplos de sistema de espacialización renombrados pueden ser Intensity Panning, Ambisonic y Dolby 5.1. No es el objetivo de este trabajo profundizar en estos sistemas, ya que existe excelente bibliografía a nivel internacional y local²² que trata el tema de forma exhaustiva. Desde el punto de vista de la implementación técnica, el espacio musical electroacústico tiene efectividad solo

21 Trevor Wishart: *On Sonic Art* (New York, Imagineerring Press, 1985).

22 Gustavo Basso, Oscar Pablo Di Liscia y Juan Pampin (eds.): *Música y espacio: ciencia, tecnología y estética*, (Buenos Aires, Editorial de la Universidad Nacional de Quilmes, 2009).

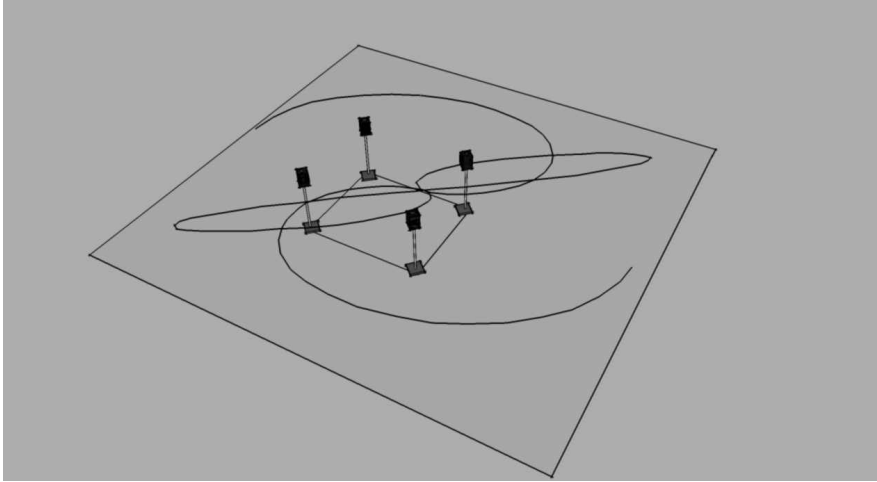


Figura 4: Movimiento complejo en el eje horizontal y de distancia (Turenas, Chowning 1975).

si podemos percibir de manera evidente las características sonoras del espacio real o imaginario como estructura. Dicha estructura puede basarse, entre otros factores, en el tipo de reverberación que genera un espacio dado. En la música sinfónica, por ejemplo, gran parte del problema ya viene resuelto de antemano dado que el trabajo compositivo utilizando los instrumentos de orquesta presenta una espacialidad en sí misma. Salvo que los instrumentos acústicos se muevan en el recinto, son muy pocas las veces en las que podemos modificar la relación entre el sonido directo de los instrumentos y las reflexiones de la sala.

Por el contrario, al trabajar en un espacio virtual es necesario generar la reverberación del entorno acústico imaginario donde los acontecimientos sonoros acontecen. A diferencia de lo que ocurre con la reverberación de una sala real, en donde los factores que afectan a la misma no cambian en el tiempo, en el espacio electroacústico la reverberación adquiere mayor plasticidad. Esto habilita a generar distintos espacios de características diferentes los cuales pueden actuar como entidades compositivas independientes. Dicho esto, podemos inferir que en la música electroacústica podría ser necesario crear un espacio propio, que no viene dado solamente por los objetos sonoros como si ocurre con los instrumentos acústicos. Además de la reverberación general de una sala, las herramientas actuales nos permiten manipular la relación D/R con cierta facilidad.

Distancia en el espacio real e imaginario

La percepción espacial, tanto visual como auditiva, nos permite ubicar objetos en el mundo real, el cual nos brinda una multiplicidad enorme de referencias que nos ayudan a ubicar los objetos, visuales y sonoros, en relación

a ellas. Por el contrario, en la música es necesario construir un espacio que en la mayoría de los casos es imaginario, para luego poder operar sobre el mismo.

En el ámbito de la música instrumental, cuando un compositor trabaja con la idea de gradiente, profundidad, contorno y marco, la orquesta se presenta como un orgánico instrumental que contiene lugares fijos los cuales permiten trabajar con ideas de ampliaciones espaciales que involucran distancia y perspectiva auditiva. En este caso las posiciones, que están determinadas por la ubicación instrumental, están enmarcadas y fijadas por nuestra memoria construyendo un espacio previamente configurado. En 1971, Stockhausen²³ plantea la idea de “composición espacial multi-capa” (fig. 5), invitando a la reflexión sobre el espacio más allá de los sonidos que acontecen alrededor del oyente a una distancia fija. Stockhausen parece no sobreestimar la técnica de composición espacial multi-capa ya que advierte que la misma se encuentra limitada por nuestra percepción. En analogía con lo que ocurre con la melodía y armonía en el plano bidimensional de la música tradicional, la construcción de una profundidad espacial por la superposición de capas habilita la idea de establecer una perspectiva auditiva en el espacio tridimensional.

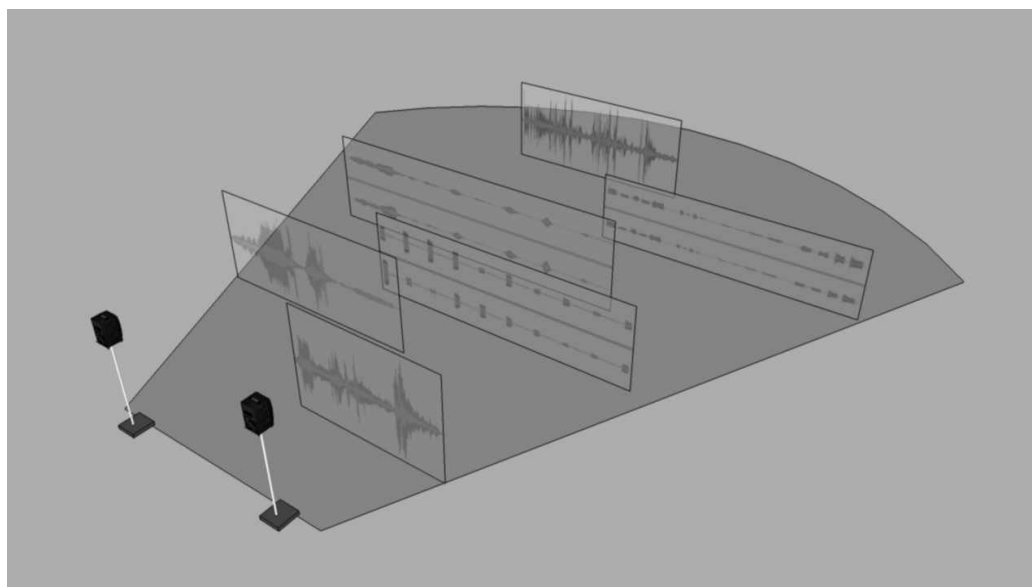


Figura 5: Técnica de composición multi-capa en el campo estéreo planteada por Stockhausen.

Un ejemplo claro en el que el espacio se presenta como un factor fundamental del discurso musical es *Cristal Argentó* (2011), del compositor argentino Oscar Edelstein. El autor comenta sobre su obra:

23 Maconie: *Stockhausen*, p. 233.

En *Cristal Argentó I* el trabajo con las “distancias” interválicas e instrumentales consiste en: a) uso de las distancias objetivas o reales existentes entre las diversas fuentes fijas instrumentales para la generación de otras formas y estructuras con volumen, b) las fórmulas que detallan los tipos y grados de conexiones posibles entre esas fuentes fijas (uso de conectores entre instrumentos y grupos) c) estudio de las distancias perceptivas -imaginarias- que conlleva el uso de diferentes intervalos de altura, timbre y tiempo, como también la consideración en escala de los intervalos musicales clásicos para el diseño de armonías y texturas, en consideración a las distancias entre grupos, c) las modificaciones en el volumen y peso sonoro (entendido también como densidad) ya sea en el tratamiento del “grosor” de las líneas o la profundidad de los bloques.”

Edelstein parte desde una idea emparentada con las capas múltiples de Stockhausen pero introduce el concepto de fuentes fijas como factor fundamental para generar el marco (el espacio) donde transcurre el discurso sonoro. Edelstein propone una teoría basada en dos ideas fundamentales²⁴:

1. Sin fuentes fijas de referencia no hay espacio en el sentido constructivo.
2. Toda distancia puede ser considerada como un intervalo y de allí adaptada a una escala que interprete a los campos provenientes de lo real, lo imaginario y lo simbólico.

Edelstein plantea dos grandes campos para construir (o imaginar, pensar, nombrar y cifrar) al espacio musical: el Posicional, o Teatral, ligado a las fuentes fijas de emisión y la experiencia en la escena, y el Abstracto, considerado como la resultante de los diseños de movimientos entre fuentes diversas, la generación de texturas, estructuras o discursos en un entorno creado.

Esta teoría es otro ejemplo de cómo las herramientas musicales surgidas de conocimientos empíricos se relacionan con la percepción del espacio en el mundo real. La percepción de distancia, tanto en la modalidad visual como en la auditiva, ha demostrado que, para que podamos percibir la ubicación de un objeto a cierta distancia, es necesaria la presencia de múltiples indicios relacionados con el espacio donde los objetos están ubicados.

De manera similar, cuando existen en la música puntos de referencia estructuralmente bien definidos, el espacio cobra sentido en nuestra percepción como un marco contenedor del relato sonoro. Pero cuando los puntos de referencia adquieren un carácter más abstracto, la construcción del marco no es tan sencilla. El solo hecho de trabajar con un material musical implica

24 Manuel Eguía y Oscar Edelstein (2007): “The Acoustic Grid”, en Amalia Barboza (ed.): *Insert - zehn Kooperationen zwischen Kunst und Wissenschaft* (Frankfurt: Gutleut Verlag), 2007.

intrínsecamente un espacio y una distancia. Si las fuentes se encuentran situadas en lugares estratégicos, surge que el manejo de la perspectiva auditiva y la distancia es mucho más claro. Es claro para el compositor, pero sobre todo es mucho más claro para el oyente. Según Edelstein “las posiciones fijas no solo cubren el rol de determinar un espacio acústico imaginario sino que establecen lazos con las posiciones fijas históricas, como lo son los instrumentos de la orquesta. Es decir, en las posiciones fijas está la historia de la música”.

Conclusiones

En el panorama musical contemporáneo la concepción del espacio musical representa una importante dimensión estructural. En la música, el espacio sonoro se manifiesta mediante dimensiones poéticas, estéticas y expresivas, aunque queda claro que para construir espacialidad de manera plausible también es necesario recurrir a nuestra percepción del mundo real.

En el ámbito de la música instrumental, los compositores históricamente han utilizado distintas técnicas para generar distancia en el espacio sonoro. Dichas técnicas, surgidas principalmente de la experiencia de los compositores, se enfocaron en el control de diferentes cualidades acústicas del sonido, las cuales fueron postuladas años después por la psicoacústica experimental como importantes indicios de PAD. Sin embargo, al trabajar con instrumentos acústicos, resulta extremadamente complicado manipular de manera aislada los indicios involucrados en la PAD. Por ejemplo, cuando un instrumentista realiza cambios en la ejecución con el fin de producir modificaciones en la intensidad del sonido se producen inevitables variaciones en el contenido espectral del mismo (en ambos casos se trata de importantes indicios de PAD).

Un caso muy diferente es el de la música electroacústica, en donde las herramientas tecnológicas actuales posibilitan abordar algunos de los indicios involucrados en la PAD de manera independiente y controlada. Esto permite construir un contenedor en el cual ocurran interacciones particularmente complejas entre la audición espacial y otros campos de la percepción auditiva. Sin embargo, más allá de los últimos avances de los sistemas de espacialización del sonido, la utilización de la distancia en la música electroacústica dista mucho de estar resuelta. El escalamiento de la intensidad, la simulación del filtrado de la señal en función de la distancia y la aplicación de reverberación artificial parecen no alcanzar para generar una imagen acústica convincente en distancia. Hemos visto a lo largo de este trabajo que factores importantes como la calidad espectral del sonido, el conocimiento previo de las fuentes sonoras y la relación con la información provista por la modalidad visual pueden influir de manera contundente en la PAD. El conocimiento de este tipo de información facilitaría la tarea del compositor a la hora de simular la ubicación de una fuente sonora a una distancia determinada o realizar transiciones espaciales de una manera más sutil. De acuerdo a lo antedicho, sería muy beneficioso clasificar los timbres

utilizados tanto en una orquesta sinfónica como en la música electroacústica de acuerdo al grado de ubicuidad. Un ejemplo claro sería la relación entre la ubicuidad de una fuente en distancia y el ancho de banda del sonido que esta emite. Por ejemplo, sería contradictorio otorgarle una ubicación específica en el eje de distancia a una fuente sonora que emita sonidos espectralmente simples, similares a tonos puros, ya que hemos visto que éste tipo de sonidos no son fáciles de ubicar en distancia.

Por otro lado, experimentos de PAD, tanto en la modalidad visual como en la auditiva, han demostrado que para percibir correctamente la distancia a un objeto es relevante conocer las dimensiones del lugar donde ocurren los acontecimientos sonoros y visuales. La utilización de la reverberación artificial para simular una sala determinada es un claro ejemplo de cómo un indicio acústico puede darnos información sobre el tamaño de un recinto, lo cual tiene un fuerte impacto sobre la PAD. Como dijimos anteriormente, el oído funciona actuando conjuntamente con el sentido de la vista. Se ha demostrado de manera contundente el grado de incidencia que posee la visión sobre nuestra percepción del espacio acústico. Podemos observar así que la PAD puede variar en función de la presencia, ausencia, saturación, escasez y ubicación de las pistas visuales. Conociendo este hecho, inferimos que esta característica no es ajena al ámbito musical. Pensar en el concepto de perspectiva visual y auditiva nos posibilita concebir un espacio musical híbrido, en el cual no solo operen fuentes sonoras fijas sino también distintas pistas visuales que afectan directamente la estructura musical en el espacio.

A lo largo de este trabajo, hemos visto que la PAD involucra una variedad de indicios acústicos y no-acústicos que pueden afectar de manera importante el manejo del espacio en la música. Sin embargo, aunque existan distintas técnicas instrumentales y electroacústicas para simular profundidad en el espacio musical, el tratamiento de la distancia como factor estructural en la música dista mucho de estar resuelto. Esta situación no es exclusiva del ámbito musical ya que también es escaso el número de investigaciones referidas a la PAD a nivel internacional. De este modo, la PAD se presenta como un campo fértil en el que aún queda mucho camino por recorrer tanto para la música como para la psicoacústica experimental.

Bibliografía

- Basso, Gustavo, Oscar Pablo Di Liscia y Juan Pampin (eds.): *Música y Espacio: ciencia, tecnología y estética*, (Buenos Aires, Editorial de la Universidad Nacional de Quilmes, 2009).
- Begault, Durand René: "Preferred Sound Intensity Increase for Sensation of Half Distance", *Perceptual and Motor Skills*, 72 (1991), pp. 1019–29.
- Blauert, Jens.: *Spatial hearing* (Cambridge: MIT Press, 1997)
- Brungart, Douglas S. y Kimberlet R. Scott: "The Effects of Production and Presentation Level on the Auditory Distance Perception of Speech", *Journal of the Acoustic Society of America*, 110 (2001), pp. 425–40.
- Calcagno, Esteban R., Ezequiel L. Abregú, Manuel C. Eguía y Ramiro Oscar Vergara: "The Role of Vision in Auditory Distance Perception", *Perception*, 41 (2012), pp. 175-92.
- Coleman, Paul D.: "An Analysis of Cues to Auditory Depth Perception in Free Space", *Psychological Bulletin*, 60 (1963), pp. 302–315.
- Eguia, Manuel y Oscar Edelstein (2007): "The Acoustic Grid", en Amalia Barboza (ed.): *Insert - Zehn Kooperationen zwischen Kunst und Wissenschaft* (Frankfurt: Gutleut Verlag), 2007
- Fletcher, Harvey y Wilden A. Munson: "Loudness, its Definition, Measurement and Calculation", *Journal of the Acoustic Society of America*, 5 (1933), pp. 82-108.
- Gamble, Eleanor. A.: "Intensity as a Criterion in Estimating the Distance of Rounds", *Psychological Review*, 16 (1909), pp. 416–26.
- Gardner M. B.: "Distance Estimation of 0 Degrees or Apparent 0 Degree Oriented Speech Signals in Anechoic Space", *Journal of the Acoustic Society of America*, 45 (1969), pp. 47–53.
- Gardner M. B.: "Proximity Image Effect in Sound Localization", *Journal of the Acoustic Society of America*, 43 (1968), p. 163.
- Jack, Charles Edward. y Willard R.Thurlow: "Effects of Degree of Visual Association and Angle of Displacement on the "Ventriloquism" Effect", *Perceptual and Motor Skills*, 37 (1973), pp. 967–79.
- Jeffress, Lloyd A.: "A Place Theory of Sound Localization", *Journal of Comparative Physiological Psychology*, 41(1)(1948), pp. 35–39.
- Konishi, Masakazu: "Coding of Auditory Space", *Annual Review of Neuroscience*, 26 (2003), pp. 31-35.

- Maconie, Robin (ed.): *Stockhausen on music*. (London, Marion Boyars, 1989).
- Mershon, Donald H. y John W. Philbeck: "Auditory Perceived Distance of Familiar Speech Sounds". Annual meeting of the Psychonomic Society, Ontario, 1991.
- Møller, Henrik, Michael Frits Sorensen, Dorte Hammershøi, y Clemen Boje Jensen, "Head-related Transfer Functions of Human Subjects", *Journal of the Audio Engineering Society*, 43 (1995), pp. 300–321.
- Moore, David R. y Andrew J. King: "Auditory Perception: The Near and Far of Sound Localization", *Current Biology*, 9 (1999), pp. 361–63.
- Rayleigh Lord [John William Strutt]: "On Our Perception of Sound Direction", *Philosophical Magazine*, 13 (1907), pp. 214–32.
- Vergara, Ramiro Oscar, Esteban Calcagno y Manuel C. Eguía: "The Role of Spectral Cues and Minimum Bandwidth in the Auditory Perception of Distance", *Journal of the Acoustic Society of America*, 128(4) (2010), pp. 2455.
- Wishart, Trevor: *On Sonic Art* (New York, Imagineerring Press, 1985). Nueva edición, Amsterdam: Harwood Academic Publishers, 1996. Disponible en <https://n-1.cc/file/download/1652894>.
- Zahorik, Pavel: "Estimating Sound Source Distance With and Without Vision", *Optometry & Vision Science*, 78 (1991), pp. 270-75.
- Zahorik Pavel., Douglas S. Brungart y Adelbert W. Bronkhorst: "Auditory Distance Perception in Humans: A Summary of Past and Present Research", *Acta Acustica*, 91(2005), pp. 409–420.