FIA 2018
XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DIRECCIONAL DEL ANFITEATRO NATURAL DE LA QUEBRADA DE LAS CONCHAS

PACS: 43.55.-n. Acústica Arquitectónica

Payo, Damian [1] ; Durante, Francisco [2] ; Zannoli, Mauro [2] ; Eguia, Manuel [3]
[1] Escuela Universitaria de Música, Universidad Católica de Salta,
Campo Castañares s/n , Salta, Salta, Argentina
Tel: (+54 387) 4268521 sdpayo@ucasal.edu.ar
[2] Escuela Universitaria de Artes, Universidad Nacional de Quilmes,
Roque Saenz Peña 352, Bernal, Buenos Aires, Argentina
Tel: (+54 011) 4365 7100. francdurante@gmail.com ; mzannoli@unq.edu.ar
[3] Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora, Universidad Nacional de Quilmes,
Roque Saenz Peña 352, Bernal, Buenos Aires, Argentina
Tel: (+54 011) 4365 7100. meguia@unq.edu.ar

Palabras Clave: Acústica Musical, Acústica Arquitectónica, Parametros Acústicos Direccionales.

ABSTRACT

The acoustics of an enclosed space is commonly characterized using omnidirectional sources and receptors and assuming a diffuse condition, which is hardly fulfilled in natural environments. This work presents a study using directional sources and decoded ambisonics parameter measurements of a natural amphitheatre at the "Las Conchas" Canyon in Argentina, that is widely used as a venue for concerts. from the analysis of the differences between these measurements, their omnidirectional counterparts and a reference model with the same volume and absorption, a characterization of this enclosure in terms of the evenness of its space quality can be derived.

RESUMEN

La acústica de un recinto se caracteriza comúnmente utilizando fuentes y receptores omnidireccionales y asumiendo una condición difusa, que difícilmente se cumple en entornos naturales. este trabajo presenta un estudio que utiliza fuentes direccionales y medidas decodificadas a partir de parámetros ambisonics en un anfiteatro natural en Salta (Argentina), que es ampliamente utilizado como escenario musical. a partir del análisis de las diferencias entre estas mediciones, sus contrapartes omnidireccionales y un modelo de referencia con el mismo volumen y absorción, se puede derivar una caracterización de este recinto en términos de la uniformidad de su calidad espacial.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo está basado en el estudio acústico de una formación rocosa semicerrada de volúmen pseudo-ojival conocida como "el Anfiteatro", ubicado sobre la Ruta Nacional Nº 68 a 16Km de la ciudad de Cafayate (Salta, Argentina), dentro de la Quebrada del Río de las Conchas.

Este epacio ha sido utilizado durante las últimas tres décadas como anfiteatro para conciertos por tener fama de una calidad acústica tan buena como la de muchas salas de conciertos reconocidas. Sin embargo, hasta la fecha, no existe un solo estudio que valide o refute dichas afirmaciones. Si bien, no es tampoco el objetivo de este trabajo hacerlo, sí pretendemos mostrar que existen cualidades singulares en su acústica, perceptible a primera escucha para ciertos puntos de la fuente o el receptor.

Entendiendo que en este Anfiteatro, al tratarse de un espacio semi-abierto, no es posible que se cumplan las condiciones de la norma relevante [1] que propone en su metodologia un campo sonoro difuso tanto en la fuente como en el receptor [2] y que no existen directrices generales para el uso de fuentes o receptores omnidireccionales en estos ámbitos, estudiamos su acústica, sin asumir la condición difusa y teniendo en cuenta la información direccional, tanto para la fuente como para el micrófono.

Aunque ha habido varios enfoques recientes para incluir características direccionales que se encuentran en fuentes sonoras reales y receptores [3-5], aún no existe un método comúnmente aceptado para realizar este tipo de estudios. Aquí adoptamos un procedimiento simple utilizando un solo parlante con un patrón de direccionalidad conocido, en diferentes orientaciones y un micrófono Ambisonics, para los distintos puntos de medición.

El Anfiteatro es producto de la acción de varios elementos, entre los que se destaca la erosión producida por el agua de una cascada que existió hace millones de años y que dieron como resultado configuraciones arbitrarias que generan una cavidad de formas y estructura muy particular (Figura 1). Este espacio, está compuesto principalmente por una cavidad semicerrada, a la que se accede por una grieta entre las rocas, tiene más de 20 metros de altura, aproximadamente 35 metros de profundidad y 28 metros de ancho. Asimismo, es reconocido de gran interés cultural y turístico para la región, ya que forma parte del antiguo territorio Diaguita-Calchaquí y del patrimonio cultural inmaterial de Argentina. Su forma y el alto grado de difusión de sus paredes crean una notable sensación de inmersión sonora, resonancias específicas y un nivel de refuerzo significativo. Estas características lo convierten en un espacio óptimo para la ejecución musical, sin la necesidad de ningún tipo de refuerzo sonoro agregado.

Con el proposito de realizar una evaluacion exaustiva de las caracteristicas citadas anteriormente, realizamos una evaluación de la dependencia con la direccionalidad de la fuente y el receptor de los parámetros acústicos temporales clásicos (tiempo de reverberación, claridad y centro temporal) derivados de las medidas en el Anfiteatro y las comparamos con las obtenidas a partir de una simulación numérica de un modelo que aproxima la geometría de este recinto.

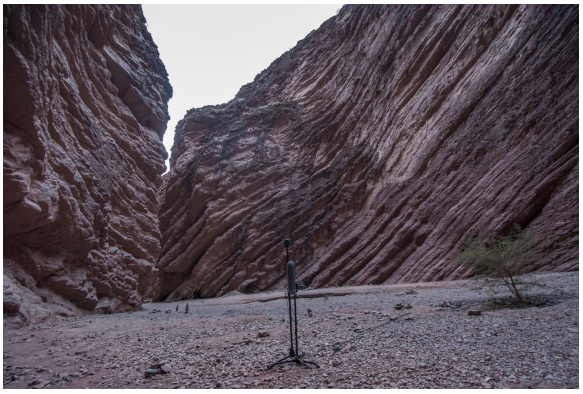

Figura 1: Vista desde el interior del Anfiteatro donde puede apreciarse con claridad la grieta de entrada. En el centro, el micrófono Ambisonics usado para las mediciones.

2. **MATERIALES Y MÉTODOS**.

Debido a las caracteristicas topograficas del Anfiteatro (gran irregularidad de sus paredes y niveles del suelo con diferencias de hasta 2 metros de altura) fue necesario realizar una grilla rombal a una altura fija que permita relevar las distinas posiciones de la fuente y el receptor con una referencia clara, abarcando cuatro puntos extremos del recinto, utilizando como herramienta de replanteo un nivel topográfico. La posición de fuente L3 (ver Figura 2) quedó ubicada en el centro de esta grilla. A partir de este punto se determinaron dos ejes de coordenadas y cinco *targets* de referencia (uno para el centro y cuatro para cada esquina del rombo). De este modo, para cada posición se midieron las distancias hasta al menos tres *targets*, pudiendo de esta forma tener una ubicación precisa y unívoca de la misma en el recinto.

Para las mediciones *in situ*, la fuente acústica utilizada fue un parlante Genelec 8030B biamplificado, ubicado a una altura de 1,60 m. Se emplearon tres posiciones de fuente (ver L1-L3 en la Figura 2), que corresponden a los lugares más utilizados como escenario durante los conciertos. Para cada posición de fuente, se tomaron cuatro posiciones de micrófono, también a una altura de 1,60 m. Debido a la proximidad, la posición del micrófono 4 se excluyó de las grabaciones realizadas con la fuente 3. Esto produce un total de 11 combinaciones fuente-receptor.

Para el registro, se usaron un micrófono Sennheiser Ambeo, una placa de audio RME Babyface y un preamplificador Behringer Ada8200. El método empleado para obtener las respuestas impulso es el barrido senoidal exponencial tradicional (ESE) propuesto por Angelo Farina [6]. Un barrido de 20 segundos de una onda sinusoidal de 20 a 20 kHz generado previamente en Matlab. Para alinear las Respuestas Impulso (RIs), se registró un *loopback*. Es necesario aclarar que en este caso particular se usó un emisor direccional en cuatro orientaciones correspondientes a cuatro rotaciones de 90 grados (F-B-L-R por sus siglas en inglés). Los barridos fueron grabados por el micrófono Ambisonics en formato A. Las RIs se obtuvieron al convolucionar las grabaciones de barrido con el filtro inverso. Estas se codificaron en Matlab del formato A al formato B. Con el formato B, se realizó una decodificación en seis direcciones ortogonales: frontal, posterior, izquierda, derecha, arriba y abajo (F-B-L-R-U-D por su siglas en inglés). Además de las respuestas direccionales, se obtuvo una Respuesta Impulso pseudo-omnidireccional a partir de la medición original utilizando los componentes Ambisonics W para cada dirección de altavoz resumida en una señal (la grabación de *loopback* se utilizó en este caso para preservar la coherencia de fase).

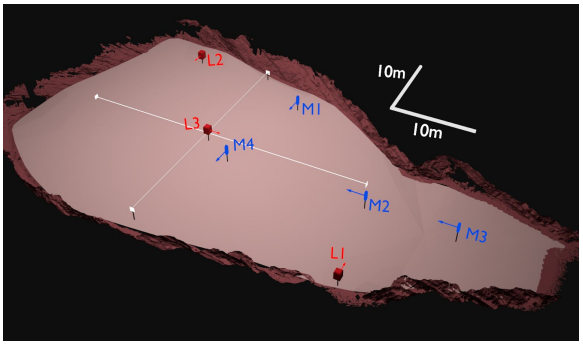

Figura 2: Planta del Anfiteatro que muestra el contorno escaneado y las posiciones de Fuentes (L1,L2,L3) y Micrófonos (M1,M2,M3,M4), indicando la dirección frontal (F) con una flecha. La entrada al recinto se encuentra localizada en la esquina inferior derecha de la imagen.

Para la simulación numérica utilizamos un modelo geométrico aproximado del Anfiteatro, y la implementación del método de trazado de rayos del módulo de acústica de Comsol Multiphysics (versión 5.3a). En la Figura 3 se muestra una vista esquemática del modelo con la planta del Anfiteatro, orientada aproximadamente en la misma dirección de la Figura 2. El perfil de las paredes fue reconstruido a partir de medidas *in situ* con un telémetro láser (Bosch GLM250). Las fuentes y los receptores fueron ubicados en las mismas posiciones que las utilizadas en las medidas acústicas. Las condiciones de borde en las paredes y el piso fueron de reflexión difusa (ley de Lambert) y en la abertura superior y de entrada de paso libre (sin reflexiones). Los rayos fueron emitidos de la fuente en orientaciones aleatorias, siguiendo una distribución lambertiana en cada una de las cuatro direcciones del plano horizontal y computados en los detectores (micrófonos) según la dirección de arribo (cuatro cuadrantes para cada una de las direcciones del plano horizontal y hemisferios superior e inferios para la dirección vertical). Se emitieron 300 mil rayos para cada fuente y orientación de la misma a fin de lograr una estadística razonable. No se computó la fase de los rayos y se utilizó un coeficiente de absorcion uniforme de a=0.185, ajustado para obtener un tiempo de reverberación similar al del Anfiteatro. A partir de la información de los rayos de intensidad, tiempo y sitio de arribo en los detectores, pudo aproximarse la integral de Schroeder para el cálculo de los tiempos de reverberación, la claridad y el centro temporal.

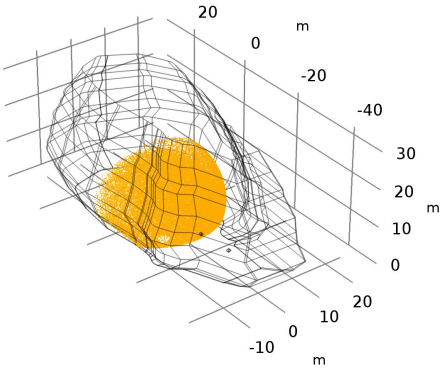

Figura 3: Vista esquemática del modelo 3D del Anfiteatro y simulación de rayos emitidos desde la posición de fuente L3 hacia la entrada del anfiteatro a t=50 ms.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Figuras 4-6, muestran los resultados obtenidos en grabaciones dentro del recinto y su contraparte en la simulación numérica de cada caso, para tres parámetros acústicos relevantes relacionados con los aspectos temporales de las RIs: el tiempo de reverberación tradicional RTRH (obtenido de la parte del decaimiento con el coeficiente de correlación lineal más alto RH en términos de dB por segundo), el Centro Temporal TS (el primer momento de la RI) y el índice de Claridad C50 en dB. En todos los casos mostramos las once combinaciones de posición de parlante (L) y micrófono (M) en diferentes paneles, y en cada panel las cuatro direcciones de fuente y las seis direcciones de receptor decodificadas. Como referencia, el parámetro acústico obtenido para el caso omnidireccional se muestra en el título de cada panel.

3.1 Tiempo de reverberación (RT)

Fuente L1: en las RIs obtenidas en el Anfiteatro, los valores de RT están comprendidos en un rango entre 2.2 y 2.5 segundos para las posiciones M1, M2 y M4; disminuyendo en el sector de entrada al recinto donde RT es de aproximadamente 1 segundo (M3). Estas caracteristicas se visiblizan de modo mas homogeneo en la simulación (Figura 4b) al no presentarse cambios significativos entre M1-M4. Analizando la direccionalidad en M1, se observa una mayor variación para las direcciones L-R (~1 y ~3 segundos) que corresponden a la parte frontal y posterior del Anfiteatro, respectivamente (ver Figura 2). Es notable que esto se observa para todas las orientaciones de la fuente, lo que podría indicar que hay un decaimiento temporal secundario más extenso en la parte posterior del anfiteatro (probablemente generada por una chimenea de piedra que quedó como resultado de que el Anfiteatro fue en un tiempo anterior una cascada de agua). Este decaimiento secundario puede ser excitado del mismo modo por todas las direcciones de la fuente. La respuesta uniforme de RT con respecto a la orientación de la fuente se ve mejor para M3, que al estar en la grieta de entrada probablemente tome un promedio de decaimientos múltiples. En M4, se presenta una RT más elevada, que muestra un tiempo de caída máximo cuando se dirige hacia la parte posterior del anfiteatro.

Fuente L2: en este caso, los valores de RT permanecen alrededor de los 2 segundos para todas las fuentes, pero se observa una mayor heterogeneidad direccional en M1, probablemente debido a la proximidad a la fuente. El aumento en el RT medido en M3 en comparación con la fuente L1 es notable, excepto cuando la fuente apunta hacia la entrada (L1R). Las posiciones en el eje central, M2 y M4 muestran un valor más bajo de RT y son relativamente homogéneas con respecto a las direcciones. En la simulación, los valores de RT en función de la posición del receptor se mantienen idénticos a las muestras obtenidas en el Anfiteatro (siendo M3 la posición con mayor RT), sin embargo la proximidad entre fuente y receptor no presenta tanta heterogeneidad como en la grabación.

Fuente L3: tanto en la grabacion como en la simulación, la disminución de RT es notoria cuando el receptor se aleja de la fuente, especialmente en la grieta de entrada al Anfiteatro (M3). En cuanto a los valores direccionales, obtenidos *in situ*, muestran una gran heterogeneidad según la posición de la fuente. Cuando esta es direccionada hacia atrás (L3B) se observa una pérdida de RT independientemente de la directividad del receptor en M1. El caso inverso ocurre para M3 cuando la fuente es direccionada hacia el lado derecho (L3R) donde se percibe un aumento de RT del orden de 5 segundos. Para la simulación estas referencias se mantienen pero las variantes de RT en relación a la dirección, no superan los 2 segundos.

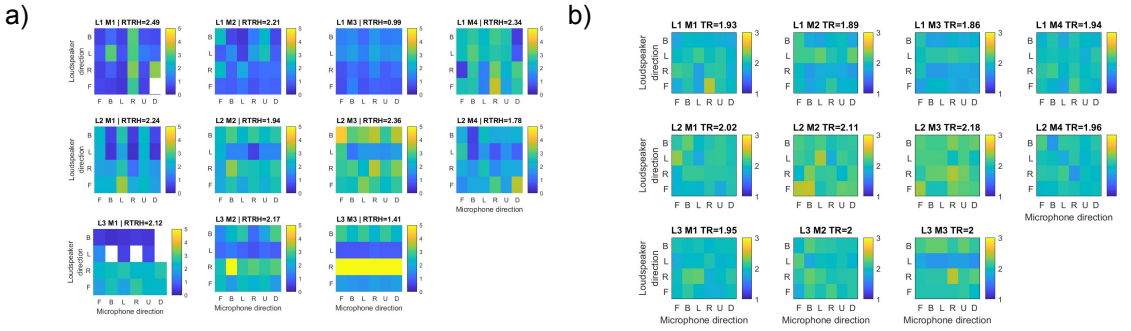

Figura 4: Tiempos de Reverberación (RT) en segundos, obtenidos de: **(a)** las RIs del recinto, ponderados-A y **(b)** la simulación numérica. En cada panel se muestran las tres posiciones de fuente (L1,L2,L3) en filas y las cuatro posiciones de Micrófono (M1, M2, M3, M4) en columnas, descartando la combinación (L4,M4). En cada gráfico se indica el valor obtenido para el par fuente/micrófono omnidireccional en la parte superior y en escala de colores los valores direccionales para las 24 combinaciones posibles de orientaci[on de fuente (frente, atrás, izquierda, derecha; F-B-L-R por sus siglas en inglés) y micrófono (frente, atrás, izquierda, derecha, arriba, abajo; F-B-L-R-U-D por sus siglas en inglés), como se describe en el texto.

3.2 **Centro Temporal (TS)**

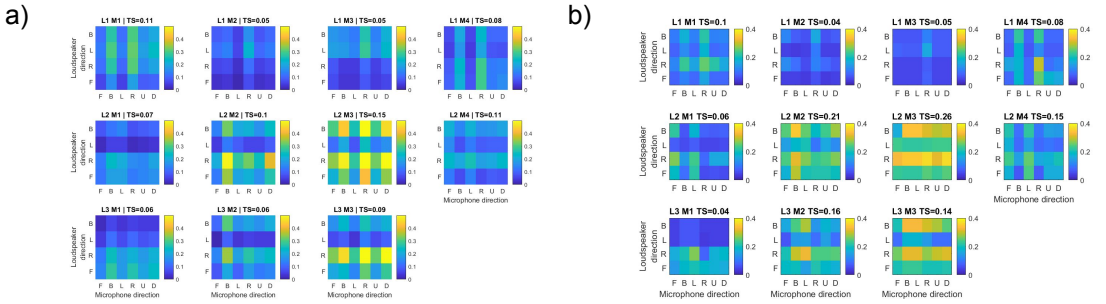

Figura 5: Centros Temporales (TS) en segundos, derivados de las medidas acústicas en el Anfiteatro, ponderados A **(a)** y de las simulaciones numéricas **(b)**, para las tres posiciones de Fuente y las cuatro de Micrófono, tal como está descripto al pie de la Figura 4.

Fuente L1: En ambos casos, los valores de TS son más altos para las posiciones del receptor más alejadas de la fuente (M4 y M1), mientras que para las posiciones en la entrada del recinto disminuyen a 50 ms, probablemente debido a la preponderancia del sonido directo. Para las posiciones más cercanas al receptor (M2 y M3) el TS disminuye cuando la fuente apunta hacia él, mientras que para el caso opuesto,, se presentan valores superiores a 300 ms (este último es mucho mas notorio en las grabaciones realizadas en el recinto que en la simulación numérica). El par L1-M2 se presenta como el más homogéneo en todas sus direcciones y del valor más bajo de todas las muestras estudiadas a partir de las RIs obtenidas, mientras el par L1-M3 presenta estas características en la simulación numérica.

Fuente L2: En este caso, los valores más altos (M2, M3 y M4) de TS se presentan para todas las muestras relevadas, con la excepción de M1, posiblemente debido a la proximidad a la fuente. También vale la pena señalar que, para todos los casos, cuando L2 es direccionada hacia la izquierda, es decir, hacia una concavidad localizada a la derecha del

recinto (ver Figura 2), hay una disminución considerable en TS, mucho mas notoria en las grabaciones realizadas en el recinto que en la simulación numérica, pero clara en ambos casos. El par L2-M3 es el que muestra la mayor heterogeneidad, al comparar las diferentes direcciones fuente-receptor. Los valores de más de 400 ms se presentan cuando se dirige la fuente hacia las paredes de la parte trasera y parte posterior del recinto.

Fuente L3: En las muestras *in situ*, los micrófonos más cercanos a esta fuente (M1 y M2) mantienen un bajo valor de TS, denostando valores levemente mas elevados en comparación a los obtenidos de la simulación (ver Figura 5b). Este valor aumenta 30 milisegundos en M3 ya que es el sector más alejado de la fuente. Al dirigir la fuente hacia la izquierda, se observa una disminución en TS para los receptores cerca de la grieta de entrada del Anfiteatro (M2 y M3) y un aumento considerable (en algunos casos superior a 300 ms) al dirigir la fuente hacia la derecha (L3R) especialmente para el receptor más alejado (M3).

3.3 **Claridad (C50)**

En las muestras obtenidas en el recinto, es notoria una correlacion entre los valores de C50 y TS. Los valores de TS más altos (>100ms) corresponden a índices de claridad alrededor de 0 dB, mientras que los valores de TS más bajos dan como resultado valores de C50 cercanos a 5 dB. Los índices obtenidos a partir de la simulacion numérica muestran valores considerablemente más bajos, sin embargo mantienen relaciones similares entre sí.

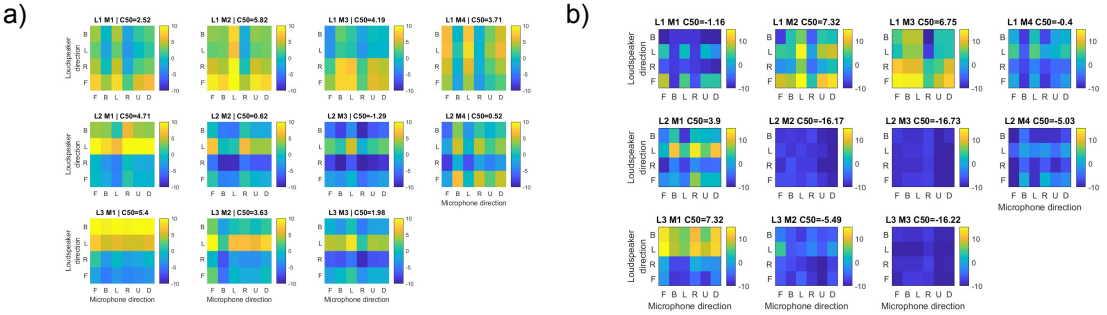

Figura 6: Indices de Claridad (C50) en escala de decibeles, derivados de las medidas acústicas en el Anfiteatro, ponderados A **(a)** y de las simulaciones numéricas **(b)**, para las tres posiciones de Fuente y las cuatro de Micrófono, tal como está descripto al pie de la Figura 4.

Fuente L1: Como era esperable, se obtuvieron índices de claridad más altos para las posiciones de micrófono más cercanas a la fuente (M2 y M3), con valores que superan los 3 dB para las grabaciones en el recinto, disminuyendo a medida que el receptor se aleja de la fuente. Esta posición de origen es la que tiene los mejores índices de claridad promediados sobre todas las posiciones de receptor. Sin embargo, para M4 (centro) hay valores de claridad por debajo de 0 dB al direccionar la fuente hacia la parte posterior del anfiteatro. Se obtiene un resultado llamativo para M3 al ser orientado hacia atrás. Incluso cuando esta dirección es opuesta a la ubicación de la fuente, los valores de claridad son altos. Si bien en la simulación, los valores que se muestran están muy por debajo en relación a los obtenidos en el Anfiteatro (M1, M2 y M4), las relaciones entre las diferentes posiciones y direcciones de la fuente y receptor mantienen las mismas características, mostrándose en valores muy similares para la posición de receptor M3.

Fuente L2: En este caso se muestran valores más desfavorables de C50, (por debajo de 1 dB en las grabaciones y entre 1 y -10dB para la simulación en M2 y M4) y negativos en

otros (M3). Sólo se obtiene un valor positivo superior a 2 dB para el receptor cercano a la fuente (M1). Al dirigir la fuente hacia la derecha (extremo posterior del anfiteatro), se nota claramente una disminución de C50 en todas las posiciones del receptor.

Fuente L3: Esta es la posición de origen que expone mayor heterogeneidad con respecto a la orientación. La intensidad del sonido directo parece dominar la respuesta, y esto proporciona los valores más altos de claridad cuando la fuente se dirige hacia el micrófono.

4. **CONCLUSIONES**

El análisis de los parámetros que surgen de las RIs direccionales (tanto desde la fuente como desde el receptor) nos permitió evaluar la acústica del anfiteatro sin asumir la condición de campo sonoro difuso. De hecho, a partir de las fuertes diferencias observadas en los parámetros acústicos con respecto a la orientación de la fuente o el receptor, es evidente que esta condición no se verifica. Además, este análisis fue útil para determinar que L1 es la ubicación de origen que mejor se aproxima a esta condición, ya que fue la posición de parlante con menor variación en los parámetros, con respecto a su orientación. Sin embargo, incluso en este caso, la orientación del micrófono fue influyente, especialmente en términos de claridad. Vale la pena señalar que esta ubicación es la preferida por los ejecutantes solistas en el Anfiteatro. Por otro lado, la posición L2 tiene los valores de RT más cercanos a una sala de conciertos (aproximadamente 2 segundos para todas las ubicaciones de receptores), pero tiene una mayor heterogeneidad y valores de claridad muy pobres (con la excepción de M1 ubicado más cerca de la fuente). Esta posición es utilizada por pequeños conjuntos de músicos como escenario. Finalmente, la ubicación en el centro del Anfiteatro (que se usa con frecuencia para actuaciones de orquesta y coro) es la menos favorecida en términos de heterogeneidad y respuesta desigual con respecto a la orientación.

Algunos de estos aspectos pudieron verse reflejados en la simulación numérica que, si bien arrojó valores globales con menor índice de claridad y menor dependencia de la reverberación con la direccionalidad, muestra un patrón similar de variación en los parámetros acústicos con las posiciones y direcciones de fuente y receptor.

6. **REFERENCIAS**

[1] ISO 3382-1:2009; Acoustics—Measurement of Room Acoustic Parameters. I: Performance Spaces (International Standards Organization, 2009).
[2] Kuttruff, H. *Room Acoustics* Sixth Edition, CRC Press, 2014.
[3] Wenmaekers, R. H. C., Hak, C. C. J. M., Hornikx, M. C. J., and Kohlrausch, A. G. "Sensitivity of stage acoustic parameters to source and receiver directivity : Measurements on three stages and in two orchestra pits," Applied Acoustics, vol. 123, pp 20–28, 2017.
[4] Berzborn, M., and Vorländer, M. "Investigations on the Directional Energy Decay Curves in Reverberation Rooms.," Euronoise 2018, Crete.
[5] Martellotta, F; Álvarez-Morales, L; Girón, S.; Zamarreño, T. "An investigation of multi-rate sound decay under strongly non-diffuse conditions: The crypt of the Cathedral of Cadiz". Journal of Sound and Vibration, vol. 421, pp. 261-274, 2018.
[6] Farina, A. "Advancements in impulse response measurements by sine sweeps" Audio Engineering Society Convention 122, 21, 2007.