

MEDICIÓN, SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE
RESPUESTAS IMPULSIONALES PARA ESPACIOS
ACÚSTICOS CON GEOMETRÍA RECTANGULAR

MEASUREMENT, SIMULATION, AND
EVALUATION OF ROOM IMPULSE RESPONSES
FOR ACOUSTICAL SPACES WITH
RECTANGULAR GEOMETRY

JOSUÉ ABARCA LÓPEZ¹

ALEJANDRO DELGADO CASTRO²

Received: 06/May/2024; Accepted: 28/Oct/2024

Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones is licensed under a Creative Commons
Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 International License.
Creado a partir de la obra en <http://www.revistas.ucr.ac.cr/index.php/matematica>



¹ Universidad de Costa Rica, Sección de Ingeniería Eléctrica, Liberia, Costa Rica.
E-Mail: josue.abarcalopez@ucr.ac.cr

² Misma dirección que/Same address as ¹. E-mail: alejandro.delgadocastro@ucr.ac.cr

Resumen

En este estudio se selecciona un espacio físico con geometría rectangular y se realiza un análisis comparativo entre los parámetros acústicos generados a partir de la medición *in situ* de sus respuestas impulsionales, utilizando un parlante unidireccional y los parámetros acústicos obtenidos a partir de métodos numéricos en un programa de simulación, donde se utiliza un parlante omnidireccional como fuente de sonido. Se evalúa también el posible beneficio de aproximar una fuente sonora omnidireccional mediante la rotación de una fuente unidireccional en el plano horizontal. Los resultados obtenidos indican que las mediciones realizadas con el parlante unidireccional permiten obtener una caracterización general de la acústica del espacio, con niveles de error que podrían ser tolerados, sobre todo a frecuencias medias, con la ventaja de tener un costo menor.

Palabras clave: acústica de espacios; respuestas impulsionales; mediciones acústicas; simulación de espacios acústicos; parámetros acústicos.

Abstract

In this paper, a closed room with rectangular geometry is selected, in which a comparative study is performed between the acoustical parameters, obtained from the measured room impulse responses using a directional loudspeaker as the sound source, and those generated by numerical methods within a simulation software, where the sound source is omnidirectional. The benefit of approximating an omnidirectional source by the rotation on the horizontal plane of a directional source is also evaluated. Results presented here indicate that the directional loudspeaker can be used to obtain a general characterization of the acoustics of the room, with error levels that are tolerable, particularly for midrange frequency bands, with the advantage of representing a low-cost alternative.

Keywords: room acoustics; room impulse responses; acoustical measurements; room acoustics simulation; acoustical parameters.

Mathematics Subject Classification: Primary: 76-10.

1. INTRODUCCIÓN

La acústica de espacios estudia la forma en la que el sonido se propaga dentro de un volumen cerrado, lo cual la enlaza con otras áreas como la música y la arquitectura, pues los principios científicos que gobiernan este fenómeno permiten diseñar espacios que brinden una adecuada experiencia auditiva a las personas que lo utilizan para una determinada actividad [2].

Ahora, para caracterizar acústicamente un espacio se sigue un proceso que consta de tres etapas: estudio previo, medición *in situ* y procesamiento de los resultados. El estudio previo consiste en recopilar información relevante sobre el espacio: su forma, sus dimensiones, y el tipo de materiales utilizados en sus superficies. Las mediciones *in situ* hacen referencia al proceso de registrar las respuestas impulsionales del espacio, mientras que la tercera etapa consiste en procesar la información para extraer una serie de parámetros que permiten caracterizar la acústica del espacio [4].

Los espacios acústicos se modelan como sistemas lineales e invariantes con el tiempo (LTI), donde la respuesta del espacio está dada por la siguiente ecuación:

$$y(t) = x(t) * h(t), \quad (1)$$

donde la respuesta del sistema recibida por el oyente o receptor $y(t)$ es el resultado de la convolución entre la señal de excitación del sistema $x(t)$ y la respuesta impulsional del espacio $h(t)$. La respuesta impulsional $h(t)$ se puede obtener a partir de la deconvolución de las señales registradas tanto en el emisor como en el receptor, donde $x(t)$ es conocida y $y(t)$ se puede registrar con un micrófono. La respuesta impulsional obtenida brinda información sobre el sonido directo y sus reflexiones tempranas y tardías, por lo que resulta útil para estimar parámetros como el tiempo de reverberación, la claridad y la definición del espacio en cuestión, como se detalla en el estándar ISO 3382 [5].

En este estudio se caracteriza la acústica de un espacio con geometría rectangular, por medio del análisis de los parámetros acústicos obtenidos a partir de la medición *in situ* de su respuesta impulsional, utilizando un parlante unidireccional como fuente de sonido. Posteriormente, se realiza una simulación en computadora, usando un parlante omnidireccional como fuente sonora, que permite obtener los mismos parámetros a partir de la solución de las ecuaciones lineales que modelan la intersección de las ondas sonoras con una serie de polígonos, los cuales a su vez modelan el volumen dentro del cual se propaga el sonido [2]. Finalmente, se realiza una comparación entre los resultados, con el fin de conocer el impacto de usar un parlante unidireccional en la caracterización acústica del espacio. Se explora también el posible beneficio de aproximar una fuente omnidireccional (parlante dodecaedro) mediante la rotación de una fuente unidireccional, de forma similar a como se propone en [7].

2. PARÁMETROS ACÚSTICOS

Los parámetros acústicos se obtienen a partir de la respuesta impulsional del espacio y permiten conocer la forma en la que el sonido se propaga dentro de él. Estos se utilizan para evaluar si las condiciones del espacio son buenas o malas para una cierta actividad dependiendo de la experiencia auditiva esperada [3].

2.1 Tiempo de reverberación. Es el tiempo que tarda el nivel de sonido en disminuir 60 dB a partir del momento en que la fuente de sonido se detiene [9]. Usualmente se denota como RT60, se mide en segundos, y se obtiene para un conjunto de octavas con frecuencias centrales de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz. En muchos casos el ruido es elevado y no permite observar claramente un decaimiento de 60 dB en el nivel de sonido, por lo que el tiempo de reverberación se estima a partir de un decaimiento de 20 dB o 30 dB, en cuyo caso, el parámetro se denota como RT20 o RT30, o simplemente T20 o T30, respectivamente. El tiempo de reverberación depende de la forma en la que se comporta el sonido directo, que es la primera componente de energía contenida en la respuesta impulsional, así como de sus reflexiones tempranas y tardías. Es a partir de estas componentes que se obtiene la *Curva de Decaimiento de Schroeder*, que luego es utilizada para estimar el tiempo de reverberación.

2.2 Claridad. Es la relación entre la energía sonora que llega durante los primeros t ms y la energía sonora que arriba luego de ese instante, en escala logarítmica [1]. La claridad mide la capacidad de un espacio para reflejar el sonido de manera temprana y contribuir a la nitidez y entendimiento del habla o de la música. Se diferencian dos claridades: la de la voz (C50) y la de la música (C80), donde cada una asigna un valor en concreto para el instante t en ms [9]. Las ecuaciones (2) y (3) resumen lo anterior:

$$C50 = 10 \log \left(\frac{\int_0^{50\text{ms}} h(\tau)^2 \cdot d\tau}{\int_{50\text{ms}}^{\infty} h(\tau)^2 \cdot d\tau} \right), \quad (2)$$

$$C80 = 10 \log \left(\frac{\int_0^{80\text{ms}} h(\tau)^2 \cdot d\tau}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} h(\tau)^2 \cdot d\tau} \right). \quad (3)$$

Si la claridad es alta, se deduce que la mayoría de la energía provino del sonido directo, lo cual indica bajas reflexiones de ondas sonoras. Por otro lado, una baja claridad indica que la mayor cantidad de energía provino de los rebotes de las ondas, lo que provoca un sonido menos inteligible.

2.3 Definición. Mide la relación entre la energía sonora que llega al receptor dentro de los primeros t ms y la energía sonora total emitida [9]. Se distinguen dos definiciones: D50 para cuando t es de 50 ms, y D80 para t igual a 80 ms. Esto se resume en las ecuaciones (4) y (5):

$$D50 = 10 \log \left(\frac{\int_0^{50\text{ms}} h(\tau)^2 \cdot d\tau}{\int_0^{\infty} h(\tau)^2 \cdot d\tau} \right), \quad (4)$$

$$D80 = 10 \log \left(\frac{\int_0^{80\text{ms}} h(\tau)^2 \cdot d\tau}{\int_0^{\infty} h(\tau)^2 \cdot d\tau} \right). \quad (5)$$

Para cualquier sala, y en cualquier punto de esta, la definición debe ser mayor a 0.5 para asegurar una correcta inteligibilidad del sonido [1]. En muchas ocasiones la definición acústica se expresa como un porcentaje.

3. METODOLOGÍA

En este trabajo se estudian espacios acústicos con geometría regular. En este caso, el volumen de un paralelepípedo resulta conveniente, tanto para medir sus respuestas impulsionales como para su correspondiente simulación. Por ello, el lugar seleccionado para realizar el estudio es el aula de Audiovisuales #2, ubicada en la biblioteca de la Sede de Guanacaste, Universidad de Costa Rica, cuyas dimensiones y geometría se pueden observar en la Figura 1. El presente estudio se realiza con la sala vacía.

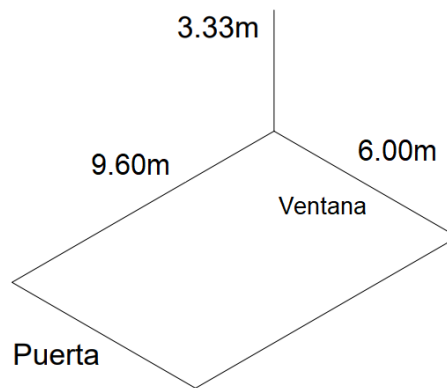


Figura 1: Dimensiones del espacio acústico seleccionado.

Las mediciones *in situ* de las respuestas impulsionales del espacio se realizan por medio del software *Room EQ Wizard* (REW)¹, el cual permite también estimar los parámetros acústicos a partir de cada respuesta impulsional. Como fuente de sonido se utiliza un parlante unidireccional modelo PORTA 8, montado sobre un pedestal KSS500, ambos de la marca Köhlt. El parlante cuenta con un transductor de bajos de 8 pulgadas de diámetro y otro para altos con diámetro de 1 pulgada. En total, las dimensiones del parlante son 31 cm x 30 cm x 43 cm, y su peso es de 8.2 kg. El pedestal es de tipo tripié y posee una altura máxima de 2 m. El sonido es registrado por un micrófono de análisis modelo ECM8000 de la marca Behringer. El equipo se enlaza con el computador a través de una interfaz de

¹<https://www.roomeqwizard.com/>

sonido modelo Scarlett 4i4 de la marca FocusRite. Como señal de excitación se utiliza un barrido senoidal logarítmico, con duración de 5 s, frecuencia inicial de 20 Hz, y frecuencia final de 20 kHz, con el fin de abarcar la totalidad del espectro de frecuencias audibles. Así mismo, se realiza una repetición del barrido por cada medición, considerando una frecuencia de muestreo de 48 kHz, y muestras con formato de 32 bits en punto flotante.

La Figura 2 muestra las dos posiciones seleccionadas para la fuente sonora dentro del espacio (S1 y S2), las cuales corresponden a las zonas donde usualmente se emite mayor parte del sonido durante el uso normal del espacio como sala de audiovisuales.

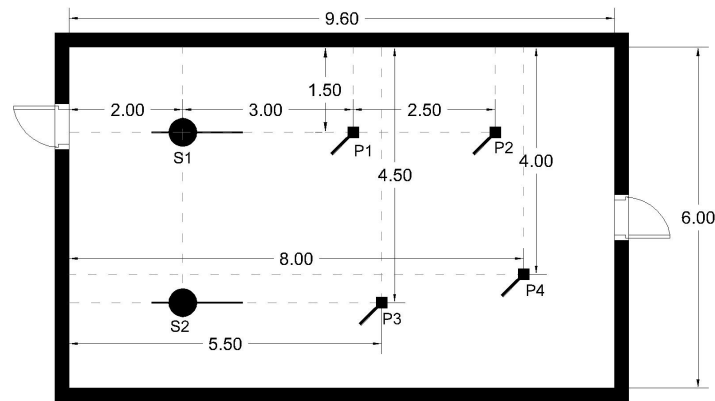


Figura 2: Posiciones para las fuentes sonoras (S1 y S2) y para los micrófonos (P1 a P4) dentro del espacio. Las coordenadas de cada punto están expresadas en metros. En cada punto, el parlante o el micrófono se ubica a una altura de 1.63 m sobre el suelo.

Así mismo, la Figura 2 muestra los cuatro puntos donde se realizan mediciones con el micrófono (P1 a P4), los cuales se encuentran distribuidos en la zona donde normalmente se ubica la audiencia. Con dos posiciones para la fuente y cuatro para el micrófono, se tienen entonces ocho posibles combinaciones fuente-receptor para realizar mediciones dentro de la sala. Esto permite tener una mejor relación señal a ruido y reducir los efectos de las fluctuaciones en la temperatura [7].

La interfaz se calibra mediante una conexión denominada *loopback*, y con los controles frontales se ajusta la intensidad hasta que las ganancias tanto de la entrada como de la salida alcancen niveles similares. Para la calibración del micrófono, se utiliza el archivo genérico suministrado por el fabricante². Posteriormente, se

²<https://www.behringer.com/product.html?modelCode=0506-AAA>

coloca la fuente sonora en la posición S1 (en dirección a la ventana) y se mide la respuesta impulsional en las cuatro posiciones previstas para el micrófono (P1 a P4). Luego, se pasa la fuente para la posición S2 (siempre dirigida hacia la ventana) y se vuelven a medir las respuestas impulsionales en las cuatro posiciones para el micrófono. Finalmente, la respuesta impulsional unidireccional se obtiene al promediar las ocho respuestas impulsionales obtenidas, mientras que los parámetros acústicos unidireccionales se obtienen en cada punto de medición por medio del programa REW, a partir de la respuesta impulsional correspondiente a cada punto de medición.

Dado que el parlante utilizado no constituye una fuente omnidireccional, se estudia también una forma de reducir su direccionalidad a partir de lo propuesto por Papadakis *et al.* [7]. En ese estudio se coloca un parlante unidireccional en las mismas posiciones en las que se encuentran las 12 bocinas de un parlante dodecaedro, y se genera una respuesta impulsional por cada posición del parlante, las cuales son promediadas luego. No obstante, dado que los pedestales comerciales no suelen brindar los grados de libertad necesarios para ubicar el parlante en las posiciones requeridas, este debe ser sostenido con las manos entre varias personas durante cada prueba [7].

En el presente estudio, por cada punto de medición se estima también su respuesta impulsional a partir del promedio de las respuestas impulsionales que se obtienen con la fuente unidireccional apuntando en diferentes direcciones. Esto es, por cada punto de medición, el parlante unidireccional se va rotando sobre el plano horizontal en ángulos de 45° en sentido horario, y por cada ángulo se registra una respuesta impulsional (ocho en total). Una vez obtenidas, las respuestas impulsionales se promedian con el fin de obtener la respuesta del punto de medición en cuestión. Esto se repite en cada punto (P1 a P4), considerando las dos posiciones para la fuente (S1 y S2). Luego, se promedian las respuestas impulsionales de cada punto para obtener la respuesta impulsional con direccionalidad reducida. Los parámetros acústicos correspondientes se calculan en cada punto de medición promediando los valores generados por el programa REW a partir de la respuesta impulsional obtenida para cada ángulo de rotación del parlante.

El método propuesto para reducir la direccionalidad del parlante pretende aprovechar el único grado de libertad que posee el pedestal utilizado, y evitar así que el parlante tenga que ser sostenido con las manos. Igualmente, se busca mejorar la reproducibilidad del experimento y eliminar la presencia de personas cerca de la fuente, las cuales podrían introducir superficies adicionales y afectar la propagación del sonido dentro de la sala. Además, la rotación del parlante en ángulos de 45° resulta conveniente porque es un ángulo fácil y rápido de ajustar.

Los parámetros acústicos simulados se obtienen con el software I-SIMPA³, el cual se utiliza para simular espacios complejos con modelos digitales en tres dimensiones mediante la implementación del algoritmo SPPS (Simulación de la Pro-

³<https://i-simpa.univ-gustave-eiffel.fr/>

pagación de las Partículas Sonoras) [8]. El software permite crear proyectos donde se definen las dimensiones del espacio, la ubicación de la fuente y del receptor, así como los coeficientes de absorción de cada una de sus superficies. Para el caso de la sala en estudio, los coeficientes de absorción utilizados se presentan en la Tabla 1. Otros datos necesarios para la simulación son temperatura, presión atmosférica, y porcentaje de humedad. Una vez ingresados los datos, se ejecutan las simulaciones para obtener los parámetros acústicos en cada uno de los puntos de medición definidos dentro de la sala. La Figura 3 muestra los espacios simulados, así como la ubicación de cada fuente y de cada uno de los receptores.

Tabla 1: Coeficientes de absorción utilizados en las simulaciones.

Superficie	Material	Frecuencia Central de Octava (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Frontal	Gypsum	0.3	0.12	0.08	0.06	0.06	0.05
Final	Vidrio Común	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Derecha	Concreto	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
Izquierda	Gypsum	0.3	0.12	0.08	0.06	0.06	0.05
Techo	Fibra Mineral	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Piso	Terrazzo	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02

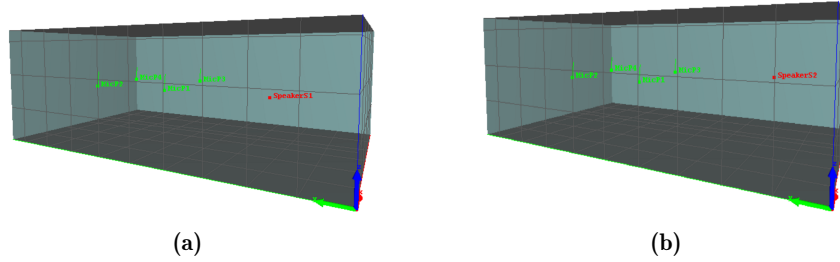
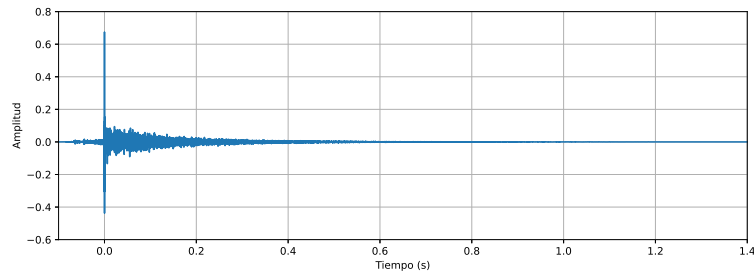


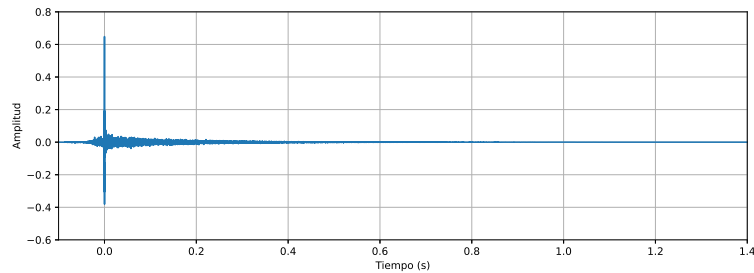
Figura 3: Modelos del espacio seleccionado en el programa I-SIMPA. (a) Espacio con la fuente en posición S1. (b) Espacio con la fuente en posición S2.

4. RESULTADOS

La Figura 4 muestra las respuestas impulsionales registradas *in situ*, tanto para el caso unidireccional como para el caso de direccionalidad reducida (rotación del parlante). Por su parte, la Figura 5 muestra el comportamiento de los parámetros acústicos T30, C50, C80, y D50, obtenidos a partir de las curvas de decaimiento que se estimaron mediante la integración hacia atrás del cuadrado de cada respuesta impulsional registrada *in situ*. Se consideró el método de Lundeby *et al.* [6] para calcular el mejor punto de inicio. La Figura 5 también muestra el comportamiento de los parámetros acústicos obtenidos mediante las simulaciones en I-SIMPA. Dado que el simulador I-SIMPA considera una fuente omnidireccional ideal, la cual



(a)



(b)

Figura 4: Respuestas impulsionales registradas *in situ*. a) Fuente Unidireccional. b) Fuente con Direccionalidad Reducida (Rotación del Parlante).

no se ve afectada por limitaciones constructivas, los parámetros obtenidos de las simulaciones se consideran como referencia para el análisis subsiguiente.

Observando los resultados de la Figura 5, resulta notorio que los parámetros obtenidos a partir de las mediciones unidireccionales presentan una mayor dispersión que los obtenidos a partir de las mediciones con direccionalidad reducida. Por otro lado, existe un comportamiento particular en las bandas de octava con frecuencia central de 125 Hz y de 250 Hz: los parámetros acústicos estimados a partir de las mediciones *in situ* presentan diferencias significativas con respecto a los estimados a partir de la simulación en I-SIMPA. Para la banda con frecuencia central de 125 Hz, el valor promedio de T30 obtenido de las mediciones unidireccionales presenta una diferencia de 0.78 s con respecto al promedio de T30 obtenido con I-SIMPA. Para el caso de las mediciones con direccionalidad reducida, el valor promedio de T30 se desvía 0.80 s del promedio obtenido con I-SIMPA. En la banda con frecuencia central de 250 Hz, estas diferencias en el parámetro T30 son de 0.58 s y 0.57 s, para el caso unidireccional y para el caso de direccionalidad reducida, respectivamente. Así mismo, para los parámetros C50, C80 y D50 se observan diferencias aún mayores en estas mismas bandas de frecuencia. No obstante, para las frecuencias medias, que son aquellas que se encuentran entre los 500 Hz y los

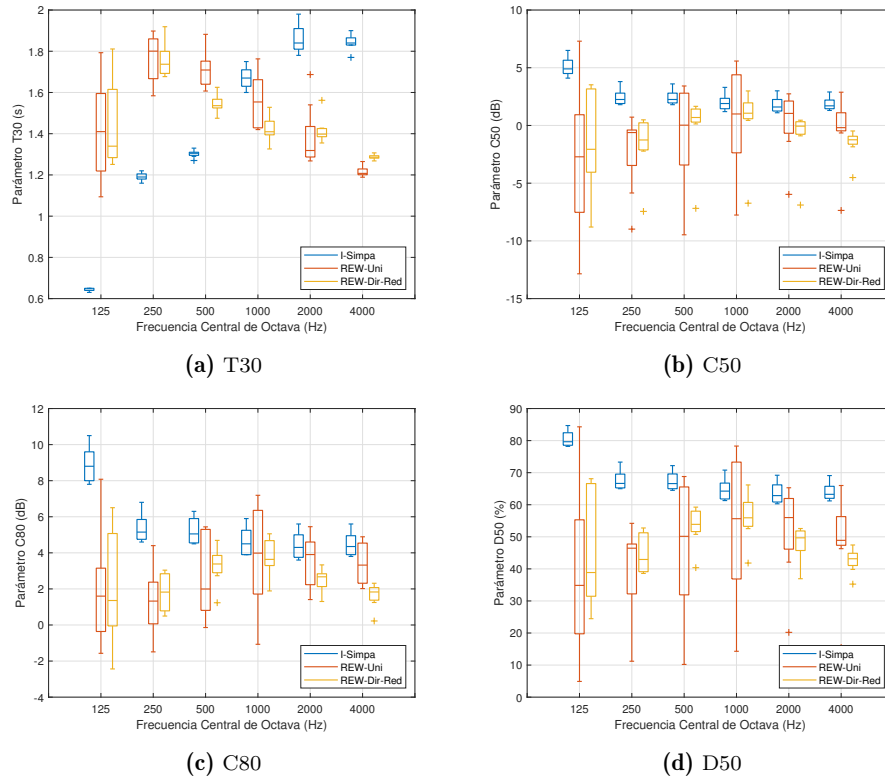


Figura 5: Comparación entre los parámetros T30, C50, C80 y D50 obtenidos a partir de las respuestas impulsionales medidas *in situ* y los resultados de la simulación.

4 kHz, la diferencia entre los parámetros estimados a partir de las mediciones *in situ* y los simulados se reduce; sobre todo para los parámetros C50, C80, y D50.

Lo anterior podría indicar que el uso de una fuente sonora unidireccional en la medición de las respuestas impulsionales de un espacio con geometría rectangular podría significar desviaciones en los valores de los parámetros acústicos. Cuando las mediciones se realizan sin la rotación del parlante unidireccional, y considerando las bandas de octava con frecuencia central a partir de 500 Hz, el porcentaje de error promedio observado es de 24.50 % para T30, 106.29 % para C50, 33.23 % para C80, y 22.98 % para D50. Ahora bien, estos porcentajes de error podrían ser tolerados (sobre todo en el caso de T30) si lo que se desea obtener es una caracterización general de la acústica del espacio y no es posible obtener un parlante omnidireccional debido a su alto costo. Para el caso de las mediciones realizadas con direccionalidad reducida, en las mismas bandas de frecuencia, los porcentajes de error promedio observados son los siguientes: 21.88 % para T30, 127.79 % para C50, 40.77 % para C80, y 23.11 % para D50. Esto indica que el método de rotación del parlante unidireccional en el plano horizontal no permite obtener una clara mejoría en la exactitud de los cuatro parámetros acústicos estudiados. No obstante, como se mencionó anteriormente, la dispersión de los resultados obtenidos con este último método es significativamente menor.

En relación con las diferencias observadas a bajas frecuencias (bandas con frecuencia central de 125 Hz y 250 Hz), una posible causa del comportamiento observado podría estar relacionada con el propio parlante unidireccional utilizado en las mediciones *in situ*. Tras inspeccionar la hoja de características del parlante, se observa que el fabricante establece la frecuencia de corte a bajas frecuencias en 100 Hz, lo cual representa una frecuencia cercana a las bandas de 125 Hz y 250 Hz, mismas que presentan las desviaciones más significativas en los parámetros acústicos. Sumado a esto, en el momento en que se midieron las respuestas impulsionales se percibieron vibraciones importantes en la cobertura plástica del parlante, sobre todo al inicio de cada medición.

Una forma en la que se podría mejorar la exactitud de los parámetros acústicos estimados con el método de direccionalidad reducida, sería considerando también ángulos de elevación. Para ello sería necesaria la incorporación de un mecanismo en el pedestal que permita un grado de libertad adicional, para así poder rotar el parlante en el plano horizontal y, al mismo tiempo, definir ángulos de elevación para capturar de mejor manera los efectos del piso y del techo.

Cabe destacar también que los coeficientes de absorción utilizados son los más próximos que se pudieron encontrar para las superficies identificadas. Sin embargo, estos no fueron propiamente medidos para cada una de ellas, sino que fueron obtenidos de fuentes externas. Un algoritmo como el SPPS depende fuertemente de estos coeficientes para realizar cálculos que le permitan arrojar sus resultados de forma más precisa, por lo cual, si alguno de ellos no corresponde

exactamente con el material que se encuentra en el lugar, la diferencia en los resultados podría aumentar.

Finalmente, es importante apuntar que para llevar a cabo un estudio acústico con apego a la norma ISO 3382 se requiere de equipo costoso y de difícil acceso. Los resultados aquí presentados indican que las mediciones realizadas con un parlante unidireccional de bajo costo permiten obtener resultados con un margen de error que podría ser tolerado, sobre todo en el caso del tiempo de reverberación por lo que esta podría ser una alternativa para brindar un panorama general de la acústica de espacios con geometría rectangular.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizaron mediciones en un espacio con geometría rectangular para obtener sus respuestas impulsionales a partir de una fuente de sonido unidireccional, con el fin de estimar los parámetros acústicos de la sala. Así mismo, se evaluó el posible beneficio de aproximar una fuente sonora omnidireccional mediante la rotación de una fuente unidireccional en el plano horizontal. Se realizó también una simulación del mismo espacio en un software especializado, utilizando una fuente omnidireccional y coeficientes de absorción aproximados para las superficies, para así determinar el impacto que tiene el tipo de fuente en el valor de los parámetros acústicos T30, C50, C80 y D50.

Los tiempos de reverberación obtenidos a partir de las mediciones unidireccionales mostraron un porcentaje de error promedio de 24.50 % en relación con los resultados que arrojó la simulación en computadora para las bandas de octava con frecuencia central entre 500 Hz y 4 kHz. Utilizando el método propuesto con direccionalidad reducida (rotación de la fuente unidireccional en el plano horizontal), el porcentaje de error promedio en la estimación del tiempo de reverberación fue de 21.88 %. Los valores obtenidos para los parámetros C50, C80 y D50 presentaron porcentajes de error mayores, por lo que el método propuesto no aportó una mejora clara en la exactitud de los resultados. Para las bandas con frecuencia central de 125 Hz y 250 Hz se observaron diferencias significativas entre los parámetros acústicos obtenidos a partir de las mediciones *in situ* y los parámetros simulados, debido principalmente a las limitaciones del parlante a esas mismas frecuencias.

Ciertamente, la norma ISO 3382 recomienda el uso de una fuente omnidireccional para la medición de respuestas impulsionales en recintos cerrados, pero estos parlantes suelen tener un elevado precio de venta en el mercado. Con este trabajo se concluye que las mediciones realizadas con un parlante unidireccional permiten obtener parámetros acústicos con niveles de error que podrían ser tolerados, especialmente cuando se desea obtener una caracterización general de la acústica de un espacio con geometría rectangular a un menor costo.

Para futuros estudios, se recomienda el uso de un parlante que permita obtener una mejor respuesta a bajas frecuencias, de tal manera que los sonidos bajos pue-

dan ser reproducidos con la intensidad correcta y evitar vibraciones no deseadas de su caja acústica. Así mismo, se recomienda desarrollar un pedestal que permita rotar el parlante unidireccional en el plano horizontal y fijar ángulos de elevación. Finalmente, para aumentar la precisión de la simulación en la computadora, se podrían calcular los coeficientes de absorción para los materiales de las superficies que conforman el espacio en estudio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Sede Regional de Guanacaste de la Universidad de Costa Rica por el apoyo brindado a esta iniciativa de investigación, en particular, por el acceso al espacio físico utilizado para realizar las mediciones acústicas, y para el procesamiento de los datos.

REFERENCIAS

- [1] F. Andriollo, F. Spitale y L. García, *Análisis de respuestas impulsivas de recintos*. 2011.
- [2] R. Bader, ed., *Handbook of Systematic Musicology*. 6.^a ed. Springer-Verlag GmbH, 2017. DOI: [10.1007/978-3-662-55004-5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-55004-5)
- [3] C. L. Christensen, G. Koutsouris y J. H. Rindel, *The ISO 3382 parameters: Can we simulate them? Can we measure them?* International Symposium on Room Acoustics. 2013.
- [4] S. Girón y A. Álvarez Corbacho, *Patrimonio Sonoro de los Teatros Romanos*. IV Foro Internacional de Teatros Romanos: Conservación Uso y Gestión de los Lugares Antiguos de Espectáculos. 2019.
- [5] International Organization for Standardization, *3382-2:2008: Acoustics — Measurement of room acoustic parameters. Part 2: Reverberation time in ordinary rooms*. Inf. téc. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2008.
- [6] A. Lundeby, T. E. Vigran, H. Bietz y M. Vorländer, *Uncertainties of Measurements in Room Acoustics*. Acta Acustica united with Acustica **81**(1995), no. 4, 344-355.
- [7] N. M. Papadakis, A. Serras y G. Stavroulakis, *Mimicking the Sound Field of a Dodecahedral Loudspeaker by a Common Directional Loudspeaker for Reverberation Time Measurements*. Euronoise. 2018.
- [8] J. Picaud y N. Fortin, *SPPS, a Particle-Tracing Numerical Code for Indoor and Outdoor Sound Propagation Prediction*. Acoustics 2012 Nantes (2012).
- [9] M. Queiroz et al., *AcMus: an open, integrated platform for room acoustics research*. Journal of the Brazilian Computer Society **14**(2008), no. 3, 87-103. DOI: [10.1007/BF03192566](https://doi.org/10.1007/BF03192566)