

DETERMINACIÓN TRIDIMENSIONAL DEL CAMPO ACÚSTICO DE UN MODELO URBANO A ESCALA

THREE-DIMENSIONAL ACOUSTIC FIELD DETERMINATION OF AN URBAN SCALE MODEL

Laura Angélica Lancón Rivera

Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, México
lalancon@yahoo.com.mx

Elisa Garay Vargas

Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, México
elisagaray@gmail.com

Ernesto Rodrigo Vázquez Cerón

Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, México
ervc@azc.uam.mx

Luis Jorge Jiménez Garduño

Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, México
jorgepd1895@hotmail.com

Brenda Viridiana Toledo Jiménez

Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, México
brendavtoledo@hotmail.com

Recepción: 21/octubre/2019

Aceptación: 2/diciembre/2019

Resumen

La acústica ambiental cuantifica el nivel sonoro equivalente para obtener la media energética de una onda sonora y estudiar sus efectos con el entorno. El modelo a escala refiere un cañón urbano, construido con bloques de madera, bajo condiciones controladas de ruido en una cámara semianecoica, a fin de determinar la distribución acústica mediante la generación y registro de ondas sonoras. Este trabajo considera parámetros generales para cualquier posible configuración arquitectónica en función del ancho y altura. La instrumentación implementada, con un ancho de banda de 500 a 16000 Hz, genera señales con un contenido de frecuencia específico mediante fuentes sonoras distribuidas sobre una base amortiguada. El registro de las señales se lleva a cabo en diferentes posiciones sobre la base para determinar e interpolar el nivel sonoro equivalente, el cual es

utilizado para representar tridimensionalmente un mapa acústico. El resultado obtenido identifica diferencias de intensidad en las zonas.

Palabras Claves: Campo acústico, cañón urbano, interpolación, nivel sonoro equivalente.

Abstract

Environmental acoustics quantifies the equivalent sound level to obtain the energy average of a sound wave and study its effects with the environment. The scale model refers to an urban cannon, constructed with blocks of wood, under controlled noise conditions in a semi-anechoic chamber, to determine the acoustic distribution by generating and recording sound waves. This work considers general parameters for any possible architectural configuration depending on the width and height. The instrumentation implemented, with a bandwidth of 500 Hz to 16000 Hz, generates signals with specific frequency content by means of distributed sound sources on a damped base. The recording of signals is carried out in different positions of the base to determine and interpolate the equivalent sound level, which is used to represent three-dimensionally acoustic map. The result obtained identifies intensity differences in the zones.

Keywords: Acoustic field, interpolation, equivalent sound level, urban cannon.

1. Introducción

Las líneas de conocimiento de la acústica arquitectónica, urbana y ambiental consideran el análisis y procesamiento de las señales generadas por fuentes sonoras, las cuales interactúan con el espacio urbano para determinar la media energética de una señal acústica sobre una posición en particular. De esta manera, la superposición de la presión sonora de los diferentes ruidos, registrada en un punto de medición, es promediada en función del tiempo para cuantificar el parámetro referido como nivel sonoro equivalente, L_{eq} , definido por la ecuación 1.

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{1}{T} \int_0^T P_A^2(t) dt}{P_{ref}^2} \right) \quad (1)$$

Donde:

$P_A(t)$: Presión acústica en función del tiempo registrado por un micrófono

P_{ref} : Presión de referencia de $20 \mu Pa$, considerada presión mínima audible

T : Intervalo de tiempo en el cual se registró la señal acústica.

La figura 1, muestra el proceso de conversión entre una señal acústica registrada y la determinación del nivel sonoro equivalente. Este proceso toma en cuenta el tiempo de registro necesario para alcanzar condiciones estacionarias en el proceso de medición, así como mantener una alta relación señal a ruido.

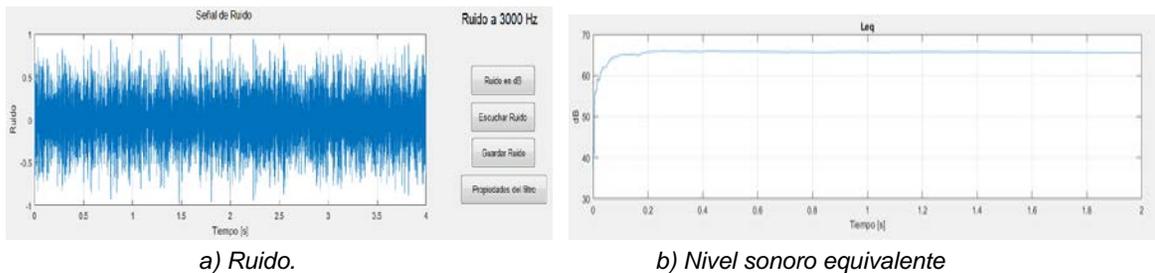


Figura 1 Proceso de conversión entre el ruido y el nivel sonoro equivalente.

La acústica arquitectónica utiliza el nivel sonoro equivalente para analizar el efecto auditivo en el diseño de un espacio urbano, así como estudiar los efectos de los materiales con el cual fue construido, ya que a su vez los coeficientes de absorción, reflexión, transmisión y absorción se encuentran directamente relacionados con la propagación de la onda sonora. De esta manera la cuantificación de este parámetro contribuye al diseño estructural para propiciar un espacio de confort [Linares, 2008]. Este tipo de estudio no está regulado en el campo de la construcción, sin embargo, es necesario para clasificar zonas urbanas en las cuales el ruido ambiental se vuelve parte de la actividad cotidiana. Es importante resaltar que este escenario genera problemas de salud a largo plazo, debido una situación de constante estrés o la interrupción del tiempo de descanso.

Bajo esta situación es difícil deducir la percepción de la comunidad para considerar un ambiente ruidoso, ya que a pesar de que puede ser cuantificado varía el juicio subjetivo de cada una de las personas. Un criterio para clasificar un espacio ruidoso

depende de la reacción de las personas, por ejemplo, si el nivel de ruido se encuentra por debajo de los 45 dB, no se suponen quejas de las personas, si está entre 45 y 55 dB podrían darse quejas espontaneas, entre 50 y 60 dB se esperan muchas quejas, entre 55 y 65 dB se consideran realizar acciones por parte de la comunidad y más de 65 dB existen demandas a fin de contrarrestar el ruido [Kinsler, 1995]. Este tipo de estudios ha tomado la atención para establecer normas que definen la medición y valoración de un ambiente sonoro en base a la respuesta humana generada por el ruido audible [ISO 1996-1, 2016], [ISO 1996-2, 2017]. Con ello se han desarrollado técnicas para medir el mapa sonoro de una zona urbana, clasificar zonas ruidosas, además de diseñar elementos y promover el uso de diversos materiales en el espacio arquitectónico y urbano con el objeto de contrarrestar el ruido ambiental.

La medición del nivel sonoro equivalente en la práctica es compleja debido a toda la instrumentación requerida para llevar a cabo el registro de las señales, además de no tener un control sobre las fuentes de ruido. De aquí que el uso de un modelo a escala permite analizar el efecto de propagación para diferentes contenidos de frecuencia a partir de la distribución de fuentes sonoras sobre diversas configuraciones y material utilizado. Por otro lado, el registro simultáneo de señales en diferentes puntos establece una metodología para representar el campo acústico.

El someter el modelo a escala dentro de una cámara semianecóica genera condiciones controladas de ruido ambiental y eléctrico para enfocar la interacción del sonido con su entorno. La instrumentación utilizada facilita el registro y procesamiento de las señales para tomar en cuenta diferentes contenidos de frecuencia, intensidad y duración del ruido generado. Con ello, el escalamiento en el modelo urbano, la frecuencia de muestreo y el rango de operación del equipo definen los parámetros de análisis.

Este trabajo describe una metodología para la obtención de un mapa acústico tridimensional considerando un modelo urbano a escala que representa una avenida, comúnmente referido como cañón urbano.

2. Métodos

Cañones urbanos escala 1:40, fueron construidos a partir del uso de bloques de madera comprimida (MDF) al interior de una cámara semianecóica, a fin de simular avenidas con variación de factores en relación a su configuración arquitectónica, tales como altura y ancho de los cañones, figura 2. Los modelos urbanos a escala fueron colocados sobre una base de madera, con amortiguamiento en su parte inferior, mediante el uso de guata y tacones de neopreno para reducir las vibraciones provenientes del piso, tal como se muestra en figura 3.



a) Cañón angosto con altura media. b) Cañón angosto con gran altura. c) Cañón amplio con gran altura.

Figura 2 Variación de cañones urbanos escala 1:40.



a) Guata.



b) Tacones de neopreno

Figura 3 Base amortiguada para montar los modelos a escala.

La orientación de la estructura fue considerada en el espacio de trabajo al interior de la cámara semianecóica, para así mantener una simetría de propagación en sus extremos durante el proceso de medición. La base de madera cuenta con orificios a lo largo de la superficie para colocar longitudinalmente hasta seis bocinas, las cuales representan las fuentes de ruido. La circunferencia de cada bocina PIONER TS-S20C fue sellada con neopreno para evitar fugas de sonido y reducir la vibración

sobre la base de madera. Seis micrófonos JLI-B6022AP fueron colocados a ras de piso sobre una tira de cartón y a una altura de cinco centímetros, figura 4.



a) Fuente sonora
b) Micrófonos miniatura
Figura 4 Generación y registro de ondas acústicas.

La figura 5 muestra el diagrama esquemático de la instrumentación utilizada para llevar a cabo la generación y registro simultaneo de las señales acústicas. Una señal digital se hace pasar por un amplificador de audio para garantizar una alta intensidad acústica en las seis bocinas y establecer condiciones sonoras estacionarias a lo largo del cañón urbano.

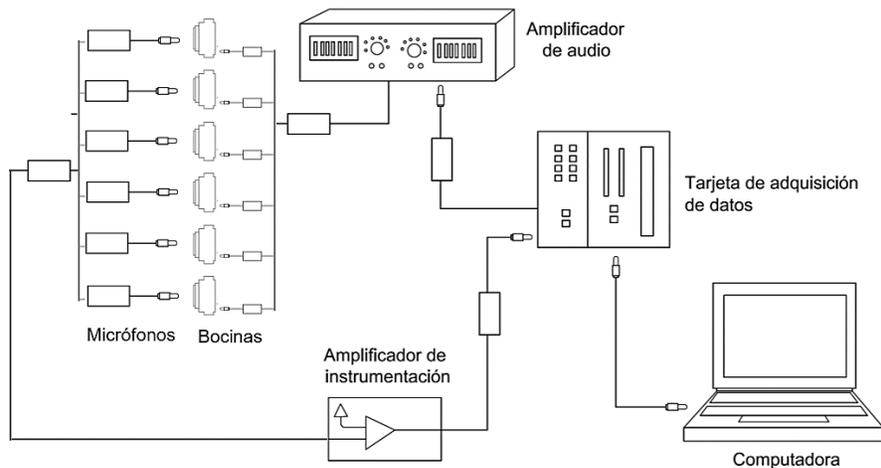


Figura 5 Instrumentación para la generación y registro de las señales acústicas.

Una vez que las señales son registradas mediante los seis micrófonos y almacenadas en la computadora se cuantifica el nivel equivalente sonoro para cada

una de las posiciones donde son colocados los micrófonos. Después de cada medición, los seis micrófonos son deslizados a lo largo de un cuadrante de la base para generar una matriz de registro. Este proceso dependerá de las dimensiones del cañón y del intervalo de distancia entre posiciones que se desea muestrear. Tomando como base la simetría del cañón se lleva a cabo la medición en uno de los cuatro cuadrantes de la base para completar la superficie total, este proceso se describe más adelante. La figura 6 muestra las posiciones de la tira con seis micrófonos, descritas como A, B, C y D, sobre las cuales se realiza el registro de las señales generadas por las bocinas. En dicha figura se observa la simetría de la distribución longitudinal de las seis bocinas al centro del cañón.

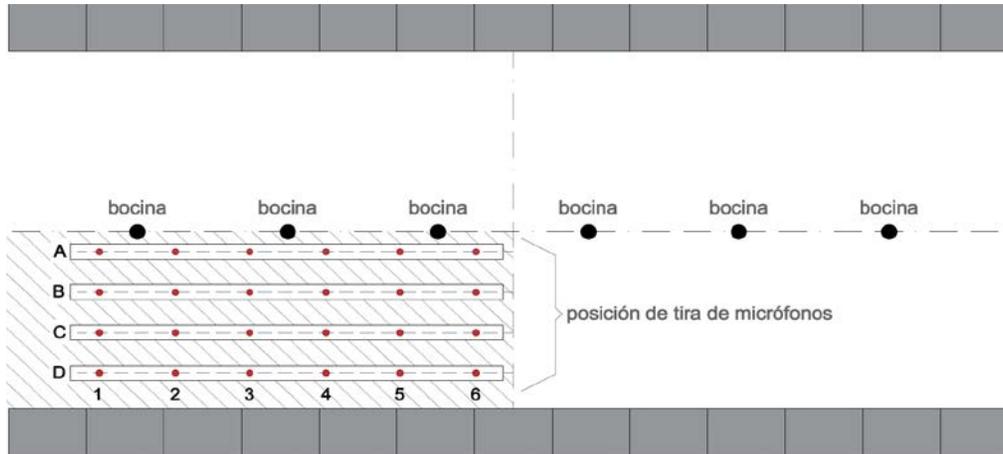


Figura 6 Arreglo matricial para el registro de las señales acústicas.

Con el propósito de optimizar el registro de las señales y analizar la respuesta en frecuencia del sistema, a lo largo de la superficie, se utilizó un tren de señales de ruido con diferente contenido en frecuencia espaciadas por un tiempo de silencio entre cada una de ellas, como se muestra en la figura 7. El tiempo de silencio permite que las ondas acústicas se atenúen antes de generar cada frecuencia. Para crear este tipo de señales se diseñó un programa en el cual se define los parámetros de operación para cada señal de ruido como el tiempo de duración y contenido de frecuencia, tomando en cuenta una distribución normalizada y amplitud unitaria.

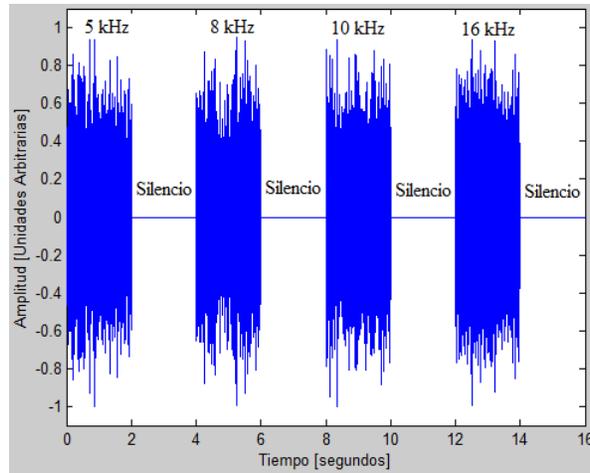
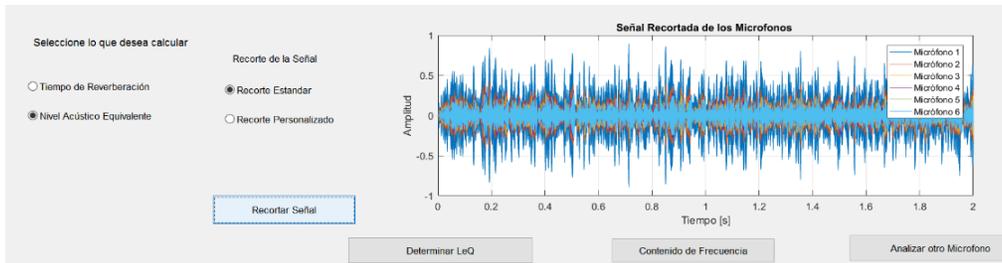
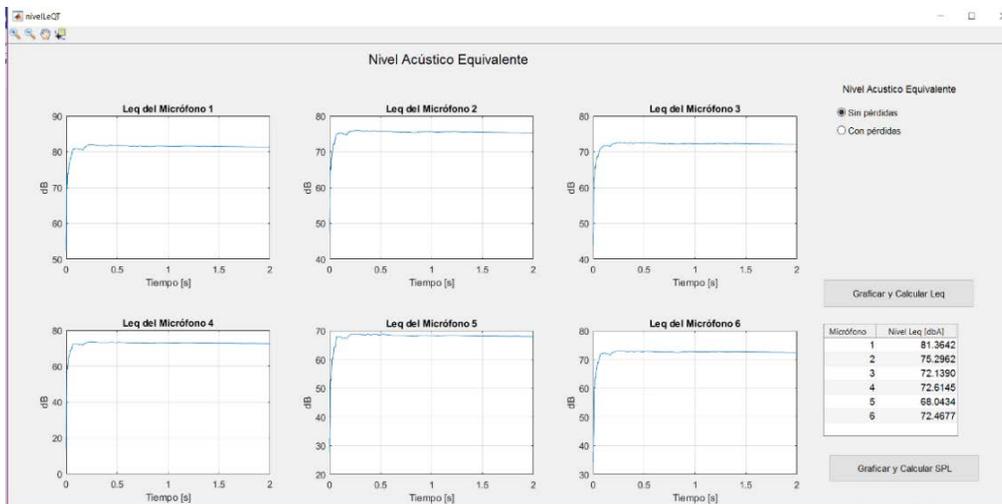


Figura 7 Tren de señales de ruido a diferente frecuencia.

La figura 8 muestra una impresión de pantalla de la interfaz desarrollada con el registro de las seis señales y con la cual se determina el nivel equivalente sonoro sobre una posición del cañón urbano.



a) Registro de las señales de ruido



b) Cuantificación del nivel equivalente sonoro

Figura 8 Interfaz gráfica para visualizar las señales de ruido y cuantificar el Leq.

La interfaz desarrollada tiene la opción de llevar a cabo el análisis de manera automática considerando los parámetros en la generación de las señales, sin embargo, se puede seleccionar un tiempo de análisis de las señales. Cabe resaltar que cuenta con una opción para visualizar el contenido de frecuencia e incluso determinar el tiempo de reverberación.

El procedimiento para la medición establece que se debe llevar a cabo el registro de tres eventos para una misma posición de la tira de micrófonos. Posteriormente se debe calcular el valor promedio del nivel sonoro equivalente que será utilizado en la representación tridimensional del campo acústico.

Para el adecuado manejo de la gran cantidad de datos generados se designó una nomenclatura para identificar de manera consecutiva la descripción de la señal (ruido o Leq), el ancho del cañón, la posición de la línea representada alfabéticamente sobre la maqueta (comenzando desde la fuente sonora), contenido de frecuencia y altura de los paramentos laterales del cañón urbano.

Con el promedio de los niveles equivalentes sonoros se realizó una interpolación de orden cuatro, tipo *spline*, para aumentar la resolución entre los puntos de medición [Chapra, 2006]. La figura 9a muestra el proceso de interpolación en sentido horizontal para estimar cuatro magnitudes entre los micrófonos. La figura 9b describe el proceso de interpolación en sentido vertical para estimar cuatro puntos entre cada línea. Posteriormente se lleva a cabo la imagen espejo del cuadrante muestreado, considerando la simetría del cañón, para representar la mitad del largo de la superficie del cañón, figura 9c. Nuevamente por simetría se completa la imagen espejo para la totalidad de la superficie, figura 9d. De esta manera se crea la base de una malla con las dimensiones del largo y ancho del cañón urbano para conformar la matriz con los datos interpolados para su representación tridimensional.

El procedimiento de interpolación asume que los puntos intermedios entre posiciones se encuentran entre los límites de los puntos de medición y presentan suaves cambios entre posiciones.

Es importante resaltar que el incrementar el orden de interpolación no necesariamente aumenta la precisión, por lo que el efecto de un orden mayor

ocasiona que la función oscile de manera excesiva y alejada del verdadero comportamiento de la función a estimar. Se recomienda que el orden de interpolación para funciones suaves se mantenga en el rango de 3 a 6 [Chapra, 2006].

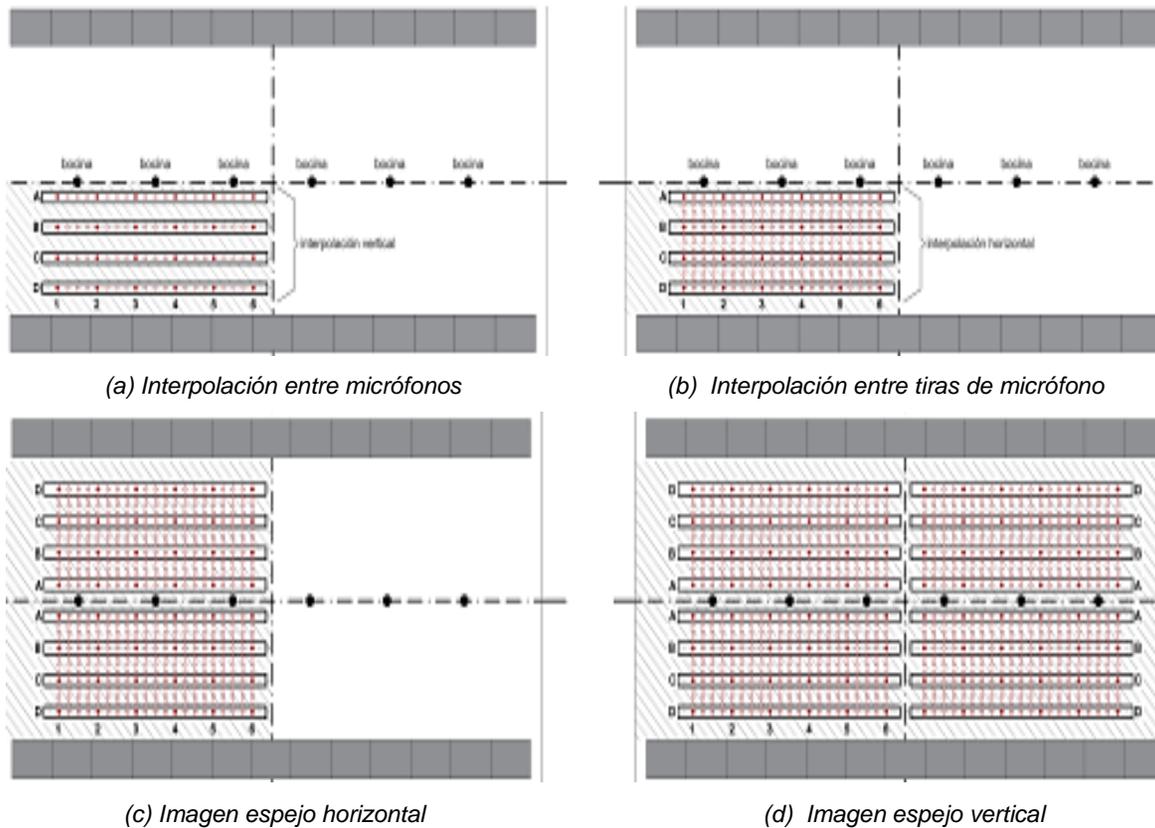


Figura 9 Proceso de interpolación para la obtención del mapa acústico.

La interfaz gráfica desarrollada considera hasta 20 líneas a lo ancho del cuadrante muestreado en el cañón. El proceso matemático define una rejilla base tomando el número de líneas y columnas generadas en la interpolación, la cual representa la posición del largo y ancho de la base del cañón, sobre la cual es colocada la matriz de los niveles sonoros equivalentes. La representación tridimensional del campo acústico utiliza una escala de colores para relacionar las intensidades obtenidas en función de la posición. La representación gráfica muestra simultáneamente cuatro perspectivas para el análisis de los resultados obtenidos (Figura 10), además de identificar los valores máximos y mínimos de dicho campo.

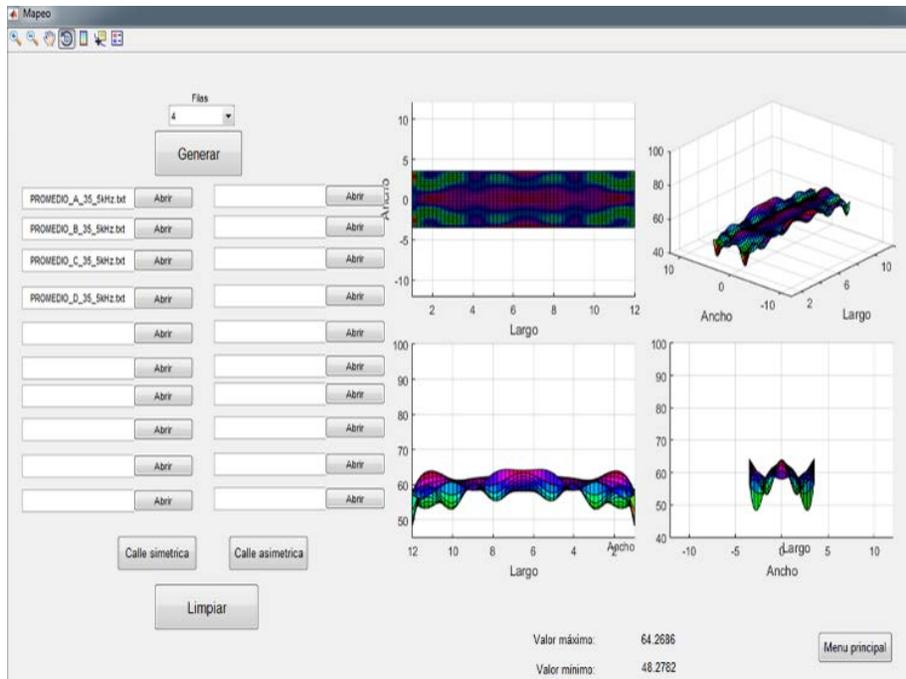


Figura 10 Representación tridimensional del campo acústico.

3. Resultados

La versatilidad en el manejo de los diferentes parámetros del sistema desarrollado considera el análisis de la propagación de la onda sonora para diferentes configuraciones. Para este caso la frecuencia de muestreo, basada en el rango de operación de la instrumentación y equipo utilizado, fue de 50 kHz. Como un primer resultado se consideraron cuatro señales de ruido con frecuencias de 5, 8, 10 y 16 kHz para conformar el tren de señales de ruido, como el que se muestra en la figura 7.

Un cañón urbano con un ancho de 2 m y largo de 2.44 m, el cual representa un ancho real de 80 y 97.6 m de largo fue construido con bloques de madera, sobre el cual se distribuyeron longitudinalmente seis bocinas. Dos casos fueron considerados con alturas simétricas en las paredes del cañón, el primero con una altura máxima de 2 bloques y el segundo con una altura de 20 bloques. La distancia entre cada línea de micrófonos en el cuadrante de la base de madera permitió llevar a cabo el registro de 10 líneas separadas a una distancia de 10 cm. La tabla 1 muestra los valores máximos y mínimos determinados para cada caso.

Tabla 1 Valores máximos y mínimos.

Frecuencia [kHz]	2x2		20x20	
	Máximo [dB]	Mínimo [dB]	Máximo [dB]	Mínimo [dB]
5	64.3409	45.4823	64.8649	45.0663
8	64.4851	44.5022	64.5672	39.7819
10	65.2099	42.4361	65.7754	40.5039
16	61.5484	42.1997	60.3384	38.0307

Las figuras 11 y 12 representa tridimensionalmente el campo acústico cuantificado para ambos casos a diferente frecuencia.

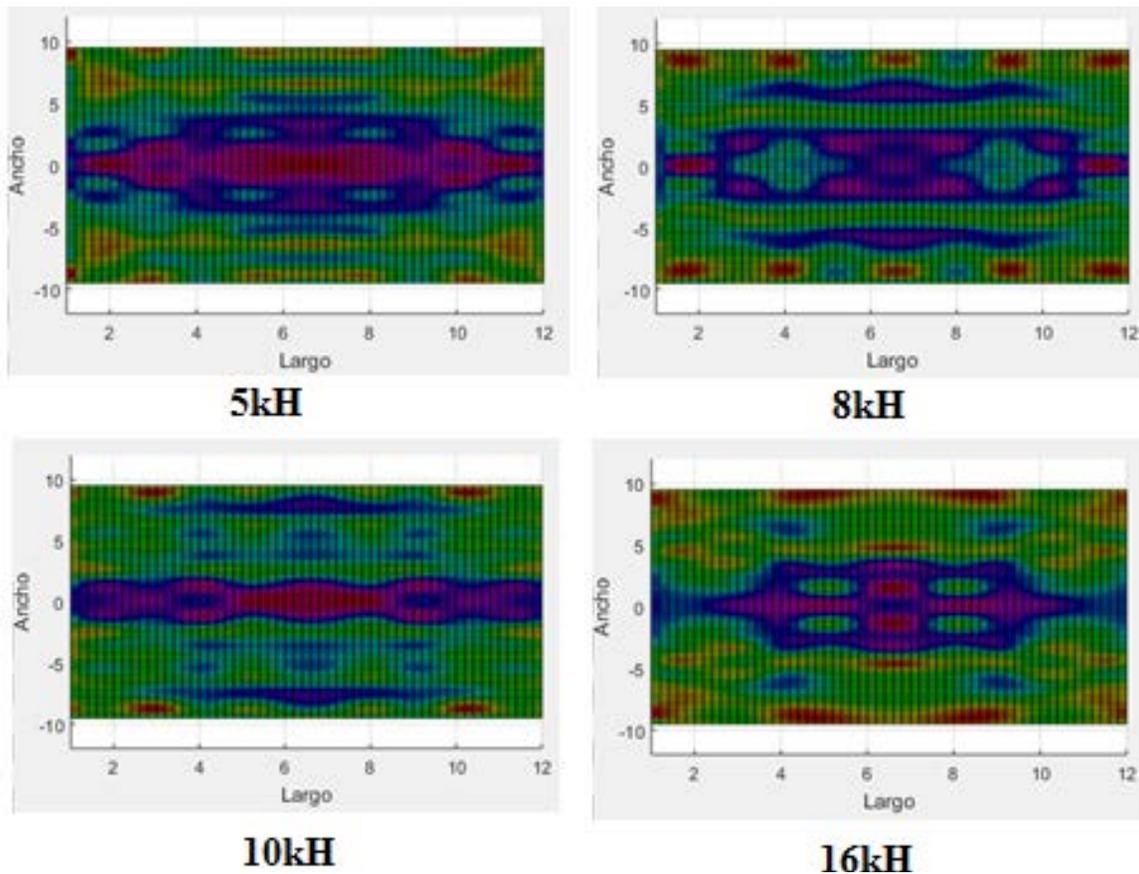


Figura 11 Campo acústico tridimensional, cañón acústico con altura máxima de 2 bloques.

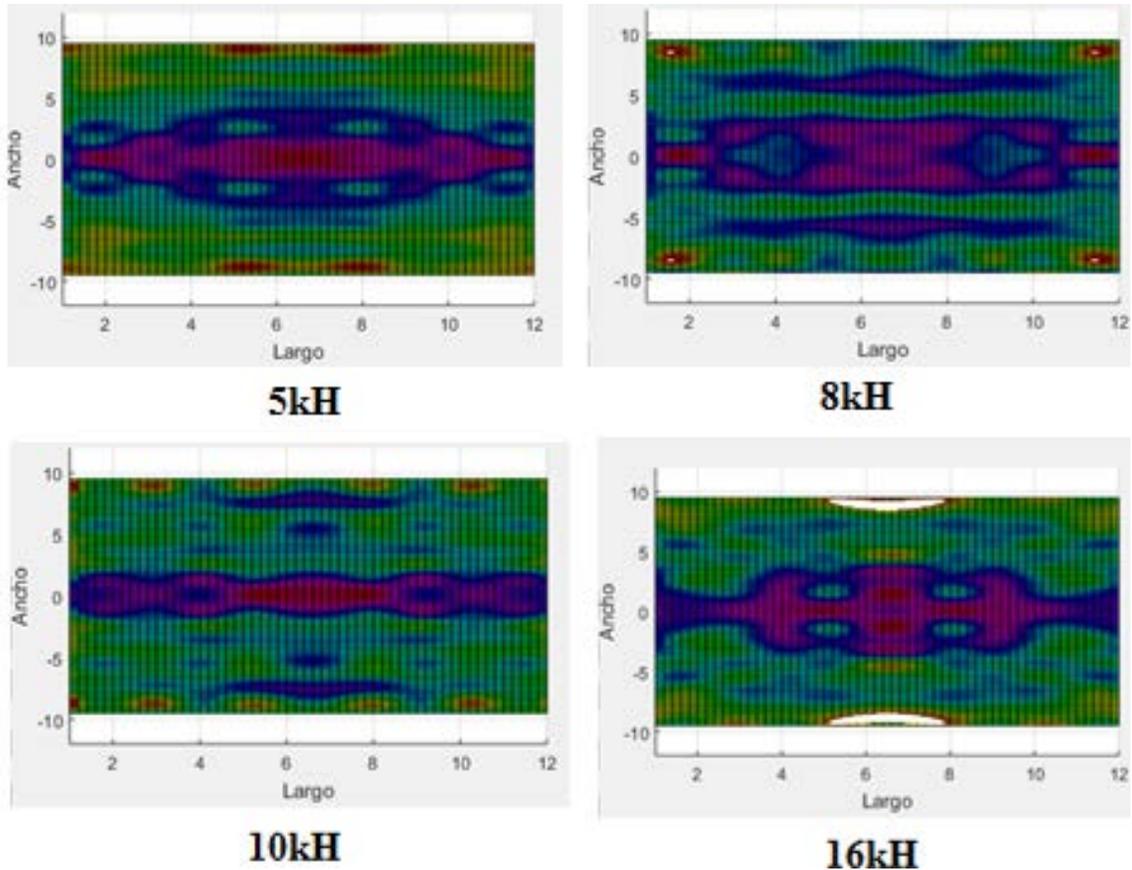


Figura 12 Campo acústico tridimensional, cañón acústico con altura máxima de 20 bloques.

4. Discusión

La flexibilidad del sistema desarrollado, así como la metodología establecida, permitió mantener un control en los diversos parámetros en el diseño de la estructura y del contenido de frecuencias a evaluar. El tiempo de registro fue relativamente rápido utilizando el tren de señales de ruido, mientras que la implementación de la interfaz gráfica contribuyó a un manejo flexible de los datos generados.

Los resultados muestran que los niveles equivalentes sonoros máximos y mínimos en cada una de las configuraciones estructurales, altura de bloques de 2x2 y 20x20, no presentan variaciones significativas para cada una de las frecuencias evaluadas. Los valores máximos de intensidad, para ambas configuraciones estructurales, se obtuvieron a la frecuencia de 10 kHz, mientras que los valores mínimos de intensidad se presentan a la frecuencia de 16 kHz. Con los valores obtenidos se

puede clasificar un ambiente ruidoso, en el cual se esperarían quejas por la intensidad del ruido.

La representación tridimensional del campo acústico muestra diferencias de magnitud principalmente al centro del cañón, donde fueron colocadas las fuentes de ruido. El ancho de la franja de ruido con mayor intensidad es significativamente más delgado para la frecuencia de 10 kHz, respecto a las otras tres frecuencias. En otras palabras, las frecuencias de 5 kHz, 8 kHz y 16 kHz generan una amplia área longitudinal al centro con altas intensidades.

La diferencia de alturas en las paredes de las configuraciones estructurales se ve reflejado en el mapa acústico a través del incremento de intensidad a lo largo de la franja central de ruido, es decir, el cañón urbano con mayor altura presenta zonas con mayor intensidad, debido a un confinamiento en la propagación de la onda. En el futuro este tipo de análisis considerará el uso de una simulación para corroborar los datos obtenidos en el experimento. Por otro lado, el uso del histograma en la superficie contribuirá a un mejor análisis de la distribución de intensidades para clasificar el modelo urbano a escala como ruidoso. Cabe resaltar que el trabajo desarrollado permitirá también considerar fuentes de ruido puntual, mediante un arreglo hexagonal de una fuente sonora para analizar los mapas acústicos, así como considerar arreglos asimétricos en el cañón.

5. Conclusiones

El uso de un modelo a escala, bajo condiciones controladas de ruido y con la metodología e instrumentación implementada, consideró diversos parámetros en las dimensiones y configuraciones arquitectónicas para determinar tridimensionalmente el campo acústico de un cañón utilizando señales de ruido con frecuencias específicas. La interfaz gráfica desarrollada cuantificó el nivel sonoro equivalente para implementar una interpolación de los datos obtenidos y relacionarlos con una matriz que representa las dimensiones de la base del modelo urbano a escala. El resultado muestra una perspectiva tridimensional de la propagación de la onda sonora, con lo cual se logró identificar las zonas con una alta y baja intensidad en función de las fuentes de ruido distribuidas en diferentes

posiciones y el contenido de frecuencia generado. Esta herramienta contribuirá a estudiar la propagación del sonido para diferentes configuraciones arquitectónicas que ayuden a comprender los efectos del ruido ambiental.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Chapra, S.C., & Canale R.P. Métodos numéricos para Ingenieros. Mc Graw Hill. USA. 2006.
- [2] ISO 1996-1:2016 (en) Acoustics-Description, measurement and assessment of environmental noise- Part 1: Basic quantities and assessment procedures.
- [3] ISO 1996-2:2017 (en) Acoustics-Description, measurement and assessment of environmental noise- Part 2: Determination of sound pressure levels.
- [4] Kinsler L. Fundamentos de Acústica. Limusa Wiley, USA. 1995.
- [5] Llinares, J., Llopis, A. & Sancho, J. Acústica Arquitectónica y Urbanística. Limusa, Ciudad de México, México. 2008.