

Presencia de sonidos de baja frecuencia e infrasonido producidos por los sistemas de transporte colectivo en el espacio urbano en Monterrey, México

Presence of low frequency sounds and infrasound produced by collective transport systems in urban space in Monterrey, Mexico

Presença de sons de baixa frequência e infrassom produzidos por sistemas de transporte coletivo no espaço urbano em Monterrey, México

Fernando J. Elizondo-Garza¹, fjelizon@gmail.com - orcid.org/0000-0002-5000-3969

Walter A. Montano², wmontano@arquicust.com - orcid.org/0000-0002-0059-5257

¹Laboratorio de Acústica. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolás de los Garza, N.L., 66450, México

²Departamento de Acústica. ARQUICUST SRL. Gualguaychú, 2820, Entre Ríos, Argentina

Resumen

Con el desarrollo de las plantas aerogeneradoras se ha vuelto a poner atención a los sonidos de baja frecuencia e infrasonido (SBFI). En este contexto se ha vuelto evidente la necesidad de revisar la instrumentación y las normas relacionadas con la evaluación de los SBFI y el efectuar mediciones en las ciudades. En esta conferencia se presentan resultados de mediciones preliminares realizadas durante la parte práctica del curso «Sonidos de baja-frecuencia e infrasonidos (SBFI)» organizado por la FIME-UANL como parte del Programa de Profesores Invitados, en particular sobre la presencia de sonido de baja frecuencia e infrasonido en la vida cotidiana de la ciudad de Monterrey en México generados por los sistemas de transporte colectivo integrado por camiones urbanos y el metro, usados por cientos de miles de personas. De los resultados se confirma la presencia de SBFI, los cuales deberán ser considerados en estudios y acciones ambientales futuras.

Palabras clave: Acústica, baja-frecuencia, infrasonido, ruido en ciudades, Monterrey.

Abstract

With the development of wind turbine plants, attention has been drawn again on sounds of low-frequency and infrasound (SLFI). In this context, it becomes evident the need to review the equipment and the standards related to the evaluation of SLFIs, especially in cities. This work presents the results of preliminary measurements, made during the practical part of the course "Sounds of low-frequency and infrasound (SLFI)" organized by FIME-UANL as part of the Guest Professors Program, in particular on the presence of low frequency sounds and infrasound in the daily life of the city of Monterrey in Mexico, generated by the City Transport Systems, integrated by urban busses and a metro, which is used by hundreds of thousands of people. The results confirm the presence of SLFIs, which should be considered in future environmental studies and actions.

Keywords: Acoustic, low frequency, infrasound, city noises, Monterrey.

Resumo

Com o desenvolvimento das turbinas eólicas, a atenção foi dada novamente aos sons de baixa frequência e infrassom (SBFI). Nesse contexto, tornou-se evidente a necessidade de rever a instrumentação e as normas relacionadas à avaliação das SBFIs e das medidas da cidade. Esta conferência apresenta os resultados das medições preliminares realizadas durante a parte prática do curso "Sons de baixa frequência e infrassom (SBFI)" organizado pela FIME-UANL no âmbito do Programa de Professores Convidados, em particular sobre a presença de som e infrassom de baixa frequência na vida cotidiana da cidade de Monterrey, no México, gerada pelos sistemas de transporte coletivo integrados por caminhões urbanos e pelo metrô, utilizados por centenas de milhares de pessoas. Os resultados confirmam a presença de SBFI, o que deve ser considerado em futuros estudos e ações ambientais.

Palavras-chave: Acústica, baixa frequência, infrassom, ruído nas cidades, Monterrey.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el establecimiento de una definición estadística, redondeada, se estableció que el sonido se encuentra en el rango de frecuencias ‘audibles’ de aproximadamente 20 a 20 000 Hz, y se planteó, como en la óptica, la existencia de ondas elásticas por debajo y encima de dicho intervalo, los cuales fueron denominados: infrasonido y ultrasonido.

Estas regiones interactúan con el hombre en formas principalmente no auditivas, y han seguido su desarrollo independientemente, pero en el caso del infrasonido con menos éxito que el ultrasonido, esto debido a muchos factores, siendo los principales, los problemas de metrología, la falta de Normas sencillas y claras y un mercado mucho más limitado.

El desarrollo en la última década de equipos que genera sonidos con rangos crecientes hacia los graves, ha generado un nuevo interés en los fenómenos acústicos de las baja-frecuencias y el infrasonido. A lo anterior debe añadirse mejoras en los sonómetros y en la metrología, aunque aún, en los equipos de uso general, limitadas.

2. ANTECEDENTES

Como parte del Programa de Profesores Invitados que organiza el Cuerpo Académico de Acústica y Vibraciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León (FIME-UANL), en la semana del 7 al 11 de octubre de 2019, se llevó a cabo el curso «Sonidos de baja-frecuencia e infrasonidos (SBFI)» impartido por el Mag. Walter Alfredo Montano Rodríguez, que tuvo una duración de cuarenta horas cátedra.

Este curso contempló, además de las clases teóricas, sesiones prácticas dentro de las cuales se efectuaron mediciones de infraestructura y vehículos urbanos típicos de ciudad, tanto dentro como fuera del campus de la UANL, incluyendo los sonidos en baja-frecuencias e infrasonidos.

Las mediciones realizadas tenían como objetivo recopilar datos reales de campo, que permitan evidenciar la existencia de ruido ambiental en el intervalo de las baja-frecuencias e infrasonidos en la actividad cotidiana en la ciudad de Monterrey.

La UANL viene realizando mediciones normalizadas de ruido desde hace más de 50 años, incluso antes de que México publicara reglamentos federales en materia

de ruido. El presente estudio se distingue de los anteriores porque suministra información ambiental en un rango de frecuencias escasamente estudiado en las ciudades, que es el de los *sonidos de baja-frecuencia e infrasonidos*, para advertir la existencia de esta problemática en la ciudad Monterrey.

En esta ponencia sólo se contemplará la información experimental obtenida relacionada con vehículos de transporte colectivo urbano en la Zona Metropolitana de la Cd. de Monterrey, México (ZMM), fuentes cotidianas en la ciudad:

- Nivel de SBFI de viaje en camión, de 20 minutos de duración.
- Nivel de SBFI en una plaza abierta con paso de camiones, de 12 minutos de duración.
- Nivel de SBFI en acera de mercado con paso de camiones, de 12 minutos de duración.
- Nivel de SBFI de viaje en metro, de 16 minutos de duración.

La publicación de este artículo se demoró a consecuencia del confinamiento que produjo la pandemia por la COVID, ya que el resultado de las mediciones quedó en las memorias de los sonómetros, que estuvieron en el depósito del laboratorio de acústica dentro de la FIME.

3. METROLOGÍA

La problemática de la instrumentación y metodología para la medición de sonidos de baja frecuencia e infrasonido no ha sido resuelta para fines prácticos y se está aún lejos de un acuerdo internacional.

La discusión va desde que parámetro medir, como resolver la instrumentación a nivel de reglamentos operativos a nivel ingenieril, cuántos puntos y donde realizar las mediciones, y hasta como presentar los resultados para que sean comparables.

Por lo dicho debe tenerse claro que este estudio busca únicamente reconocer la presencia de sonidos de baja frecuencia e infrasonidos en un contexto de ciudad y solo de algunas de sus fuentes sonoras.

3.1. Instrumentación

Para las mediciones sonoras se utilizaron dos sonómetros clase 1 que cumplen con la Norma IEC 61672-1:2013:

- BSWA® modelo 308, con curvas de ponderación A, B, C, Z; bandas por tercios de octava [de 6.3 Hz a 20 kHz]; micrófono de 12.7 mm (BSWA, n.d.).

- CESVA® modelo SC310 con ponderaciones A, C y Z; bandas por tercios de octava desde [de 10 Hz a 20 kHz]; micrófono de 12.7 mm (CESVA, n.d.).

Se verificó el funcionamiento de los sonómetros antes y después de las mediciones con un calibrador sonoro B&K tipo 4230 de clase 1.

La altura de medición de los micrófonos dependió del escenario que se registró:

- ✓ Altura del oído, en los medios de transporte.
- ✓ A 1,5 m del suelo, en mediciones sobre la acera.

Los sonómetros entregan valores numéricos de los Niveles Sonoros Continuos Equivalentes (NSCE) (dB re. 20 μ Pa) en formato texto que fueron procesados informáticamente, los registros no son archivos de sonido digital. Dado que el experimento está centrado en analizar qué es lo que sucede durante todo el intervalo de tiempo de exposición a los SBFI, los sonómetros se programaron para registrar la medición en subintervalos:

- BSWA308, un registro cada 0.5 s de 41 valores de NSCE.
- CESVA SC310, un registro cada 0.125 s de 44 valores de NSCE.

Para el procesamiento de los datos de las mediciones se utilizó un programa aplicativo desarrollado en .NET Framework para utilizar la librería de funciones disponibles en Internet, y los algoritmos de cálculo están escritos en lenguaje C#; se usó este sistema porque permite la compilación justo a tiempo (JIT en inglés) que permite ejecutar el código en subprocesos en segundo plano con todos los núcleos del procesador, acelerando así la velocidad de cómputo.

3.2. Criterios, normas sobre ruido de baja-frecuencia e infrasonido

Dado que no existe legislación específica en México con protocolos de cómo se debe registrar, evaluar y analizar los SBFI, se tomaron las referencias de las Normas ISO 1996: parte uno (ISO, 2016) y parte dos (ISO, 2017), y para los infrasonidos se utilizó la Norma ISO 7196 que presenta la curva de ponderación en frecuencia G (ISO, 1995), pero limitada a la frecuencia inferior que soporta cada sonómetro.

Los valores del NSCE calculados en este trabajo con la ponderación en frecuencia G es aproximado, y está limitado a los siguientes intervalos:

- De 6,3 Hz a 250 Hz, para el sonómetro BSWA308.
- De 10 Hz a 250 Hz, para el sonómetro CESVA SC310.

En este artículo se utilizan las referencias internacionales, por lo que, para evitar posibles confusiones, los rangos de frecuencia utilizados se establecieron como:

- ✓ Los de baja frecuencias entre los 16 Hz y 200 Hz, de acuerdo con la ISO 1996-2.
- ✓ Los de infrasonidos por debajo de los 16 Hz.

En la Figura 1 se muestran cuatro curvas de ponderación normalizadas, donde se muestra cómo la curva «G» es como un filtro pasa banda, que por un lado busca excluir los sonidos en el rango audible y por otro lado considerar los posibles efectos sobre humanos en baja frecuencia y sobre todo infrasonidos. La medición en valores de dBA está popularizada y pocas veces se aclara que no es un descriptor de ruido adecuado para analizar los SBFI (Montano, 2020, 2021) (Elizondo et al., 2022), a pesar de que sí está mencionada esta situación desde 1999 por la OMS en su documento *Guías para ruido comunitario* (Berlung et al, 1999), y por la Norma ISO 1996 parte 1 en su acápite 5.1.1 «La ponderación en frecuencia A se usa excepto para sonidos de impulso de alta energía o sonidos con fuerte contenido en la baja-frecuencia» (ISO, 2016).

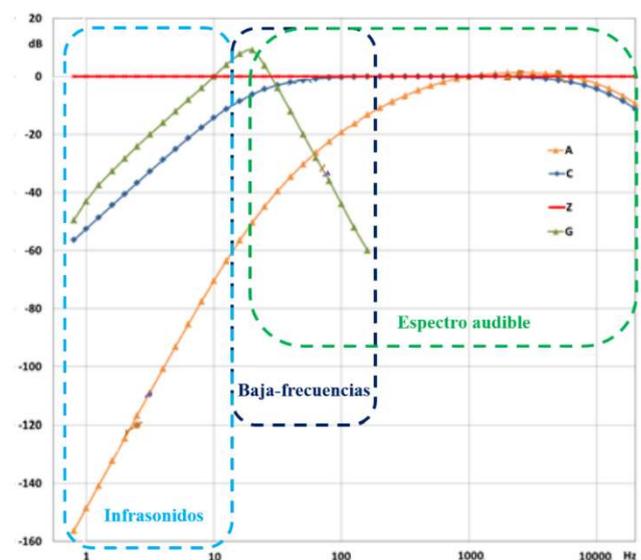


Figura 1. Curvas de ponderación en frecuencia «A», «C», «Z» y «G». Nota. Diseño propio

4. RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

Para los fines de esta ponencia, de las diferentes mediciones realizadas se seleccionaron solo 4 casos correspondientes a sonidos producidos por fuentes cotidianas en la ciudad, específicamente vehículos urbanos de transporte colectivo, tanto dentro de ellos como emitidos hacia afuera.

Para cada uno de los casos se presenta una gráfica (Fig. 3, Fig. 5, Fig. 9, Fig. 13) que muestra la evolución temporal del NSCE con dos curvas de ponderación, a saber:

- **Color rojo**, la ponderación «Z» que se corresponde con el nivel de presión sonora real (Lineal).
- **Color añil**, la ponderación «A» que es una convención internacional sobre cómo supuestamente el oído prescribe los sonidos de baja intensidad.

Esta es una forma pedagógica de mostrar el efecto del nivel de presión sonora real al que se exponen las personas, ya que los valores expresados en dBA dan una idea errónea de la energía en las baja-frecuencias y nula apreciación de los infrasonidos.

En las cuatro gráficas mencionadas que presentan la evolución temporal del nivel sonoro, se observa que:

- En muchas ocasiones la curva en dBZ ‘no coincide’ con la curva en dBA,
- Hay máximos relativos en dBZ que no se manifiestan en dBA,
- Hay máximos relativos en dBA que no se manifiestan en dBZ, que se expresan mediante el descriptor de ruido normalizado $L_{Amáx}$

Lo anterior es a consecuencia del filtrado en frecuencia que tiene la ponderación «A», es por esta razón que se grafican en una misma figura la curva dBA y dBZ, y así tener una fuente de datos adicional para una posterior evaluación del comportamiento del nivel sonoro.

Se presentan también gráficas que muestran la comparación de los espectros en valores de dBZ (Fig. 4, Fig. 6, Fig. 10, Fig. 14) registrados por ambos sonómetros. En los espectros se resalta el intervalo de frecuencias considerado en los SBFi y para cada curva se indican sus valores equivalentes en dBA y dBC, así el lector puede tener una mejor idea de comparación del nivel sonoro para una misma medición expresado con distintos descriptores de ruido; además, se resumen en una tabla para cada uno de los casos

(Tablas 1 a 4) el nivel sonoro continuo equivalente en las cuatro ponderaciones en frecuencia consideradas en dBA, dBC, dBZ y dBG.

4.1. Mediciones relacionadas con Camiones Urbanos

4.1.1. Mediciones durante viaje en camión. Resultados del nivel de SBFi

Se hizo una medición en dos puntos de medición dentro de un camión de transporte colectivo urbano: uno detrás del conductor, otro al fondo frente a la puerta de salida (ver Figura 2).



Figura 2. Viaje en camión. Fotografías tomadas dentro de un camión urbano típico

El viaje tuvo una duración de 20 minutos desde el Campus de la UANL hasta la Plaza del Colegio Civil en el centro de Monterrey. En la Figura 3 se presenta la evolución temporal del NSCE, donde se puede ver el comportamiento del sonido distinguiéndose los instantes de tiempo cuando el camión estuvo detenido o en marcha. Es importante considerar que las ventanas del camión permanecían cerradas.

En la Tabla 1 se presentan los resultados del NSCE de todo el intervalo del tiempo medido con diferentes descriptores de ruido para cada curva de ponderación en frecuencia, registrados en simultáneo por ambos sonómetros en cada punto de medición.

Tabla 1. Viaje en camión. NSCE registrado en cada punto de medición con $T = 20$ min

Posición del micrófono	$L_{Aeq,T}$	$L_{Ceq,T}$	$L_{Zeq,T}$	$L_{Geq,T}$
Detrás del conductor	71.2	94.8	101.4	104.5
Último asiento	75.7	96.6	101.1	103.2

De la figura 3 y la tabla 1 se tiene que hay una gran diferencia en decibeles entre las mediciones en ponderación A comparadas con Z y G. Para las

mediciones equivalentes detrás del conductor $L_{Z_{eq}} - L_{A_{eq}} = 30.2$ dB y $L_{G_{eq}} - L_{A_{eq}} = 33.3$ dB y para las mediciones en el último asiento $L_{Z_{eq}} - L_{A_{eq}} = 25.4$ dB y $L_{G_{eq}} - L_{A_{eq}} = 27.5$ dB. Esto indica que hacia dentro

del camión, el motor de combustión interna emite significativamente sonidos de baja frecuencia e infrasonido.

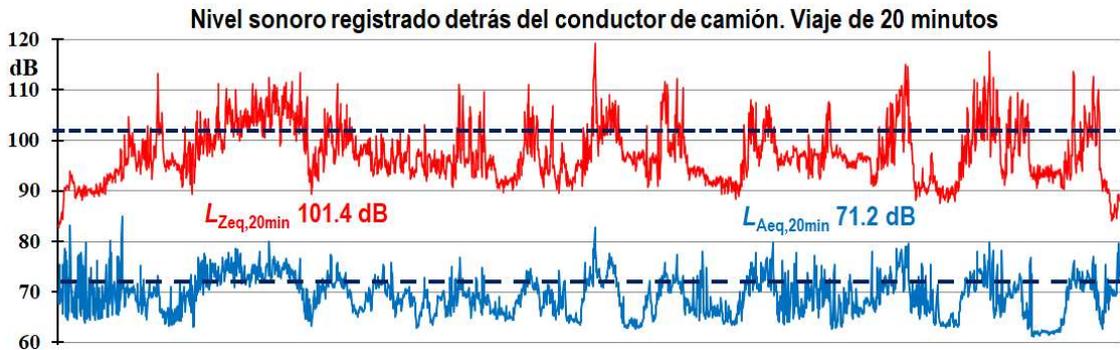


Figura 3. Viaje en camión. Evolución temporal del NSCE en dBZ y dBA

En la Figura 4 se presenta la comparación de los espectros sonoros registrados en dBZ, en cada punto de medición, donde se observa el alto nivel de presión sonora en el intervalo de los SBFI, a consecuencia de la presencia de una fuente artificial emisora de esa energía, en este caso el conjunto motor/chasis del camión.

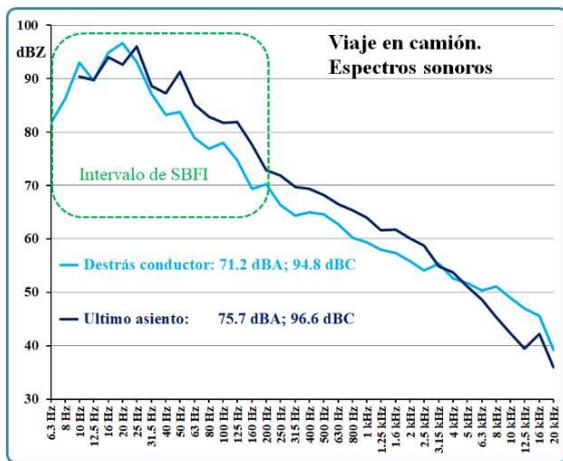


Figura 4. Viaje en camión. Comparación de espectros sonoros en cada punto de medición

Esto refuerza los resultados obtenidos de las figuras 3 y tabla 1, y muestra las frecuencias preponderantes, las cuales, dentro del rango medido, están en las bandas de 1/3 de octava de entre 10 y 25 Hz.

4.1.2. Medición en plaza abierta. Resultados del nivel de SBFI

En la Plaza del Colegio Civil se encuentra en una zona comercial, con puestos feriales de artesanías (que son de tela) sobre la acera de la avenida Benito Juárez, significando esto que las personas que ahí laboran están expuestas a la energía acústica de los SBFI.

En la Figura 5 se presenta la evolución temporal del NSCE en la acera de la plaza, donde se ve una ‘variación’ del nivel sonoro registrado, porque cuando el semáforo se pone en verde se incrementa el nivel sonoro, y se reduce cuando el semáforo se pone en rojo; se observa también que muchos instantes la curva «Z» no tiene el mismo comportamiento que la curva «A».

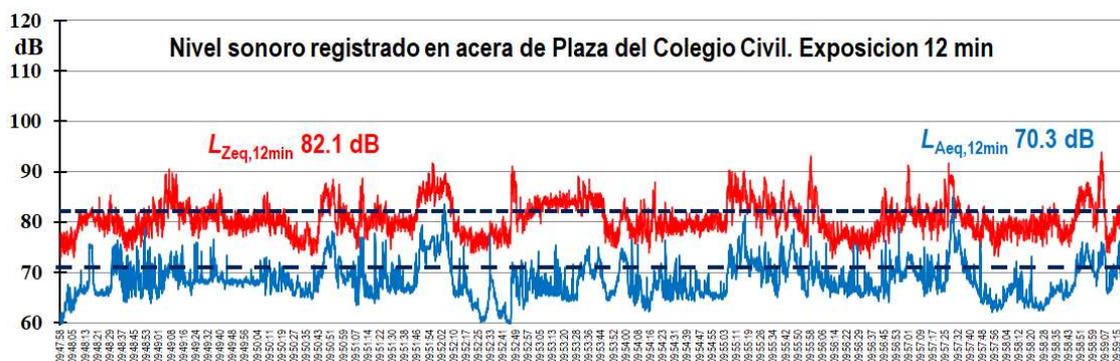


Figura 5. Plaza del Colegio Civil. Evolución temporal del NSCE en dBA y dBZ

En la Tabla 2 se presentan los resultados del NSCE de todo el intervalo del tiempo con diferentes descriptores de ruido para cada curva de ponderación en frecuencia, registrados en simultáneo por ambos sonómetros en cada punto de medición en esta ubicación.

Tabla 2. Plaza del Colegio Civil. NSCE registrado en cada punto de medición con T=12 min

Posición del micrófono	$L_{Aeq,T}$	$L_{Ceq,T}$	$L_{Zeq,T}$	$L_{Geq,T}$
En esquina	68.6	80.1	81.7	73.0
Al centro	70.3	80.6	82.1	74.2

De la figura 5 y la tabla 2 se tiene la diferencia en decibeles entre las mediciones en la acera, una en el centro y otra cercana a la esquina (ubicación de semáforos), en ponderación A comparadas con Z y G. Para las mediciones en la esquina de la plaza $L_{Zeq} - L_{Aeq} = 13.1$ dB y $L_{Geq} - L_{Aeq} = 4.4$ dB y para las mediciones en el centro de la acera oriente de la plaza $L_{Zeq} - L_{Aeq} = 11.8$ dB y $L_{Geq} - L_{Aeq} = 3.9$ dB. Esto debido al paso de vehículos de todo tipo por los puntos de medición, los sonidos de sistemas de audio usados para publicidad y el sonido de personas hablando, pasando cerca del punto de medición, todas fuentes típicas de zonas comerciales. Aunque los motores de los camiones tienen SBFI como su efecto no es constante no incrementa mucho los valores equivalentes medidos.

En la Figura 6 se presenta la comparación de los espectros sonoros registrados en dBZ en la acera de la plaza, en el centro y cerca de la esquina, donde se observa que no hay diferencia significativa entre el centro y cerca de la esquina de la plaza en el rango de SBFI y que predomina el ruido en el rango audible producto de todas las fuentes sonoras en la plaza. La componente de baja frecuencia e infrasonido disminuye a como baja la frecuencia y se observa como el nivel de presión sonora se concentra entre los 25 Hz y 100 Hz con un máximo en los 40 Hz, que se corresponden con el ruido de las fuentes artificiales emisoras de esa energía, en este caso el de los motores y tubos de escape de los vehículos y camiones que por ahí circulan.

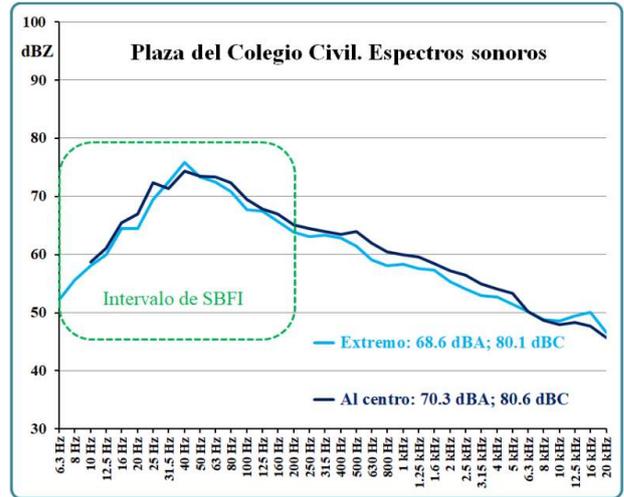


Figura 6. Plaza del Colegio Civil. Comparación de espectros sonoros en cada punto de medición

En la Figura 7 se presentan fotografías tomadas durante las mediciones sobre la acera de la plaza de la Av. Benito Juárez.



Figura 7. Plaza del Colegio Civil. Fotografías tomadas durante las mediciones

Las mediciones en esta plaza fueron realizadas en condiciones de campo abierto y libre de reflexiones, tal como se puede ver en las fotos de la Figura 8.

4.1.3. Medición en acera de mercado. Resultados del nivel de SBFI

En la avenida Benito Juárez, a dos cuadras de la Plaza del Colegio Civil, se encuentra el *Mercado Juárez*. Los locales gastronómicos con puerta hacia la acera son abiertos, por lo que tanto comensales como trabajadores dentro del mercado están expuestos a las emisiones de ruido del tráfico vehicular, con gran cantidad de pasada de camiones con escapes abiertos cuyo espectro de ruido predomina en los SBFI.



Nota. Las imágenes del Google® son del 2020 durante la pandemia de COVID, por esto es por lo que no se encontró la feria de artesanos
 Figura 8. Foto satelital e imágenes de la Plaza del Colegio Civil

En la tabla 3 se presentan los resultados del NSCE de todo el intervalo del tiempo medido con diferentes descriptores de ruido para cada curva de ponderación en frecuencia, registrados en simultáneo por ambos sonómetros en cada punto de medición en esta ubicación.

Tabla 3. Mercado Juárez. NSCE registrado en cada punto de medición con T = 12 min

Posición del micrófono	$L_{Aeq,T}$	$L_{Ceq,T}$	$L_{Zeq,T}$	$L_{Geq,T}$
En esquina	75.1	84.4	85.7	76.0
Al centro	74.4	82.7	84.1	76.4

De la figura 9 y la tabla 3 se tiene la diferencia en decibeles entre las mediciones en la acera, una en el centro y otra cercana a la esquina del mercado por la calle Juárez. Para las mediciones en la esquina de la plaza $L_{Zeq} - L_{Aeq} = 10.6$ dB y $L_{Geq} - L_{Aeq} = 0.9$ dB y para las mediciones en el centro de la acera poniente del mercado $L_{Zeq} - L_{Aeq} = 9.7$ dB y $L_{Geq} - L_{Aeq} = 2$ dB. Esto

debido al paso de vehículos de todo tipo por los puntos de medición, el sonido de personas hablando, pasando cerca del punto de medición, fuentes típicas de zonas comerciales. Aunque los motores de los camiones tienen SBFi como su efecto no es constante no incrementa mucho los valores equivalentes medidos.

En la Figura 10 se presenta la comparación de los espectros sonoros registrados en dBZ, en cada uno de los puntos de medición, donde se observa que no hay diferencia significativa entre los espectros medido con ponderación Z y que predomina el ruido en el rango audible producto de todas las fuentes sonoras en la acera del mercado y la calle. El nivel de presión sonora se concentra entre los 25 Hz y 100 Hz con un máximo en los 40 Hz, que se corresponden con el ruido de las fuentes artificiales emisoras de esa energía, en este caso el de los motores y tubos de escape de los vehículos y camiones que por ahí circulan.

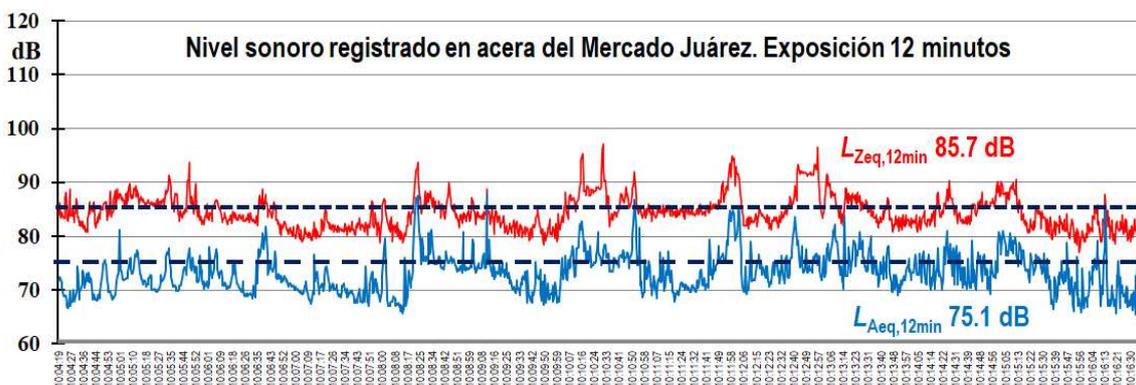


Figura 9. Mercado Juárez. Evolución temporal del NSCE en dBA y dBZ.

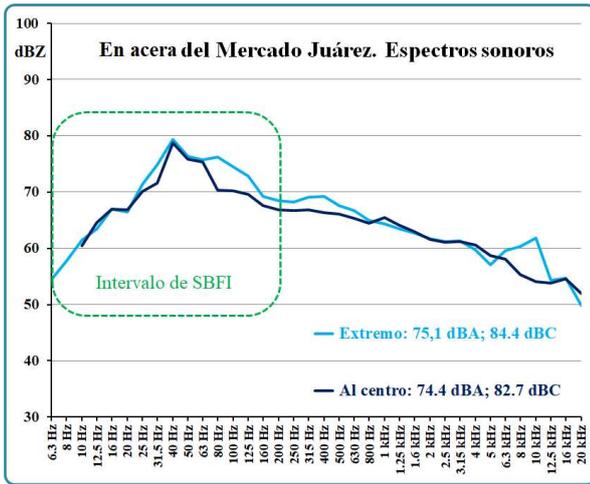


Figura 10. Mercado Juárez. Comparación de espectros sonoros en cada punto de medición.

En la Figura 11 se presentan fotografías tomadas durante las mediciones sobre la acera de la plaza de la Av. Benito Juárez, que ilustran la situación en cada punto.



Figura 11. Mercado Juárez. Fotografías tomadas durante las mediciones



Nota. Las imágenes del Google® son de octubre de 2019.

Figura 12. Foto del frontis del Mercado Juárez

Para tener una mejor idea de la arquitectura urbana del lugar en el que se hicieron las mediciones sonoras, en la Figura 12 se presentan fotos del frontis de este mercado.

4.2. Mediciones durante viaje en el Metro.

El sistema de transporte colectivo METRO de la ciudad de Monterrey es un sistema eléctrico en partes elevado en partes subterráneo. Se hizo una medición en dos puntos dentro del primer vagón, el que posee motores impulsores, una en el centro y otra en un extremo. El viaje tuvo una duración de 16 minutos saliendo de la estación Fundadores a estación Universidad, en el Campus de la UANL, por lo que la primera parte del viaje fue subterráneo y luego por vía elevada.

En la figura 13 se muestran los registros de las mediciones tanto en ponderación «A» como en «Z» durante todo el trayecto del viaje realizado.

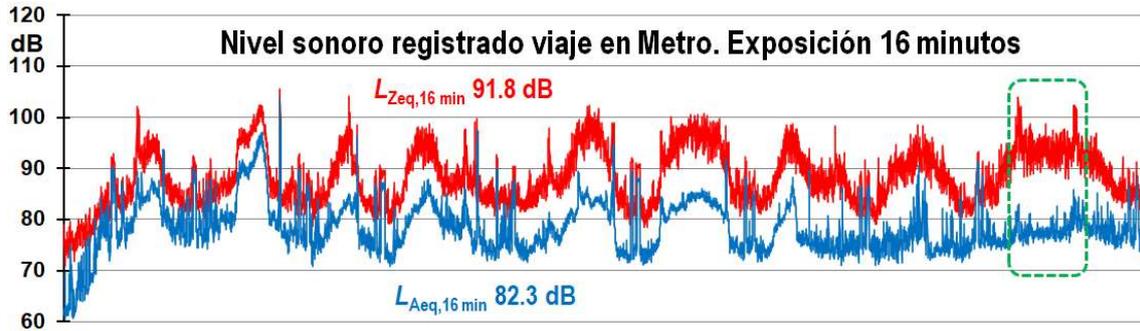


Figura 13. Viaje en Metro. Evolución temporal del NSCE en dBA y dBZ.

En la tabla 4 se presentan los resultados del NSCE de todo el intervalo del tiempo medido durante el viaje, con diferentes descriptores de ruido para cada curva de ponderación en frecuencia, registrados en simultáneo por ambos sonómetros en cada punto de medición.

Tabla 4. Viaje en Metro. NSCE registrado durante en cada punto de medición con T = 16 min.

Posición del micrófono	$L_{Aeq,T}$	$L_{Ceq,T}$	$L_{Zeq,T}$	$L_{Geq,T}$
Extremo	82.3	88.5	91.8	93.1
Al centro	81.7	88.7	92.3	94.2

De la figura 13 y la tabla 4 se tiene que la diferencia en decibeles entre las mediciones en ponderación A comparadas con Z y G, son para las mediciones equivalentes durante el viaje, en el extremo del vagón $L_{Zeq} - L_{Aeq} = 9.5$ dB y $L_{Geq} - L_{Aeq} = 10.8$ dB y para las mediciones en el centro del vagón $L_{Zeq} - L_{Aeq} = 10.6$ dB y $L_{Geq} - L_{Aeq} = 12.5$ dB. Esto indica la presencia de SBFi.

Para conocer la exposición sonora a los SBFi durante un solo viaje entre dos estaciones, en la tabla V se presenta el resumen del NSCE integrado durante los 75 segundos que duró ese trayecto, y es el que está identificado en verde en la Figura 13.

Tabla 5. Viaje en Metro. NSCE registrado en cada punto de medición durante trayecto de T=75 segundos.

Posición del micrófono	$L_{Aeq,T}$	$L_{Ceq,T}$	$L_{Zeq,T}$	$L_{Geq,T}$
Extremo	78.5	93.6	100	103.2
Al centro	77.6	92.1	98.1	101.4

En este caso las mediciones equivalentes durante el trayecto entre 2 estaciones, fue en el extremo del vagón $L_{Zeq} - L_{Aeq} = 21.5$ dB y $L_{Geq} - L_{Aeq} = 24.7$ dB y para las mediciones en el centro del vagón $L_{Zeq} - L_{Aeq} = 20.5$ dB y $L_{Geq} - L_{Aeq} = 23.8$ dB. Es notable el incremento

en los SBFi recibido en equivalente, o sea que los tiempos de los vagones detenidos en las estaciones reducen en formas importante la dosis de baja frecuencia e infrasonidos recibido por los pasajeros.

En la Figura 14 se presenta la comparación de los espectros sonoros registrados en dBZ, en cada uno de los puntos de medición, donde se observa el alto nivel de presión sonora en el intervalo de los SBFi, a consecuencia de que está presente una fuente artificial emisora de esa energía, en este caso el conjunto motor/chasis/colector de corriente del vagón impulsor.

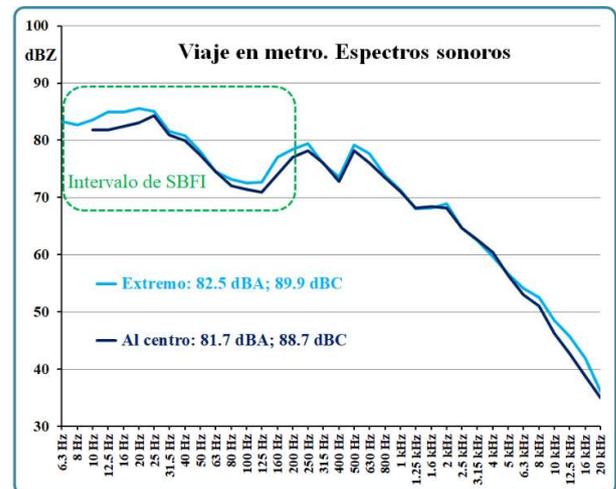


Figura 14. Viaje en Metro. Comparación de los espectros sonoros en cada punto de medición

En la Figura 14 se puede observar que para los dos puntos de medición los espectros en dBZ son prácticamente iguales, con alto nivel de presión sonora en el intervalo de los SBFi, generado principalmente durante el movimiento de los vagones. Las frecuencias preponderantes fueron en las bandas de 1/3 de octava desde 6.3 a 40 Hz.

En la Figura 15 se presentan fotografías tomadas durante las mediciones dentro del primer vagón del metro, que tiene motores impulsores.

5. DISCUSIÓN DEL RESULTADO

Comparando los niveles sonoros en dBZ para un viaje en camión respecto uno en metro, se observa que las personas están expuestas a mayor nivel de SBFi en el camión, siendo una de las causas que el motor a combustión nunca se apaga en cambio el del metro al ser eléctrico se apaga cuando está detenido en las estaciones.

El espectro sonoro registrado en el interior del camión posee mayor contenido de tonos en el intervalo de frecuencias de los SBFi, por la vibración del motor, del ruido del tubo de escape, y la vibración de otras partes de la carrocería por coincidencias mecánicas. La presencia de los SBFi es significativamente alta.

En el caso del metro, la diferencia sonora entre cuando el vehículo está en movimiento y cuando está detenido en las estaciones, hace que la dosis de ruido sea menor cuando está en las paradas. En la fig. 13 que muestra la evolución temporal del SBFi de un viaje en metro, se observan también máximos relativos altos, que están relacionados con la purga de los compresores cuando liberan la presión en el sistema de apertura/cierre de puertas.

Los niveles sonoros en dBZ entre los registrados en la Plaza Colegio Civil son más bajos que los registrados en la acera del Mercado Juárez, porque el lugar es un gran espacio abierto y los sonómetros estuvieron a más de 30 m de distancia de superficies de reflexión, en cambio sobre la acera del Mercado Juárez los sonómetros si bien estuvieron a 3.5 m del frontis de la edificación, la presencia de las marquesinas contribuye a incrementar las reflexiones sonoras. En ambos espectros la energía de los SBFi se concentra alrededor de la frecuencia de tercio de octava de los 40 Hz, que se debe principalmente a la frecuencia de operación de los motores de combustión de los camiones. Para la medición en la plaza, un punto se ubicó al lado de la parada (paradero) de pasajeros, por lo que el nivel sonoro es más alto respecto al otro punto, porque se está más expuesto al ruido de los camiones

Tecnológicamente los camiones usados generalmente en la ZMM no están optimizados desde el punto de vista acústico, pues los motores no están encapsulados, esto es: hay aberturas que permiten la salida del sonido hacia el medio ambiente, e incluso a las personas que descienden del camión o a las que están en la acera esperando en la parada, tal como se ve en las fotografías de la Figura 16.

Respecto al primer vagón del Metro, en él estaban los motores impulsores y los pantógrafos colectores de corriente eléctrica, tal como se puede ver en la figura 17.



Figura 15. Viaje en Metro. Fotografías dentro de un vagón típico del METRO en la ZMM

6. CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra que actividades cotidianas, como es el transportarse en las ciudades, específicamente en la Zona metropolitana de Monterrey, expone a las personas a sonidos de bajas

frecuencias e infrasonido. En este caso se trata de miles de personas diariamente, principalmente expuestos al ruido de los vehículos del sistema de camiones colectivos urbanos (con motores de combustión interna) y el sistema del Metro (con motores eléctricos), tanto dentro como fuera de los vehículos.

La energía acústica a la que están expuestas las personas, incide parcialmente sobre la audición (bajas frecuencias) pero implica la recepción de energía fuera del rango audible que llega y entra al cuerpo humano generando diferentes efectos en las personas, actualmente internacionalmente en estudio. (NTP, 2001).

Los resultados obtenidos para el caso de Monterrey indican que las personas viajando en los camiones urbanos están más expuestas a sonidos de baja frecuencia e infrasonidos con respecto a los que viaja en Metro.



Figura 16. Fotografías de parte trasera de camiones, donde se puede observar la parrilla de entrada de aire al motor



Figura 17. Fotografías de un vagón de Metro, que lleva los motores impulsores.

Los resultados de este estudio muestran también que los niveles sonoros medidos en las aceras de las calles con presencia de camiones urbanos son, en cuanto a SBFI, menores que los existentes dentro de los vehículos; y que espectralmente en las calles predominan los sonidos de baja frecuencia mientras que dentro de los vehículos los infrasonidos son mayores.

En base a lo medido y analizado, es nuestra opinión que es preferible, en lugar de la tradicional comparación entre dBC y dBA (OMS), el utilizar para evaluar la presencia de SBFI la comparación entre dBZ y dBA mientras se desarrollen criterios bien justificados para los diferentes casos de generación de sonidos de baja-frecuencia e infrasonidos.

Los resultados justifican una revisión de las condiciones acústicas de los vehículos de transporte colectivo de la Zona Metropolitana de Monterrey.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, especialmente al equipo de investigadores de su *Laboratorio de Acústica*, y a los participantes del curso de SBFI, por la colaboración durante las mediciones de campo (especialmente a Samuel Pérez T. y Oscar Zapata por compartir sus fotografías).

DESCARGO DE RESPONSABILIDAD

Los autores no alojan sentimientos contra la tecnología, consideran que las actividades comerciales son importantes para las sociedades modernas; presentan esta ponencia bajo una única agenda de investigación científica y no está 'produciendo un

informe' que argumente en contra de ningún desarrollo industrial o actividad comercial.

REFERENCIAS

- Berglund, B; Lindvall, T; Schwela, D.H. & World Health Organization. Occupational and Environmental Health Team (1999) Guidelines for community noise. *World Health Organization*. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/66217>
- BSWA (n.d.) BSWA 308 Class 1 octave sound level meters updating the dual-core (DSP+ARM) architecture to single chip ARM http://www.bswa-tech.com/?p=566&a=view&r=589&city_name=
- CESVA (n.d.) SC310 Sonómetro y Analizador de espectro. Sonómetro integrador Clase 1 ampliable a Analizador de espectros en tiempo real por tercios de octava, Barcelona. https://download.cesva.com/datasheets/sc310_es.pdf
- Elizondo-Garza, F. J.; Montano, W.A. (2022) Ruido urbano en baja-frecuencias e infrasonidos. Estudio de cuatro casos en Monterrey, México. Memoria del 27 Congreso Internacional Mexicano de Acústica, En línea, México, 27 y 28 de octubre de 2022.
- ISO (1995) ISO 7196:1995 Acoustics — Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements.
- ISO (2016) ISO 1996-1:2016 Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 1: Basic quantities and assessment procedures.
- ISO (2017) ISO 1996-2:2017 Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of sound pressure levels.
- Montano, W.A.; Gushiken, E.I. (2019) Infrasound and low frequency noise immission from pipelines. Improving the ISO 1996-2:2017 proposed methods. Cases studies conducted at Los Andes and Peruvian rainforest. *Journal Akustika*. Czech Republic. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85073964328&partnerID=MN8TOARS>
- Montano, W.A.; Gushiken, E.I. (2019) Infrasound and low-frequency noise immission. Structural Vibrations Induced by industrial noise. Improving the ISO 1996- 2:2017 in order to propose a plausible standardized procedure for using in Legal noise assessment. ICA2019. <http://pub.dega-akustik.de/ICA2019/data/articles/001036.pdf>
- Montano, W.A. (2020) Low-Frequency Noise is underestimated by dBA. After 80 years, an LFN descriptor for rating annoyance is necessary. *Journal Noise Theory and Practice*. San Petersburgo, Rusia. http://media.noisetp.com/filer_public/50/f3/50f3c4f8-3c30-4031-adb8-f70ab05c78e1/noisetp2020issue1_6pp7-29.pdf
- Montano, W.A. (2021) Low-frequency noise and infrasound: Towards to a single de-scriptor to their assessments. 27th International Congress on Sound and Vibration. https://iiav.org/content/archives_icsv_last/2021_icsv27/content/papers/papers/full_paper_721_20210502182014255.pdf
- Montano, W.A. (2021) Low-frequency noise vs dBA measurements after 80 years: Does not is time to retire the dBA? The 27th International Congress on Sound and Vibration. https://iiav.org/content/archives_icsv_last/2021_icsv27/content/papers/papers/full_paper_718_20210501191016593.pdf
- NTP (2001) National Toxicology Program. Infrasound Brief Review of Toxicological Literature November 2001. https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/chem_backgr_ound/exsumpdf/infrasound_508.pdf