

XV Congreso Argentino de Acústica, AdAA 2017

Bahía Blanca, 23 y 24 de noviembre de 2017

AdAA2017-03

Diseño de una metodología para medir y caracterizar un vehículo de transporte urbano perteneciente a la Región Metropolitana de Buenos Aires dentro de un mapa de ruido

Esteban Nicolás Lombera^(a),
Nicolás Urquiza^(a),
Leonardo Funes^(a).

(a) Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional de Tres de Febrero, Valentín Gómez 4752, Caseros, Argentina. E-mail: EstebanLomberaSonido@gmail.com

Abstract

This research aims to disclose a methodology capable of inserting the groups belonging to public transport circulating in the metropolitan area of Buenos Aires (RMBA) within the model noise prediction for road traffic NMPB ROUTES used as standard model in the Buenos Aires (CABA). The beginning of this study consisted in the design of a measurement methodology able to characterize the sound emission levels of the fleet of groups of the transport line 105 of the America company. From these results, a new parameter was implemented in the prediction model is performed using only the condition of constant speed. The present work allows to conclude that it is possible to quantify and evaluate the influence of a line of collectives of the RMBA in a noise map.

Resumen

La presente investigación pretende divulgar una metodología capaz de insertar los colectivos pertenecientes al transporte público que circula en la Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA) dentro del modelo de predicción de ruido para tránsito rodado NMPB ROUTES utilizado como modelo estándar en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA). El comienzo de este estudio consistió en el diseño de una metodología de medición capaz de caracterizar los niveles de emisión sonora de la flota de colectivos de la línea de transporte 105 de la empresa América. A partir de estos resultados, se realizó un nuevo parámetro que fue implementado en el modelo de predicción, utilizando únicamente la condición de velocidad constante. El presente trabajo permite concluir, que es posible cuantificar y evaluar la influencia de una línea de colectivos de la RMBA en un mapa de ruido.

1 Introducción

Diversas investigaciones han demostrado que la exposición a altos niveles de ruido genera efectos sobre la salud humana, constituyendo un tema de estudio prioritario a nivel mundial (W. Passchier-vermeer and W. F. Passchier, 2000). Esta problemática creciente ha dado origen a distintas acciones en los agentes de control ambiental para inspeccionar y prevenir todo tipo de contaminación acústica, en particular, cuando estos niveles puedan causar efectos nocivos en la salud. Así mismo, los avances tecnológicos en conjunto con investigaciones aplicadas acompañan al constante crecimiento respecto a estos temas, constituyendo una fuente generadora de material esencial a las entidades controladoras.

La capacidad de simular la situación actual o predecir el comportamiento futuro de la contaminación de ruido ambiental respecto a parámetros estadísticos, es un claro ejemplo sobre estos avances. Este tipo de herramientas se denominan mapas de ruido y son representaciones cartográficas en un tiempo determinado, de una zona concreta, según sus niveles sonoros.

A fin de realizar un mapa de ruido utilizando un método de simulación, se debe primero comprender y estandarizar internacionalmente las distintas formas que una fuente emite ruido, así como también, la propagación del mismo en diferentes medios y materiales. Tal es el caso del ruido producido por el tráfico rodado, principal fuente de ruido en zonas urbanas (U.S Department of transportation federal highway administration, 2016), donde los métodos para el cálculo del nivel sonoro utilizan datos tales como la cantidad estadística de los vehículos que circulan por una carretera, la velocidad de los mismos, el tipo de material de la carretera, la temperatura, etcétera.

Para caracterizar las emisiones de ruido producido por estas fuentes, los investigadores, que desarrollaron los métodos de predicción, identificaron y agruparon las fuentes principales de ruido que se generan en una calle. Esto es lógico ya que tener en consideración la potencia acústica y la directividad de cada tipo de vehículo individual es una tarea inabordable. Sin embargo, los avances tecnológicos en la industria automotriz y la renovación del parque automotor conllevan a que se deba llevar a cabo una revisión frecuente de los modelos de simulación acústica (M. Arana et. all, 2000). Según la nueva Directiva UE 2015/996, el tránsito se clasificará en cinco categorías. Vehículos de motor ligero, pesados medianos, pesados, de dos ruedas y de categoría abierta (diseñado para futuros vehículos). Esta unificación se debe a la relación que poseen algunos vehículos según su peso, velocidad, tipo de motor, etc. De esta manera, se logra simplificar el aporte de los mismos al nivel de presión sonora final.

El aumento en las exigencias ante la prevención de contaminación acústica ha generado diversos trabajos de investigación que dejan en evidencia la necesidad de segregar aún más las distintas clasificaciones vehiculares que realizan los modelos predictivos para tránsito rodado (S. Sandrock et. all, 2008; K. Paunovi et. all, 2014; P. H. T. Zannin, 2006). Este es el caso de los distintos transportes públicos (Colectivos de corta y larga distancia, taxis, tranvías), vehículos de limpieza, de turismo, etcétera. Tal es el caso del estudio realizado en el 2007 que comparó los niveles de ruido del transporte urbano (colectivos, tranvías) en Nottingham a fin de comprender su influencia sonora en la ciudad (M. Frost and S. Ison, 2007). En el mismo año, se presentó un estudio capaz de caracterizar los niveles que generan los aviones que circulan sobre la pista previo a despegar con el propósito de prevenir contaminaciones acústicas ante la construcción de una nueva vía de acarreo en el aeropuerto (C. Asensio et. all, 2007). En esta investigación se desarrolló una metodología de medición capaz de obtener la potencia acústica y la directividad de los mismos. En el 2008, debido a la

introducción de regulaciones de aire limpio y bajas emisiones de ruido en Alemania, llevaron a las autoridades del transporte público a realizar estudios para operar sus flotas vehiculares de manera eficiente y no contaminante. Para lograr estos objetivos, se realizaron estudios respecto a la utilización de la tecnología híbrida en sus vehículos. Como resultado, los autobuses híbridos muestran potenciales mejoras para reducir tanto los gases contaminantes como las emisiones acústicas (D. Jan and D. K. Scholz-starke, 2014). Con relación a los vehículos eléctricos y su implementación cada vez mayor, motivó al estudio publicado en el 2014 (H. Campello Vicente, 2014) en el diseño de una metodología capaz de insertar los mismos en un modelo de predicción para tránsito rodado. Para ello, se obtuvieron sus resultados de potencia por unidad de longitud mediante mediciones in situ. Recientemente, en el año 2016 se publicó un trabajo que estudió la influencia que ejerce el transporte público en el impacto acústico producido por el tránsito. Sus resultados fueron obtenidos de forma empírica a través de mediciones in-situ (G. B. P. Covili and G. Rey-Gozalo, 2016).

Estudios anteriores demuestran que el estímulo más molesto en el tránsito de la RMBA proviene de los autobuses (V. Sosa, 2015). Sería posible cuantificar las emisiones acústicas del transporte público por medio de simulaciones, sin embargo, los resultados tendrían un determinado margen de error (no evaluable) ya que los métodos de predicción para tránsito rodado no proveen la capacidad de subcategorizar vehículos pesados. Esta necesidad motivó a desarrollar una nueva metodología para cuantificar y evaluar las emisiones acústicas que aporta un autobús urbano al tránsito de una ciudad. Para esto, se ha trabajado con la empresa América S.A.C.I dueña de la línea de colectivos 105 que circula dentro de la Región Metropolitana de Buenos Aires con el objetivo de implementar su flota vehicular como variables dentro de las ecuaciones del método de predicción para tránsito rodado NMPB-Routes-96 (método utilizado por la Ciudad Autónoma de Buenos Aires según su ley 1540) a fin de realizar un mapa de ruido de su recorrido. Con referencia a lo mencionado, se presenta el desarrollo de una metodología de medición capaz de brindar resultados de directividad y potencia acústica en diferentes velocidades.

Con esta metodología, se podría medir los diferentes modelos de colectivos (identificando todas sus fuentes de ruido y sus parámetros acústicos) y determinar cuál es el menos ruidoso o el más adecuado en términos de emisión sonora. La capacidad de implementar el aporte del nivel sonoro que genera un colectivo dentro de un mapa de ruido brindaría la posibilidad de predecir con mayor precisión (en comparación a los métodos de predicción para tránsito rodado que ubican al autobús dentro de la categoría de vehículo pesado) futuras rutas de viaje, nuevos planeamientos urbanos o el impacto acústico que generaría el cambio o actualización de una flota nueva de vehículos dentro de un mapa de ruido.

2 Marco teórico

El método de predicción francés (Méthode de Prévision du Bruit des ROUTES – NMPB), ha sido desarrollado por diferentes institutos franceses del Ministère de l'Équipement (CSTB, SETRA, LCPC, CERTU) en base a la “Guide du Bruit” de 1980 (Guide De Bruit Des Transports Terrestres, 1980). Cuenta de dos modelos: modelo fuente y modelo de propagación.

Para poder simular una fuente sonora real, el modelo requiere datos de entrada que permitan caracterizar la misma dentro de un mapa de ruido. En el caso de una vía, se la debe interpretar como una fuente lineal dividida en segmentos, los cuales son representados por fuentes puntuales situadas en su centro. En primer lugar, se obtendrá la potencia acústica para cada fuente puntual ubicadas a 0,5 m de altura y distribuidas equiespaciadamente a lo largo de

una carretera (estas fuentes puntuales serán el punto de partida de la simulación). En segundo lugar, contar con las características del entorno a la fuente (edificios, barreras, calles, etc.) para poder recrearlas de forma virtual a modo de simular las reflexiones producidas a través del método raytracing (A. Krokstad, 1968) que se generan sobre estas, incluyendo la absorción en sus materiales (con la finalidad de atenuar la energía que se produce al colisionar un rayo emisor sobre las mismas). Con relación a la atenuación por la propagación del aire, los programas más conocidos utilizan la normativa ISO9613:1996 la cual especifica un método ingenieril para calcular la atenuación de sonido durante la propagación en exteriores a fin de predecir los niveles de ruido ambiental a una distancia de una variedad de fuentes. Finalmente, el resultado obtenido en un punto receptor será la sumatoria energética de todos los rayos que impactaron sobre el mismo.

Los niveles de emisión se cuantifican a partir del ruido generado por una fuente lineal (en este caso la vía) a una distancia de referencia.

El nivel de potencia acústica L_{Awi} en dB(A) de una fuente puntual i dada con radiación uniforme, se obtendrá según la siguiente expresión:

$$L_{Awi} = L_{Aw/m} + 10 \log_{10} l_i + R_{(j)} + C \quad (1)$$

Donde:

$L_{Aw/m}$ es el nivel total de potencia acústica por metro de vía en dB(A) atribuido a una línea de fuentes especificada, y se obtiene con la fórmula siguiente:

$$L_{Aw/m} = 10 \log_{10} [(E_{vl} + 10 \log_{10} Q_{vl}) \oplus (E_{vp} + 10 \log_{10} Q_{vp})] + 20 \quad (2)$$

E_{vl} : Es el nivel de emisión de ruido por hora para vehículos ligeros a una velocidad v .

E_{vp} : Es el nivel de emisión de ruido por hora para vehículos pesados a una velocidad v .

Q_{vl} : Es el flujo de vehículos ligeros por hora a una velocidad v .

Q_{vp} : Es el flujo de vehículos pesados por hora a una velocidad v .

C : Es una corrección por el tipo de asfalto.

$R_{(j)}$: Es el valor del espectro de tránsito rodado normalizado a 0 dB con ponderación A según la normativa ISO EN 1793-3.

l_i : Es la longitud [m] del segmento de la fuente lineal mediante una fuente puntual i .

El nivel de emisión de ruido de un vehículo E se caracteriza por el nivel sonoro máximo de paso L_{Amax} en dB(A) medido a una distancia de 7,5 metros del eje de la trayectoria del vehículo a 1,2 metros de altura. Estos niveles fueron medidos para innumerables vehículos a lo largo de los tiempos a través de distintas instituciones que mantuvieron la misma metodología de medición. La Guide de Bruit ha cuantificados todos estos resultados para dos tipos de vehículos, en diferentes tipos de circulación y en función de la pendiente y el tipo de la carretera a fin de estandarizar los resultados. Los dos tipos de vehículos son:

- Ligeros: Vehículos con un peso por debajo de 3,5 toneladas a plena carga, en el que se englobarían pequeños vehículos industriales tales como furgones y camiones de pequeño tonelaje.
- Pesados: Vehículos con un peso por encima de 3,5 toneladas a plena carga.

La clasificación en función del tipo de circulación se basa en la aceleración u orden de marcha en el momento de la medición:

- Flujo continuo fluido: Los vehículos se desplazan a velocidad casi constante por el segmento de vía considerado. Se habla de fluido cuando el flujo es estable tanto en el espacio como en el tiempo durante períodos de al menos diez minutos. Se pueden producir variaciones en el curso de un día, pero éstas no han de ser bruscas ni rítmicas.
- Flujo continuo en pulsos: flujos con una proporción significativa de vehículos en transición (acelerando o decelerando), inestables en el tiempo (se producen variaciones bruscas del flujo en períodos de tiempo cortos) y el espacio (en cualquier momento se producen concentraciones irregulares de vehículos en el tramo de la vía considerado).
- Flujo acelerado en pulsos: se trata de un flujo en pulsos y, por lo tanto, es turbulento. Sin embargo, una proporción significativa de los vehículos está acelerando, lo que implica que la noción de velocidad sólo tiene sentido en puntos discretos, pues no es estable durante el desplazamiento.
- Flujo decelerado en pulsos: es el flujo contrario al anterior, pues una proporción importante de vehículos está decelerando.

Del mismo modo, la pendiente de la vía es un parámetro que contemplar ya que genera una mayor demanda de potencia en los vehículos durante las subidas, y por consiguiente un aumento del ruido motor:

- Horizontal: rampa con inclinación inferior al 2%.
- Ascendente: rampa con inclinación superior al 2% en dirección ascendente.
- Descendente: rampa con inclinación superior al 2% en dirección descendente.

Asociando el ruido, también se contempló la superficie de circulación clasificándolas en:

- Categoría R1 bajo ruido (asfalto, en concreto de 0/6 y 0/10, siendo asfalto poroso 0/10)
- Categoría R2 ruido intermedio (mezcla fría, asfalto denso 0/10)
- Categoría R3 alto ruido (hormigón de cemento, tratamiento superficial 6/10 y 10/14, y asfalto concreto 0/14).

El modelo necesita tener como variable de entrada los niveles de ruido generados por hora para un caudal de vehículos. La Guide du bruit proporciona monogramas que dan el valor de emisión sonora E en dB(A) por hora, tanto para un solo vehículo ligero (emisión sonora E_{vl}) como para un vehículo pesado (emisión sonora E_{vp}) para las distintas cuantificaciones desarrolladas anteriormente. Para conseguir estos valores, se obtuvieron los niveles de potencia acústica de cada vehículo (circulando en una vía) a partir del nivel de presión sonora máxima medido in-situ. Posteriormente se realiza la transposición de potencia de ruido que genera éste en 1 hora por metro lineal. El modelo considera la misma como:

$$L_{AW/m} = L_{Aw} + 10 \log_{10} \frac{Q}{1000V} = L_{Aw} - 10 \log_{10} V - 30 + 10 \log_{10} Q \quad (3)$$

Siendo $L_{AW/m}$ el nivel de potencia sonora por metro en dB(A), Q el caudal de vehículos por hora y V la velocidad media.

Finalmente, el nivel de emisión sonora para un vehículo (también expresado como el nivel continuo equivalente) en una hora a una distancia de referencia (considerando el ancho promedio de una carretera) según la Guide du Bruit e incluyendo factores de atenuación es igual:

$$E_v = L_{sq(1hora)} = L_w - 10 \log_{10} V - 50 \quad (4)$$

3 Modelo teórico para implementar autobuses en el modelo de predicción NMPB-Routes-96.

Según el método francés, para obtener el nivel total de potencia acústica por metro de vía en dB(A) atribuido a una línea de fuentes especificada, se deben tener los niveles de emisión de ruido y caudal por hora para vehículos ligeros y pesados tal como se expresa en la fórmula 2. Este será el punto de partida para implementar el ruido generado por la línea de colectivos 105. A la expresión 2, se la adecuó valores de potencia acústica para los vehículos de transporte, definiendo esta nueva variable como E_{v105} .

$$E_{v105} = L_{sq(1hora)} = L_{w105} - 10 \log_{10} V_{105} - 50 \quad (5)$$

De esta forma, y considerando el caudal de vehículos que circula por hora, se desvinculó el aporte de ruido que generan los vehículos de la siguiente manera:

$$L_{Aw/m} = 10 \log_{10} \left[10^{(E_{vi} + 10 \log_{10} Q_{vi})} + 10^{(E_{vp} + 10 \log_{10} Q_{vp})} - 10^{(E_{v105} + 10 \log_{10} Q_{v105})} \right] \quad (6)$$

Donde Q_{v105} es la cantidad de colectivos de la línea 105 que circulan por hora.

Para la aplicación de estos cálculos, primero se desarrollaron mediciones in-situ para obtener los valores de emisión sonora (a través de la potencia y la velocidad) y verificar la directividad de estos vehículos en circulación constante.

3.1 Metodología de medición para obtener la potencia acústica y la directividad de un autobús circulando a velocidad constante.

En términos teóricos, las ecuaciones utilizadas para obtener los niveles de emisión sonora según el método de predicción NMPB-Routes-96 asimilan a la fuente puntual con radiación uniforme en todas las direcciones. Como punto de partida en este trabajo, uno de los objetivos es poder estudiar la directividad del pasar de un colectivo a fin de poder validar la uniformidad de radiación. Investigaciones anteriores (C. Asensio et. all, 2007) han demostrado el uso de ingeniería inversa mediante la norma ISO 9613:1996 para obtener la potencia acústica y la directividad a través de la presión sonora. De manera similar, se diseñó un método de medición compuesto por varias posiciones de micrófonos a modo de representar (considerando las fuentes de ruido de un colectivo de la línea 105) el vehículo de transporte en una fuente puntual ubicada a 0,5 m de altura como especifica el método francés utilizado en este trabajo. Dados los tiempos, esta investigación se limitó en realizar un método para medir colectivos en velocidades constantes siendo éste el evento de mayor repetibilidad en una carretera urbana (J. A. Felipe et all, 2015), para un tipo de asfalto, en una calle sin inclinación y para un flujo continuo en pulsos.

La metodología diseñada, define una zona de medición de forma tal que circule la línea de transporte 105 y que no contenga estructuras reflectantes a su alrededor, es decir, un campo

lo más libre posible. Esta consideración se realiza con el objetivo de utilizar los mínimos parámetros de atenuación según la normativa utilizada a fin disminuir la incertidumbre.

En la figura 1 se presenta la zona de medición, la misma, posee una carretera considerablemente recta de un sentido de doble circulación en condiciones aceptables. El material de la vía es considerado como asfalto de concreto suave perteneciente a la categoría R2 del método de predicción NMPB-Routes-96.

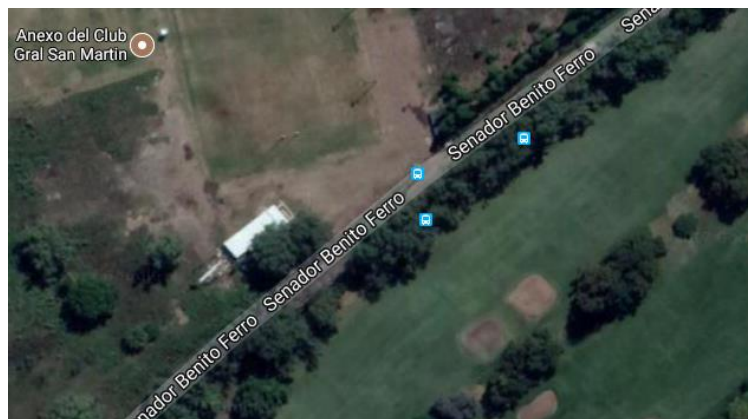


Figura 1. Zona de medición ubicada en el límite entre la localidad de Caseros y de Villa Raffo dentro del Partido de Tres de Febrero provincia de Buenos Aires.

Existen métodos y normativas para medir distintos tipos de ruido que genera el pasar de un vehículo (ISO362:1998), principalmente, ubican un micrófono de medición a 7,5 m de distancia (resultados en bajas frecuencias) a 1,2 m de altura en una vía donde circule el mismo a una velocidad predeterminada. En este trabajo se propuso ubicar una mayor cantidad de puntos de medición (en vertical), de forma tal de abarcar las fuentes características de la línea 105 a fin de representar el colectivo en una fuente puntual posicionada a la misma altura que el modelo francés. Finalmente, y según las especificaciones de la flota vehicular que utiliza la línea 105, se utilizaron las siguientes alturas: 0,75 m, 2 m, 3 m y 4 m. En la figura 2 puede verse la distribución de una torre de medición.

Con esta distribución, y haciendo algunas correcciones según la distancia, fue posible estudiar la directividad vertical de la fuente con un radio de 7,5 m para los ángulos: 0°, 14°, 20° y 50°. Para poder verificar la uniformidad de radiación y tener repetitividad en los resultados de potencia, se ubicaron tres torres más equiespaciadas a lo largo de la vía a una distancia de 5 metros entre sí con el fin de obtener resultados de presión acústica para los diferentes ángulos de emisión. Se decidió posicionar todo el set de medición en un solo lado de la carretera ya que en la misma circulan colectivos de la línea 105 tanto para un lado (idea) como para el otro (regreso), de esta forma se obtuvieron resultados de ambos laterales.

Se utilizaron 16 micrófonos apareados Earthworks M50 con una Interfaz de Audio digital RME Fireface UFX+ para grabar las señales en paralelo. Se utilizó un sonómetro Clase 1 para medir el ruido de fondo constantemente, resguardando estar siempre 15 dB(A) por debajo de cada medición. Se calibraron todos los micrófonos al inicio y al final de la medición. Todas las medidas longitudinales fueron realizadas con un medidor laser. Se destaca la falta de una estación de monitoreo meteorológico, con lo cual, se planificó el día de medición según las estadísticas del clima, el viento, la humedad y la presión. Las mismas variables fueron anotadas según datos externos. Se realizaron grabaciones binaurales de cada evento a modo de ser utilizadas en futuros trabajos psicoacústicos mediante test de molestia,

ruidosidad y sonoridad con el objetivo de anexar un factor de corrección en caso de ser necesario. Los resultados de velocidad se obtuvieron durante el procesamiento de datos.

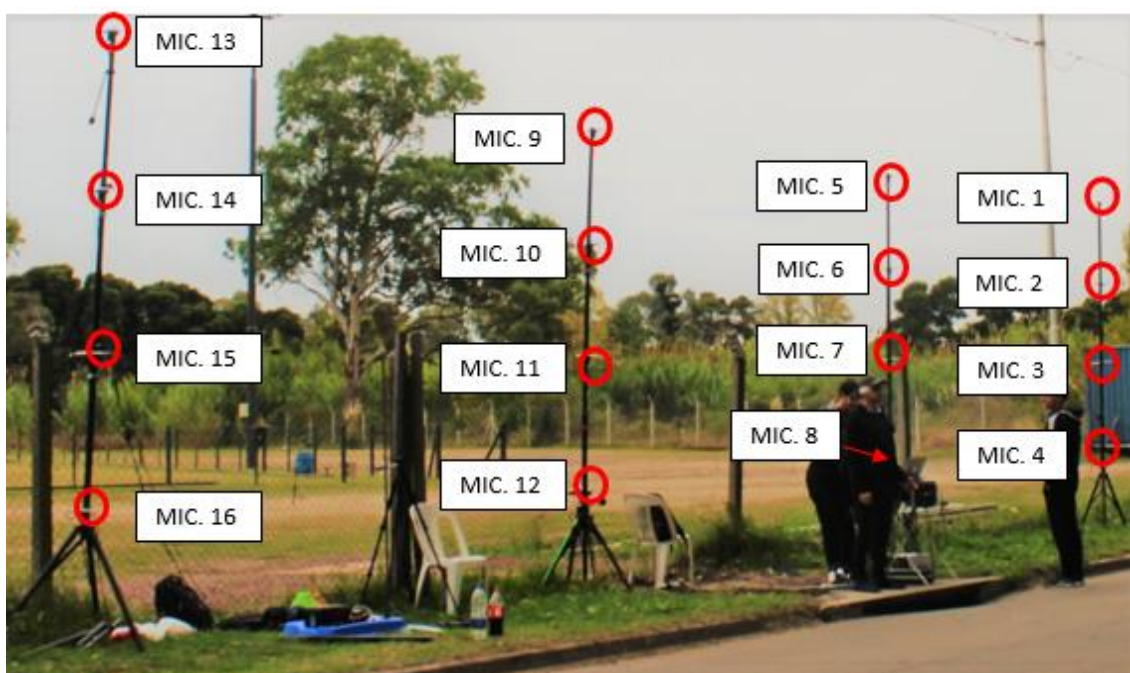
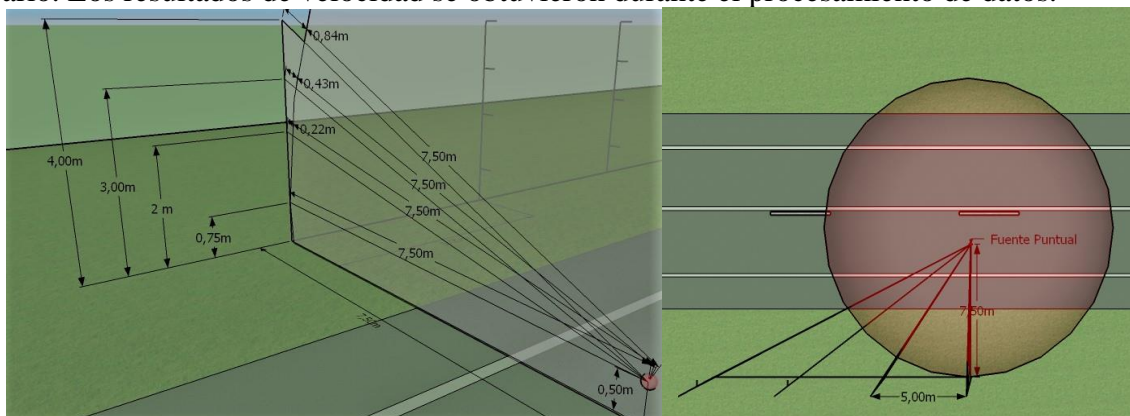


Figura 2. Posicionamiento y numeración de micrófonos de medición Earthworks M50

Se realizaron mediciones para un total de 59 autobuses de la línea 105. El primer proceso consistió en eliminar cualquier evento cuyos audios contengan ruidos no deseados (viento, algún sonido impulsivo aleatorio, superposición de vehículos, etc.), posteriormente, se obtuvieron 44 eventos para trabajar.

Las señales que corresponden a cada evento fueron normalizadas con la señal de calibración, se les aplicó un filtro de ponderación A (creados bajo los estándares ANSI S1.42-2001 e IEC 61672-1) y se filtraron por banda de octava (creados bajo los estándares ANSI S1.11-2004 e IEC 61260:1995). Posteriormente, a cada señal filtrada se la suavizó a través de una media móvil simple (usando un ventaneo de 5000 muestras) y se obtuvieron los niveles máximos de presión sonora tal como expone el método de predicción NMPB. Antes de procesar los audios, se procedió a validar el código con los resultados de un sonómetro clase 1 de la marca Svantek modelo 959 N° de serie 14772 perteneciente a la Universidad Nacional de Tres de Febrero.

Para cada evento se tomó nota de la patente del colectivo que circuló, posteriormente se vinculó la misma con el modelo del vehículo según los datos brindados por la Empresa América S.A.C.I. Las velocidades de cada vehículo se obtuvieron dividiendo la distancia entre las dos torres más alejadas (15 m) y el tiempo entre el pico máximo del pasaje del colectivo en la torre inicial con el pico máximo de la torre final (para cada evento se obtuvieron cuatro resultados debido a los micrófonos. Ej: Mic 2 vs Mic 14). Los resultados positivos definieron los colectivos que circulaban por un carril, y en negativo los que circulaban de forma contraria. Este proceso se realizó por cada banda de octava a modo de obtener mayor cantidad de muestras.

Para obtener la directividad se calcularon los niveles de presión sonora en los distintos ángulos considerados según la metodología de medición. Para ello, fue esencial el uso de la sincronización de todos los audios ya que se trabajó con los tiempos de arribo del colectivo circulando por la vía. Al igual que el procesamiento para obtener la velocidad, el nivel de presión sonora pico referenció el tiempo que identificó el resto de los niveles en cada ángulo, posteriormente se realizaron las correcciones de atenuación según la ISO9613:1996 y se diagramó el patrón polar por banda de octava para cada colectivo.

Finalmente, haciendo uso de las correcciones por atenuación, se obtuvieron los resultados de potencia acústica a través del nivel de presión máxima para la fuente puntual ubicada a 0,5 m a del suelo tal como especifica la NMPB-Routes-96. Para este proceso se consideraron las distancias de la fuente según la dirección de circulación del vehículo.

4 Resultados y discusiones

Cada evento fue medido por cuatro torres distintas, lo que implicó tener repetitividad en los resultados con un orden de 16 muestras. Los resultados de potencia acústica se obtuvieron para cada micrófono teniendo en cuenta las atenuaciones de la normativa ISO 9613:1996. En la figura 3 se muestran los resultados globales de L_w en dB(A) en función de la velocidad junto con una curva de aproximación lineal que mejor se ajusta. Los mismos son expresados por la mediana estadística según una distribución t-student (dada la cantidad de muestras) con un nivel de significación de $P < 0,05$.

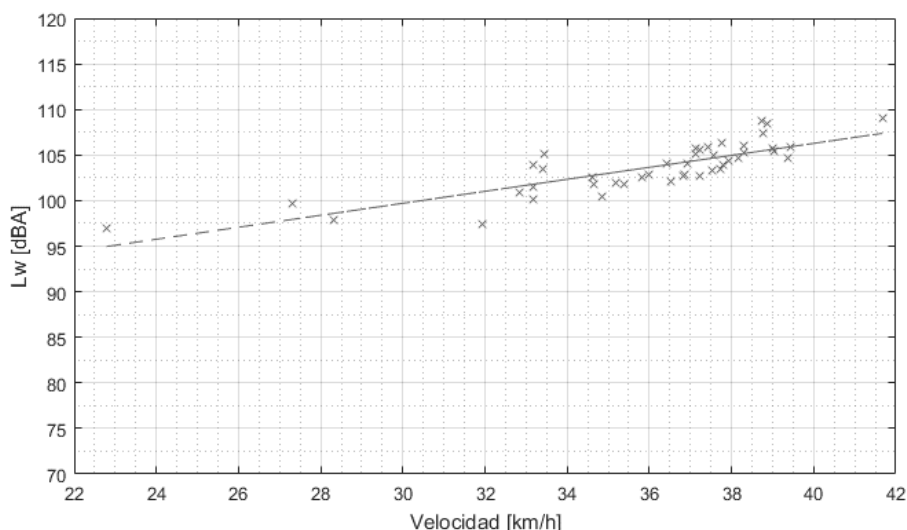


Figura 3. Curva lineal representativa del nivel de potencia sonora [dB(A)] según la velocidad de circulación de un colectivo de la línea 105.

Los resultados presentaron un aumento lineal de la potencia acústica a medida que aumenta la velocidad. Este fenómeno está alineado a diversos estudios los cuales concluyen que los ruidos mecánicos predominan hasta 60 – 70 km/h, posteriormente, el ruido por rodadura comienza a influir (M. Frost and S. Ison, 2007). Está, presenta similitudes a los valores provistos por los métodos de predicción más actualizados, por ejemplo, el método CNOSSOS-EU (2012) presenta una curva de potencia acústica total para vehículos pesados (categoría 3) muy próxima a la obtenida, con la diferencia de poseer una menor pendiente.

Estos resultados, permitieron analizar la gran diferencia respecto a los monogramas de 1980 provistos por la Guide du Bruit con los nuevos métodos de predicción. Es posible discutir las diferencias mecánicas y tecnológicas de aquel momento, ya que las curvas de emisión sonora decrecen entre las velocidades 20 a 60 km/h. Por ejemplo, el uso de la caja de cambio automática que posee la flota de la línea 105, mejorando eficazmente el esfuerzo del motor según la velocidad del colectivo y, en consecuencia, menor será el ruido de propulsión. Por otro lado, la tecnología en la suspensión del vehículo puede alegar la disminución de ruidos mecánicos según el pavimento y la velocidad, entre otros.

En términos espectrales, las curvas de las respuestas en frecuencia de los vehículos no se modifican, sino que varían linealmente según las velocidades. Se puede observar en los espectrogramas de la figura 4 el predominio en bajas y medias frecuencias que generan estos vehículos al pasar debido a la influencia de los ruidos mecánicos como el motor y la toma de aire. El uso de una ponderación A en el método de predicción francés deja en evidencia la disminución del nivel en bajas frecuencias que son producidas por el pasar de estos vehículos.

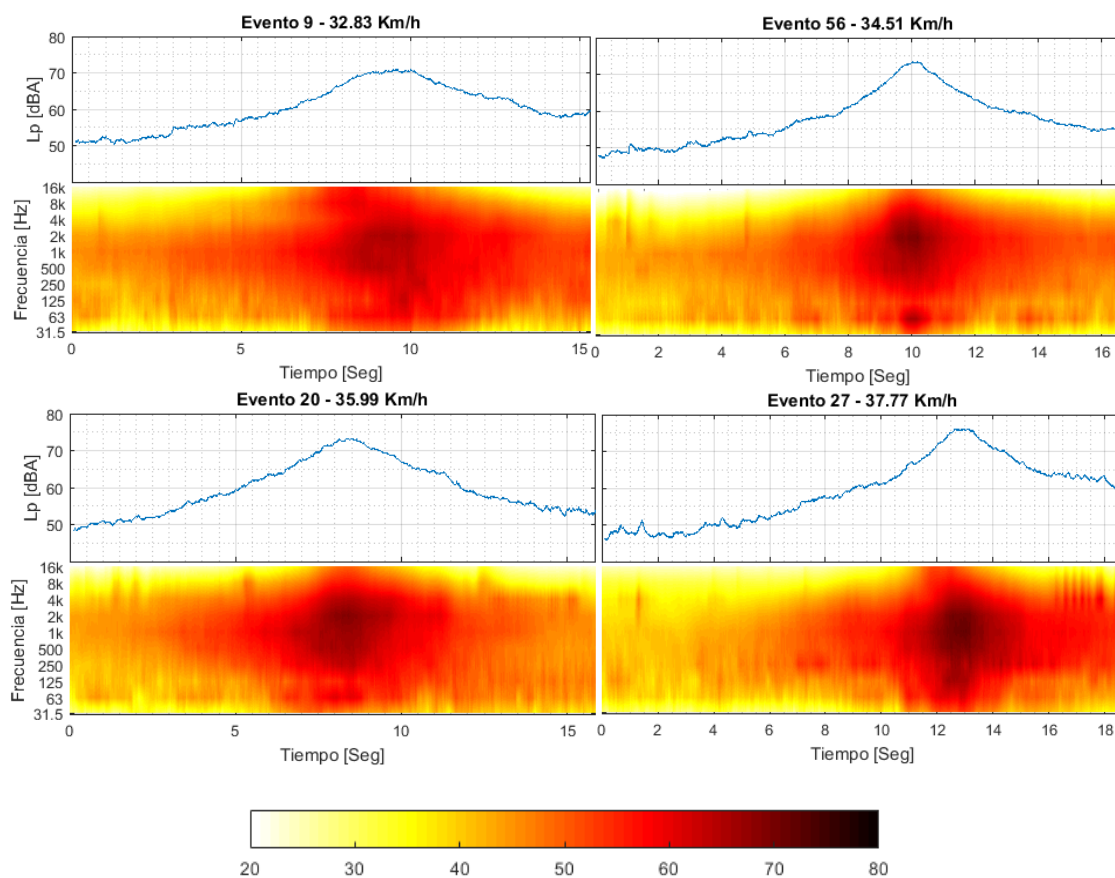


Figura 4. Espectrogramas del nivel sonoro a diferentes velocidades de la línea 105.

Los resultados de directividad fueron homogéneos según su diagrama, es decir, la forma del patrón polar se mantuvo linealmente constante para todas las velocidades, formato de circulación (igual directividad para ambos lados del colectivo) y modelo vehicular.

Se identificó una mayor directividad en los laterales del vehículo, formando una radiación semi-ovalada para cada banda de frecuencia. En la figura 5 se presentan los diagramas polares del evento 56 por banda de octava, y en la figura 6 se muestra el diagrama en 1000 Hz para ambos laterales del mismo evento. Se destaca que los colectivos que se encuentran en los gráficos son ilustrativos para comprender la dirección del vehículo.

A pesar de que se genera mayor radiación en los laterales sobre el eje de la fuente puntual, se discute en la posibilidad de generar una radiación cilíndrica mediante la sumatoria de fuentes puntuales semi-ovaladas. Este estudio, permitió validar la forma de radiación sonora a fin de interpretar este colectivo en el método de predicción NMPB-Routes-96.

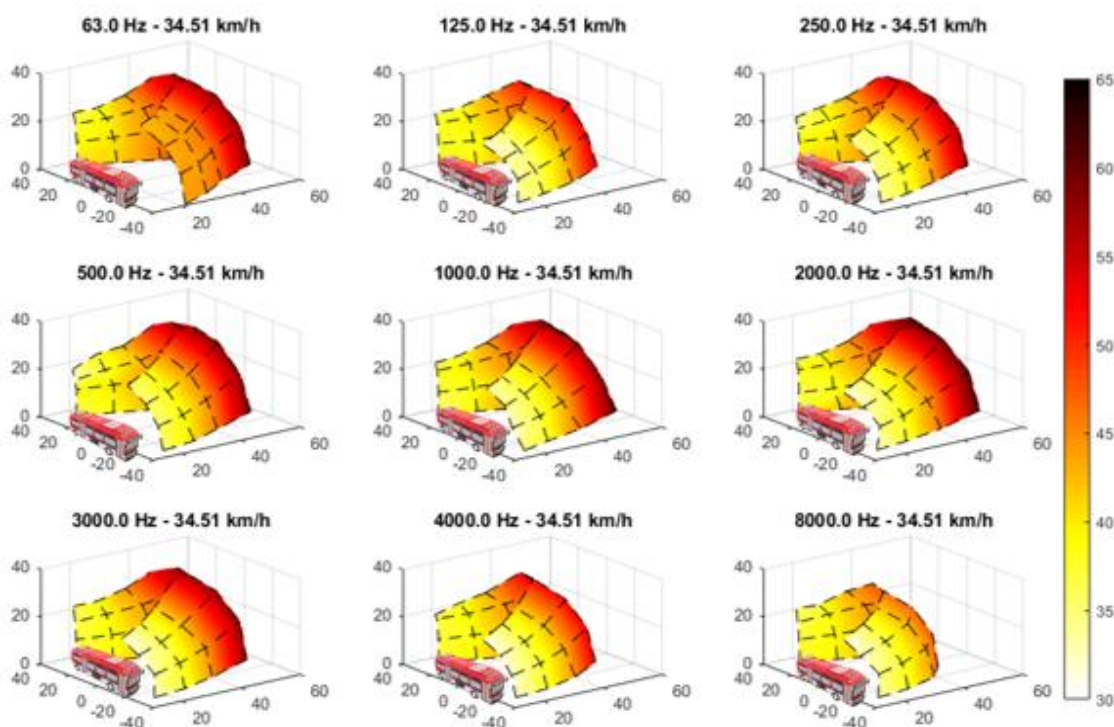


Figura 5. Diagrama polar 3D por banda de octava a 34.51 km/h

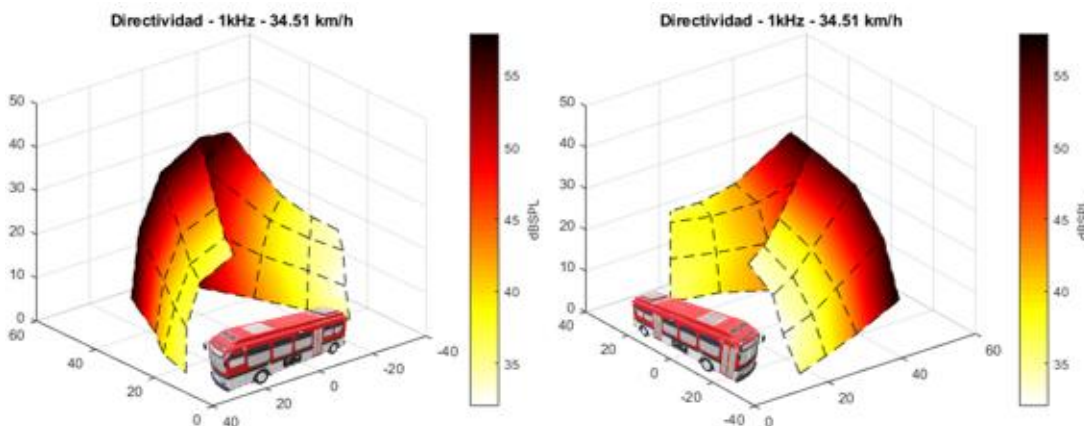


Figura 6. Diagrama polar 3D de ambos lados del colectivo para la banda de 1kHz a 34,51 km/h.

Se implementaron estos resultados en el modelo NMBP-Routes-96 según el modelo teórico propuesto. En primer lugar, se estudió la frecuencia de la flota de colectivos de la línea 105 a fin de consensuar un valor determinado respecto a la cantidad de vehículos por hora que circulan tanto en el día (7:01 a 22:00 hs) como en la noche (22:01 a 7:00 hs) según la ley 1540 de CABA. Para ello, la empresa cuenta con un horario estratégico de circulación según la demanda. En la tabla 1 se muestra el mismo:

Tabla 1. Horarios y frecuencias de la línea de transporte 105.

Horario	Frecuencia	DIA/NOCHE
00:00 a 04:00	Cada 30 min	NOCHE
04:00 a 04:40	Cada 10 min	
04:40 a 05:10	Cada 8 min	
05:10 a 06:00	Cada 5 min	
06:00 a 06:45	Cada 4 min	
06:45 a 08:00	Cada 3 min	DIA
08:00 a 18:30	Cada 4 min	
18:30 a 20:50	Cada 5 min	
20:50 a 22:30	Cada 6 min	
22:30 a 23:00	Cada 6 min	NOCHE
23:00 a 00:00	Cada 12 min	

Se pudo observar que la frecuencia horaria es variable, por lo tanto, se tomó la decisión de calcular el total de vehículos que circularían durante toda la noche (entre las 22:30 hasta las 6:45 hs) y obtener un promedio de circulación por hora. Análogamente, se realizó lo mismo para la franja horaria de día (entre las 6:45 hasta las 22:30 hs). Finalmente, los aforos de la línea 105 durante el día es equivalente a 12 colectivos por hora y durante la noche igual a 6 colectivos por hora.

En segundo lugar, se modificó el caudal total de circulación por hora junto al porcentaje de vehículos pesados a fin de estudiar las diferencias de nivel con y sin los colectivos de la línea 105 (con un caudal de día).

Los resultados presentan una mayor diferencia a medida que disminuye el caudal total y %p. Es evidente que a medida que el total de vehículos pesados se aproxime a 12 vehículos por hora, manifiesta que solamente circula la línea de transporte 105, por lo tanto, mayor será la diferencia. Análogamente, mientras aumente la velocidad mayor será la diferencia de nivel, esto es notorio debido a los resultados experimentales obtenidos en este trabajo. En disparidad, a la hora de aumentar el caudal y %p, no se precien grandes desigualdades de nivel ya que los colectivos de la línea 105 pasan a ser una muy pequeña porción del total de vehículos pesados.

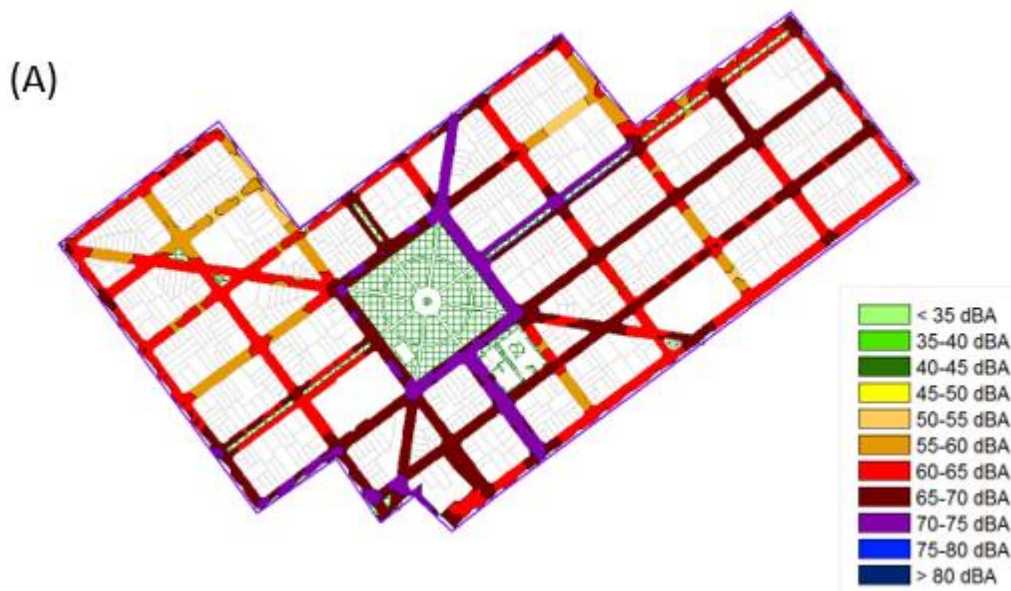
La Ciudad Autónoma de Buenos Aires a través de la Agencia de Protección Ambiental (APrA) está realizando el mapa de ruido de CABA. El mismo, se valida mediante estaciones de monitoreo ubicadas en distintos puntos de la ciudad durante un tiempo considerado. Por medio de ellos, se implementó la metodología propuesta en una zona estratégica donde circula la línea 105 tanto ida como vuelta a modo de estudiar las diferencias de niveles sonoros en caso de no circular este medio de transporte. En la figura 7 se muestra la zona bajo estudio, ubicada en la comuna 11 en los alrededores de la plaza Arenales en el barrio de Villa Devoto.



Figura 7. Diagrama polar 3D de ambos lados del colectivo para la banda de 1kHz a 34,51 km/h.

Utilizando el programa CadnaA versión 4.0 se exportó la tabla de objetos “Carretera” que contiene los datos de entrada e información de todas las carreteras contenidas en la zona de estudio. Se recalcularon los valores de potencia acústica (en función del modelo teórico) en cada carretera donde circula los vehículos de transporte de la línea 105. Finalmente se ingresó una nueva tabla de objetos “Carretera” al programa y se calcularon los niveles de presión sonora del mismo modo que lo hizo la Agencia de Protección Ambiental de CABA.

En la figura 8 se presentan los resultados de L_{dia} de la zona bajo estudio según el mapa de ruido provisto por la APrA con la línea 105 circulando (A) y sin circular (B). Los resultados de emisión para la figura (A) se obtienen desde una malla de 10 x 10 metros con receptores a una altura de 4 metros.



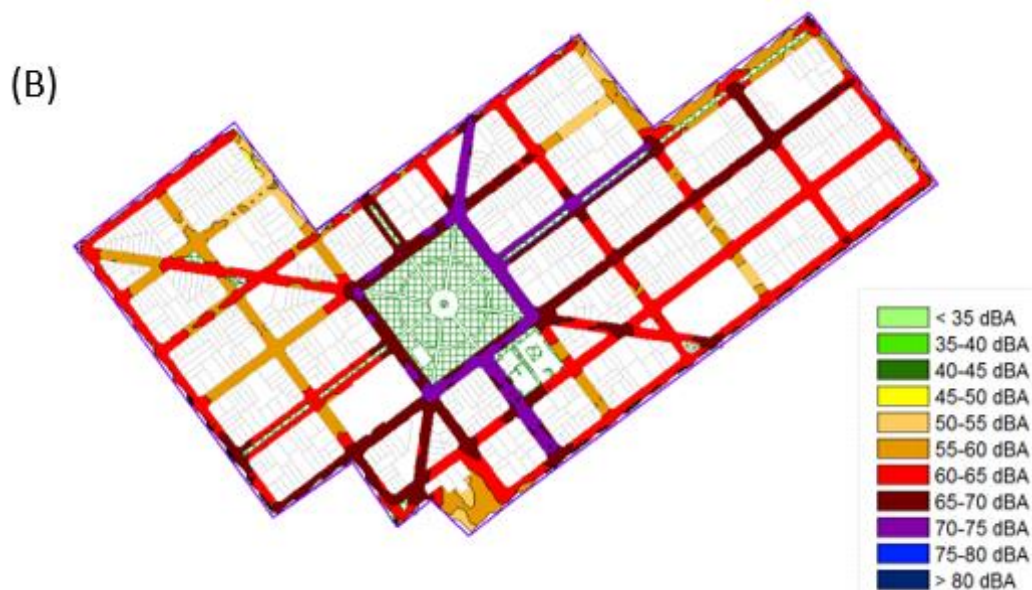
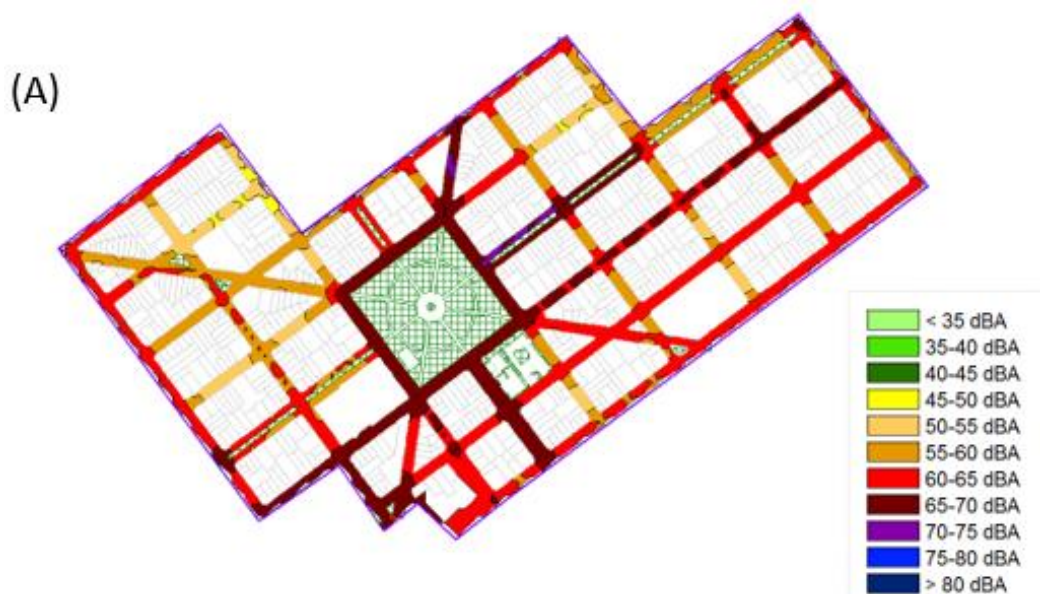


Figura 8. (A) Resultados de L_{dia} de la zona bajo estudio con la línea de transporte 105 circulando – (B) Resultados de L_{dia} de la zona bajo estudio sin la línea de transporte 105 circulando.

Se evidencia una fuerte reducción de nivel sonoro sobre las carreteras de Asunción y Gualeguaychú que llegan hasta casi 5 dBA, esto coincide con el análisis anterior donde a menor cantidad de vehículos pesados mayor es la contribución de la línea 105. En contradicción con las calles de New York y Sanabria, donde circulan otras fuentes pesadas tales como camiones de basura, buses de otra compañía, etc. Los aportes de los colectivos estudiados en estas últimas carreteras rondan entre 0,2 a 1,8 dBA aproximadamente.

Análogamente, se realizaron los resultados para el horario nocturno. En la figura 9 se presentan los resultados de L_{noche} de la zona bajo estudio según el mapa de ruido provisto por la Ciudad Autónoma de Buenos Aires con la línea 105 circulando (A) y sin circular (B).



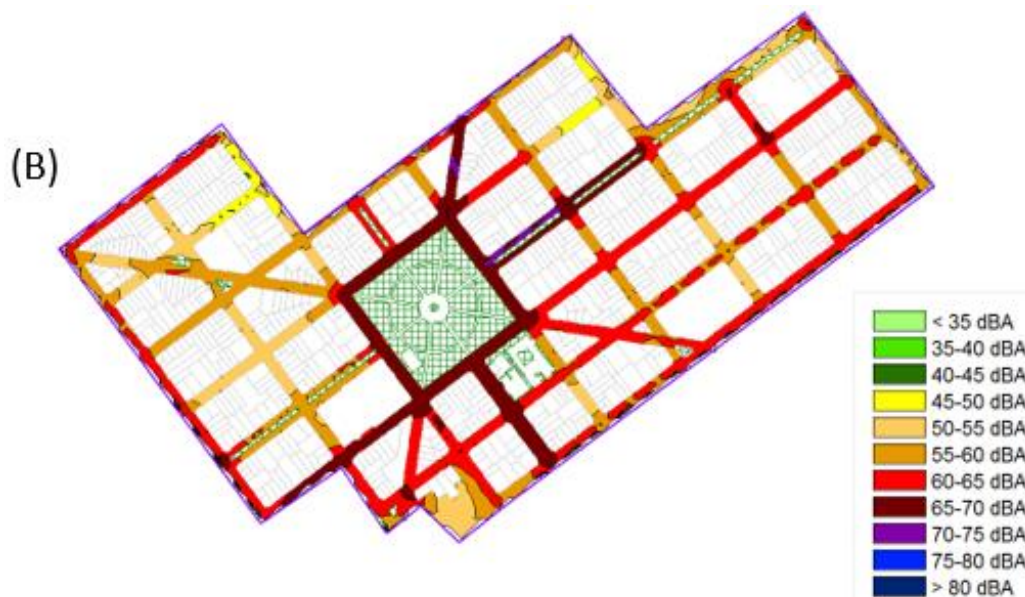


Figura 9. (A) Resultados de Lnoche de la zona bajo estudio con la línea de transporte 105 circulando – (B) Resultados de Lnoche de la zona bajo estudio sin la línea de transporte 105 circulando.

Durante el horario nocturno disminuye altamente la circulación de vehículos particulares, por lo tanto, la predominancia de la flota de la línea 105 es más notoria. Los resultados pueden verse en casi todos sus recorridos, tanto para su servicio de ida como de vuelta.

5 Conclusiones

La metodología desarrollada en este trabajo permite obtener la directividad y los niveles de potencia acústica de cualquier tipo de vehículo considerado una fuente puntual sobre una carretera a 0,5 m de altura. De este modo, es posible verificar el tipo de radiación sonora a fin de validar la posibilidad de formar una fuente lineal distribuyendo cada emisor equiespaciadamente a una distancia predeterminada.

Es posible implementar todo tipo de vehículo dentro de las ecuaciones semi-empíricas provistas por el Método de Predicción Frances para tránsito rodado NMPB-Routes-96 siempre y cuando cumplan con ciertas características que demanda el modelo, tales como su directividad (semi esférica o semi ovalada), tipo de flujo vehicular el cual ejerce y tipo de asfalto en donde circula.

La flota de colectivos pertenecientes a la empresa de transporte América S.A.C.I que circulan de forma constante sobre una carretera pueden cuantificarse en una misma directividad semi-ovalada y en una potencia acústica según su velocidad de circulación. En términos de radiación sonora, no se presentaron diferencias respecto a las emisiones en los laterales de los colectivos. Los resultados espectrales evidencian la presencia de altos niveles en bajas frecuencias dados los ciclos de combustión del motor, los mismos no son apreciados por el modelo francés al utilizar una ponderación A.

La curva que pondera los niveles de potencia acústica de los autobuses de la línea 105 en función de la velocidad no se aproximan a las provistas para vehículos pesados por el método NMPB-96, sin embargo, se asemejan al modelo fuente más avanzado en la actualidad tal como el método de predicción CNOSSOS-EU. Estos resultados dejan en evidencia la

desactualización del modelo NMPB-Routes-96 dados los progresos tecnológicos en vehículos de transporte urbano.

Referencias

- W. Passchier-vermeer and W. F. Passchier (2000). “*Noise Exposure and Public Health*”. *Env. Heal. Perspect* (108) 6, 123–131.
- U.S Department of transportation federal highway administration (2016). “*Highway Traffic and Construction Noise - Problem and Response*”, 1–14.
- M. Arana; A. Martínez de Vírgala; A. Aleixandre; M.L. San Martín and A. Vela (2000). “*Modelos de predicción del ruido de tráfico rodado: comparación de diferentes standards europeos*”. *Tecniacústica* 2000.
- S. Sandrock; B. Griefahn; T. Kaczmarek; H. Hafke; A. Preis and T. Gjestland (2008). “*Experimental studies on annoyance caused by noises from trams and buses*”. *J. Sound Vib.*, (313) 3–5, 908–919.
- K. Paunovi; G. Belojevi and B. Jakovljevi (2014). “*Noise annoyance is related to the presence of urban public transport*”. *Sci. Total Environ* (481), 479–487.
- P. H. T. Zannin (2006). “*Occupational noise in urban buses*”. *International Journal of Industrial Ergonomics* 38.
- M. Frost and S. Ison (2007). “*Comparison of noise impacts from urban transport*”, *Proc. Inst. Civ. Eng. Transp.*(160) 4, 165–172.
- C. Asensio; I. Pavón; M. Ruiz; R. Pagan and M. Recuero (2007) “*Estimation of directivity and sound power levels emitted by aircrafts during taxiing, for outdoor noise prediction purpose*”. *Applied acoustics* 68.
- D. Jan and D. K. Scholz-starke (2014). “*Alternative Drivetrains in Public Transport – Potentials of Hybrid Buses regarding Exhaust and Noise Emissions*”, *Transp. Res. Arena*.
- H. Campello Vicente (2014). “*Adaptación del modelo de predicción de ruido de tráfico rodado NMPB-ROUTES 2008 a la presencia de vehículos eléctricos*”. Tesis Doctoral, Escuela Politécnica Superior de Elche, Universidad Miguel Hernández Elche.
- G. B. P. Covili and G. Rey-Gozalo (2016). “*Analysis of the influence of public transport in noise levels in the city of Talca*”, 22nd International Congress on Acoustics.
- V. Sosa (2015) “*Annoyance of road traffic noise in buenos aires city*”. *Rep. Acoust. Lab. Univ. Nac.* Tres Febrero.
- Guide De Bruit Des Transports Terrestres (1980). “*Prevision Des Niveaux Sonores*”.Ministere de l'environnement et du cadre de vie, Ministere des transports.
- A. Krokstad; S. Strom and S. Sördsdal (1968). “*Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique*”. *Journal of Sound and Vibration*, (8) 1, 118 – 125.
- J. A. Felipe; R. de A. Alfonso and L. M. José María (2014). “*Analysis of driving cycles in fixed urban routes*”. *Inst. Univ. Investig. del Automóvil*.