

Universidad Nacional de Tres de Febrero

INGENIERÍA DE SONIDO

RUIDO ACÚSTICO

TRABAJO PRÁCTICO: RUIDO URBANO Y FERROVIARIO

Autores:

Franco Daniel Areco - francoareco53@gmail.com

Juan Martín Rucci - rucci45744@estudiantes.untref.edu.ar

Juan Almaraz - juan.almaraz097@gmail.com

Calquin Facundo Epullan - epullan44186@estudiantes.untref.edu.ar

Índice

1. Introducción	1
2. Marco Teórico	2
2.1. Descripción de fuentes sonoras	2
2.2. Normativa	3
2.2.1. Nacionales	3
2.2.2. Internacionales	4
3. Procedimiento	4
3.1. Zonas de evaluación	4
3.2. Aforo vehicular	9
3.3. Medición de niveles de ruido urbano	9
3.3.1. Medición de ruido de tráfico vehicular	9
3.3.2. Medición de ruido de tren	11
3.4. Simulación de mapa de ruido	11
3.4.1. Simulación del ruido de tráfico vehicular	12
3.4.2. Simulación de ruido de tren	13
4. Resultado y análisis	13
4.1. Ruido de tráfico vehicular	13
4.2. Ruido de tren	14
4.3. Simulación	15
4.4. Medidas de mitigación y planes de acción para la reducción del ruido urbano y ferroviario en Caseros	21
4.4.1. Reducción del nivel de las alarmas ferroviarias	21
4.4.2. Implementación de paisajes sonoros como solución de mitigación del ruido urbano	21
4.4.3. Reorganización del tráfico y arborización para la mitigación del ruido en areas sensibles	22
4.4.4. Enfoque en retroalimentación, adaptación y colaboración interdisciplinaria .	22
5. Conclusión	22
Referencias	24

1. Introducción

El crecimiento continuo de la urbanización a nivel mundial ha provocado un aumento sostenido en la cantidad de vehículos y otras fuentes de ruido, resultando en un incremento notable de la contaminación acústica en áreas urbanas. Este fenómeno está vinculado no solo con la cantidad de fuentes sonoras, sino también con sus características específicas, tales como el tipo de vehículos, el estado de los neumáticos, la carga transportada, la composición y estado de las vías, y la diversidad de motores, que incluyen desde los tradicionales motores de combustión hasta vehículos híbridos y eléctricos. Además, otros medios de transporte, como motocicletas, aviones y trenes, también contribuyen al complejo paisaje sonoro urbano. En este contexto, la expansión de las áreas comerciales y los núcleos urbanos intensifica los problemas de contaminación acústica, afectando significativamente la vida de las personas, su salud y bienestar. Los efectos del ruido urbano, ya sea en forma de molestias, interrupciones o incluso daños a la salud, son elementos cruciales en la evaluación de la calidad del ambiente en una zona específica.

Para enfrentar estos desafíos, se emplean los mapas de ruido, herramientas fundamentales que permiten comprender, cuantificar y proyectar la situación acústica en una región determinada. Estos mapas no solo son valiosos para identificar las áreas más afectadas por la contaminación acústica, sino que también desempeñan un papel esencial en la gestión del entorno urbano. Entre las principales aplicaciones de los mapas de ruido se encuentran:

- **Planificación Urbana Sostenible:** Los mapas de ruido proporcionan información clave para la planificación del desarrollo urbano sostenible. Permiten identificar las zonas más afectadas por el ruido, lo que facilita la toma de decisiones informadas sobre zonificación, ubicación de viviendas, espacios verdes y áreas industriales.
- **Mitigación de la Contaminación Acústica:** Con la información que ofrecen los mapas de ruido, las autoridades pueden implementar medidas específicas para reducir la contaminación acústica en las áreas más críticas. Esto puede incluir la instalación de barreras acústicas, restricciones de horarios o modificaciones en las rutas de tráfico.
- **Mejora de la Salud Pública:** La exposición prolongada al ruido urbano puede tener efectos negativos en la salud, tales como problemas de sueño, estrés y enfermedades cardiovasculares. Los mapas de ruido ayudan a identificar las zonas de mayor riesgo y apoyan iniciativas de salud pública orientadas a reducir estos riesgos.
- **Cumplimiento Normativo:** Los mapas de ruido son esenciales para cumplir con las regulaciones locales e internacionales relacionadas con la contaminación acústica. Proporcionan una base objetiva para evaluar el cumplimiento de los límites de ruido establecidos por las autoridades competentes.

Este informe se centra en los pasos necesarios para crear un mapa estratégico de ruido urbano utilizando el software comercial CadnaA [1]. Este trabajo busca contribuir a la comprensión de la contaminación acústica en el área comercial de Caseros, Provincia de Buenos Aires, y proporcionar una base sólida para futuras acciones de control y planificación urbana, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de los residentes, concienciar a los ciudadanos y promover un entorno más saludable y sostenible.

El propósito principal de este informe es la elaboración de un mapa de ruido del tráfico en un área comercial de Caseros, Provincia de Buenos Aires. Para ello, se ha empleado el software CadnaA, aplicando los métodos de cálculo vigentes en la provincia de Buenos Aires. Además, se busca facilitar la comparación de los resultados proporcionados por el programa de predicción con mediciones previamente realizadas o futuras mediciones en la zona.

2. Marco Teórico

2.1 Descripción de fuentes sonoras

Las áreas comerciales son entornos que se caracterizan por una intensa actividad económica y social, lo cual genera con frecuencia niveles elevados de ruido. Las diversas fuentes sonoras que componen el paisaje acústico en estas áreas incluyen:

- **Tráfico Vehicular:** El tráfico vehicular representa una de las principales fuentes de ruido en las áreas comerciales. Esta categoría abarca una gran variedad de vehículos, tales como automóviles, camiones, motocicletas y autobuses. El ruido generado por estos vehículos proviene de diferentes componentes, como motores, bocinas, frenos y la interacción de los neumáticos con la superficie del pavimento. Las subcategorías específicas son:
 - **Vehículos livianos (menos de 3.500 kg):** Incluyen autos particulares y camionetas medianas.
 - **Vehículos pesados (más de 3.500 kg):** Se subdividen en autobuses y camiones.
 - **Vehículos de dos ruedas:** Comprenden motos y ciclomotores.
- **Trenes:** El ruido producido por los trenes es un factor importante de la contaminación acústica urbana, ya que estos vehículos poseen un ancho de banda sonoro significativo. Los trenes generan ruido a partir del roce de las ruedas con los rieles, el motor y la transmisión, el frenado, y el paso sobre cruces y puentes. Este ruido puede causar:
 - **Molestias para los residentes:** El ruido continuo de los trenes puede afectar la calidad de vida y el bienestar de las personas que viven cerca de las vías férreas, interfiriendo con su sueño y tranquilidad.
 - **Impacto en la salud:** La exposición prolongada al ruido de los trenes se ha asociado con efectos adversos para la salud, como el estrés, problemas de sueño y aumento de la presión arterial, contribuyendo a condiciones de salud crónicas.
 - **Daño a la propiedad:** Las vibraciones provocadas por los trenes pueden dañar edificios y estructuras cercanas, ocasionando costos económicos para los propietarios.
- **Estacionamientos:** Los estacionamientos en zonas comerciales son fuentes de ruido debido al constante movimiento de vehículos, especialmente durante las horas pico. Los sonidos de motores arrancando y frenando, junto con las maniobras de estacionamiento, contribuyen al ruido ambiental.
- **Cargas y Descargas de Mercancías:** Las actividades de entrega de mercancías a los comercios generan ruido, especialmente con el uso de camiones de carga pesada, carretillas elevadoras y carros de reparto. Estas operaciones, que a menudo se realizan temprano en la mañana o tarde en la noche, pueden ser molestas para los residentes cercanos.
- **Música y Anuncios Publicitarios:** Muchos comercios utilizan sistemas de sonido para atraer a los clientes con música de fondo o anuncios publicitarios. La amplificación excesiva o el mal control del volumen pueden incrementar los niveles de ruido en la zona.
- **Clientes y Actividades en Exteriores:** Es común que los clientes se reúnan en espacios al aire libre, como terrazas de restaurantes o áreas de descanso. Las conversaciones, risas y otros sonidos asociados con estas actividades aumentan el nivel de ruido.

- **Obras de Construcción y Mantenimiento:** En las áreas comerciales, es frecuente realizar trabajos de construcción, renovación y mantenimiento de edificios. Las maquinarias, herramientas y actividades de construcción son fuentes importantes de ruido.
- **Sistemas de Climatización y Ventilación:** Los sistemas de climatización y ventilación de los edificios comerciales generan un zumbido constante, especialmente en climas extremos. Si estos sistemas no reciben un mantenimiento adecuado, pueden producir ruidos anómalos.
- **Ruidos Producidos por Personas:** La actividad humana en las áreas comerciales abarca una amplia gama de ruidos, desde conversaciones y llamadas telefónicas hasta el murmullo constante de calles congestionadas.

La interacción de estas diversas fuentes de ruido puede resultar en un entorno acústico complejo en las zonas comerciales, lo que hace que la gestión y el control del ruido sean esenciales para mantener la calidad de vida de los residentes y mejorar la experiencia de quienes frecuentan estas áreas.

2.2 Normativa

2.2.1 Nacionales

Las normativas y regulaciones relacionadas con la medición y evaluación de ruidos ambientales, en particular los generados por el tráfico vehicular, varían significativamente tanto a nivel internacional como dentro de un mismo país. Estas diferencias se deben a las distintas dinámicas sociales y urbanísticas de cada región. En Argentina, no existe una legislación nacional que establezca directrices específicas para la evaluación del ruido vehicular y la elaboración de mapas estratégicos de ruido. Sin embargo, se dispone de diversas fuentes de referencia para la realización de mediciones y evaluaciones de ruido ambiental, con el propósito de mapear las condiciones acústicas de una región de interés.

Uno de los documentos clave es el “Protocolo de Mediciones para Trazado de Mapas de Ruido Normalizados”, elaborado por el Laboratorio de Acústica y Electroacústica (LACEAC) [2] del Departamento de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. Este protocolo integra normativas nacionales e internacionales y recopila investigaciones y mediciones relacionadas con el ruido generado por el tráfico vehicular, ferroviario y aéreo.

Asimismo, las Normas IRAM 4113 [3], equivalentes a la serie de normas ISO 1996 [4], describen los métodos para evaluar la incomodidad causada por el ruido ambiental a largo plazo mediante el uso de un indicador denominado “nivel de evaluación”. Este nivel es un nivel de presión sonora continuo ponderado A corregido, que se aplica para describir mediciones o predicciones ajustadas con términos de corrección que consideran factores como la impulsividad, la tonalidad y las características de baja frecuencia.

Por otro lado, las Normas IRAM 4062 [5] establecen un método para la obtención de niveles de sonido, incluyendo correcciones relacionadas con la tonalidad, impulsividad y bajas frecuencias. A diferencia de las IRAM 4113, las IRAM 4062 no completan el proceso de clasificación del nivel de evaluación. No obstante, se utilizan como referencia en algunas municipalidades y se aplican exclusivamente para determinar el contenido de baja frecuencia e impulsivo de los niveles medidos en exteriores.

En la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), la Ley 1540 y su decreto reglamentario 740/2007 [6] establecen los límites máximos permitidos (LMP) para diferentes tipos de áreas de sensibilidad acústica (ASAE) y describen el procedimiento técnico para la elaboración de mapas estratégicos de ruido. Este marco normativo se basa en gran medida en las directrices de la Directiva 49 del Parlamento Europeo, aunque se diferencia en el uso de indicadores de ruido, empleando Lday y Lnigh, y excluyendo el nivel vespertino (Levening). Esta división en períodos del día coincide con lo estipulado en las Normas IRAM 4113.

2.2.2 Internacionales

La Directiva 49 del Parlamento Europeo [7] es una guía esencial para la evaluación del ruido del tráfico vehicular a nivel global. Su objetivo es establecer un enfoque común para prevenir, reducir o evitar los efectos negativos y las molestias provocadas por la exposición al ruido ambiental. La directiva proporciona métodos para la creación de mapas de ruido, la divulgación de información sobre el ruido ambiental y sus impactos, y la adopción de planes de acción basados en los resultados de los mapas de ruido. Utiliza indicadores como el nivel equivalente diurno, vespertino y nocturno (Lday) y el nivel nocturno aislado (Lnigh) en la elaboración y revisión de mapas estratégicos de ruido. Muchos programas de simulación de mapas de ruido, como el software CadnaA, se basan en esta regulación. Entre los métodos de cálculo recomendados por la directiva se incluyen ISO 9613 [8] (para ruido industrial), NMPB Routes 96 [9] (método francés para ruido vehicular) y Reken (método holandés para ruido ferroviario).

Para el ruido generado por el tráfico vehicular, la Directiva 49 clasifica los vehículos en cinco categorías distintas, que abarcan vehículos ligeros, vehículos pesados, motocicletas y ciclomotores, además de una categoría para vehículos híbridos y eléctricos. En el contexto de estas herramientas, los automóviles, motocicletas y camiones se consideran fuentes puntuales ubicadas a una altura de cinco centímetros respecto al suelo.

3. Procedimiento

Para llevar a cabo las mediciones de ruido ambiental, se utilizó un sonómetro *Svantek Svan 959*, el cual es un sonómetro integrador de clase 1, equipado con una pantalla antiviento para minimizar las interferencias causadas por el viento. Para garantizar la precisión de las mediciones, se empleó un calibrador *Svantek SV-30-A*. Además, se utilizó un medidor de distancia láser *BOSCH DLE 70* para obtener mediciones precisas de las distancias. El sonómetro fue montado en un *trípode* para asegurar su estabilidad durante las mediciones. Asimismo, se utilizó una grabadora portátil *Zoom H4n* para registrar el sonido ambiental de manera continua.

Las mediciones de ruido se realizaron utilizando tres perfiles diferentes: Ponderación A en **Slow**, Ponderación C en **Slow** y Ponderación A en **Fast**. Cada medición tuvo una duración de integración de 5 minutos. El sonómetro se colocó a una altura de 1,5 metros del suelo y se verificó que no hubiera superficies reflectantes a menos de 2 metros de distancia para evitar influencias externas en los resultados. Las mediciones se realizaron en las zonas designadas como 1, 2 y 3. Además, se efectuaron mediciones específicas del ruido ferroviario para estimar el nivel de potencia de esta fuente sonora.

Las mediciones se llevaron a cabo el 6 de mayo del 2024, comenzando a las 19:00 horas y finalizando a las 21:00 horas. Las condiciones meteorológicas al inicio y al final de las mediciones se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Condiciones meteorológicas al inicio y fin de la medición [10].

Hora	Temperatura	Presión atmosférica	Vel. viento	Humedad
19:00 hs	17,2 °C	1004,5 hPa	3 m/s	99 %
20:00 hs	17,0 °C	1005,3 hPa	2 m/s	99 %
21:00 hs	16,9 °C	1005,5 hPa	4 m/s	99 %

3.1 Zonas de evaluación

Para la confección del mapa de ruido, se identificaron cuatro zonas diferentes de medición, cada una con tres puntos específicos para la recolección de datos. En la Figura 1 se muestra el mapa del entorno, con las zonas de medición destacadas. El sector seleccionado corresponde al centro

comercial de la región, que es uno de los corredores con mayor tráfico debido a la intersección de las dos avenidas principales, así como al cruce del tren.

Es importante señalar que el área de estudio no es exclusivamente comercial. Por ejemplo, en la avenida San Martín, al norte de la zona 3, se encuentra una de las sedes del Hospital Italiano, así como edificios residenciales. Además, en una de las esquinas de la zona 1, se localiza una escuela primaria. Estos recintos tienen recomendaciones y límites sonoros específicos que podrían verse afectados por la contaminación acústica presente en el área. Finalmente, la zona 4 se encuentra ubicado en una zona residencial.

La ubicación estratégica de estas zonas permite un análisis detallado del impacto del ruido en diversos tipos de infraestructuras y en la vida cotidiana de los residentes y usuarios del área. Las mediciones en estas zonas no solo capturan la intensidad del tráfico vehicular y ferroviario, sino también los efectos del ruido en instalaciones sensibles como hospitales y escuelas, que poseen requisitos acústicos más estrictos debido a su función y la población que atienden.

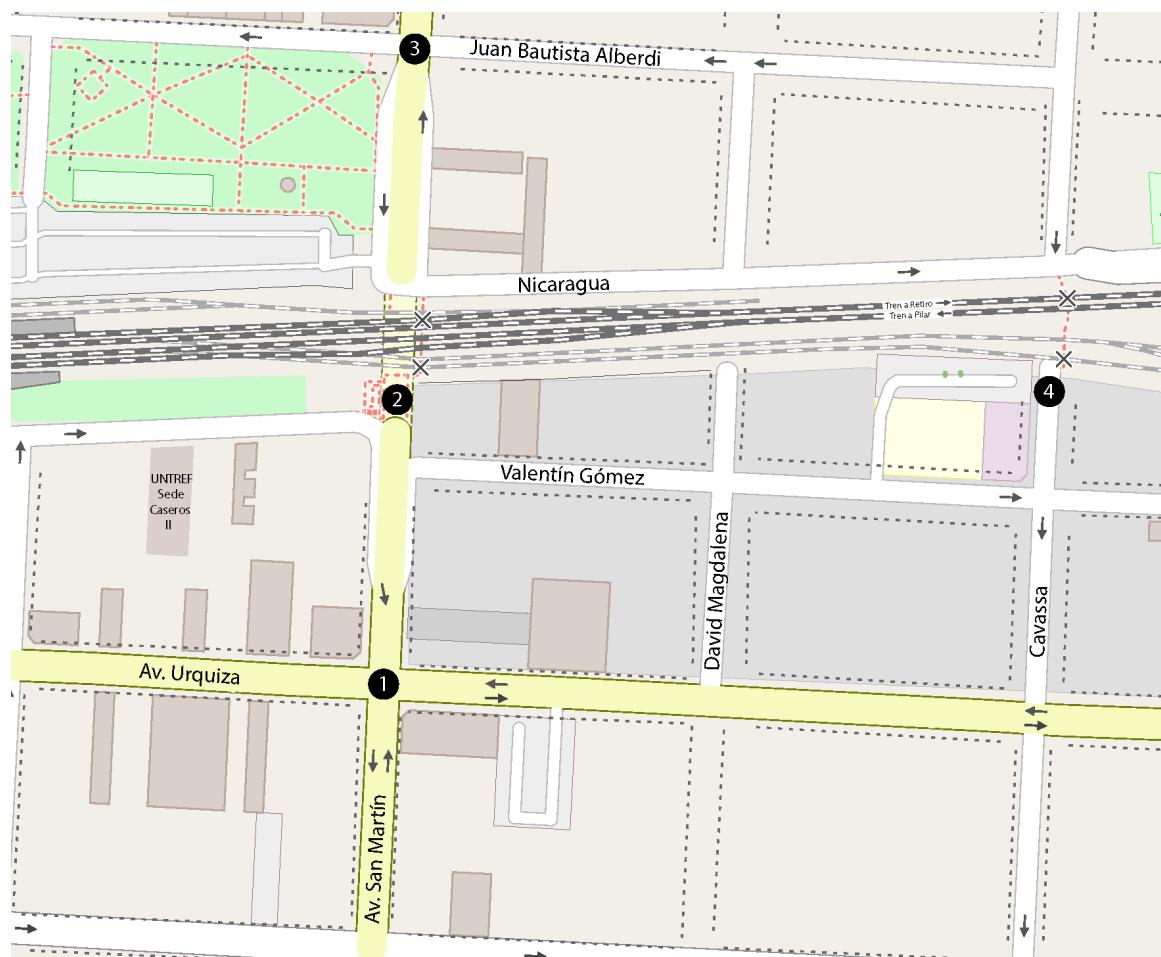
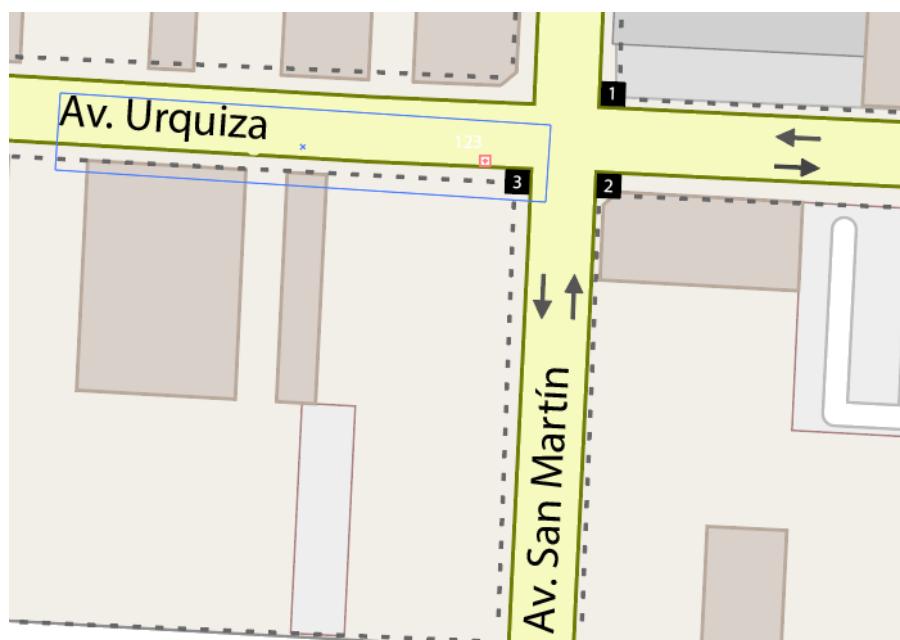


Figura 1: Mapa con las cuatro zonas de medición destacadas.

En la Figura 2a, se muestra un mapa de la Zona 1 y en la Figura 2b se observa una imagen del lugar, ubicada en el cruce de la avenida Urquiza y la avenida San Martín. En esta imagen, se indican las posiciones de medición: 1, 2 y 3.



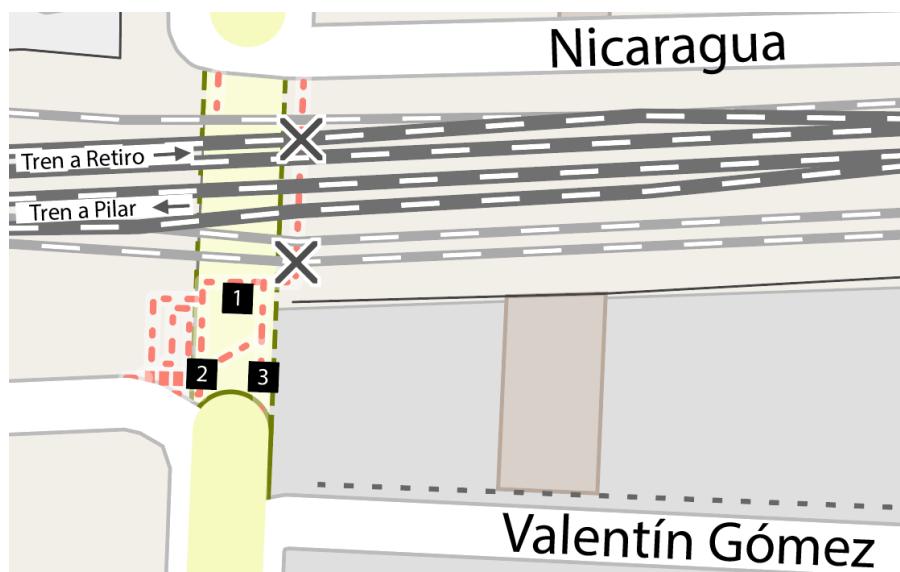
(a) Mapa de Zona 1



(b) Imagen de la Zona 1

Figura 2: Av. Urquiza y Av. San Martín

De manera similar, las Figuras 3a y 3b presentan una captura del lugar y una fotografía de la Zona 2, respectivamente. Esta zona corresponde al paseo René Favaloro, un camino ubicado sobre el paso bajo nivel de la avenida San Martín y las vías del tren San Martín.



(a) Mapa de Zona 2



(b) Figura de la Zona 2

Figura 3: Paseo René Favaloro: Valentín Gómez y Av. San Martín

La Zona 3 corresponde al cruce entre las avenidas Juan B. Alberdi y San Martín. En la Figura 4a se presenta una imagen del lugar de esta zona con las posiciones de medición señaladas. Además, en la Figura 4b se muestran fotografías de los puntos de medición.



(a) Mapa de Zona 3



(b) Imagen de la Zona 3

Figura 4: Av. San Martín y Juan B. Alberdi

En la Figura 5 se visualiza la Zona 4, ubicada en la intersección de las calles Cavassa y Valentín Gómez. Allí se presenta una imagen de la Zona 4, donde se pueden observar una vista clara del paso de peatón y de las áreas específicas donde se llevaron a cabo las mediciones.



Figura 5: Imagen de la Zona 4: Cavassa y Valentín Gómez

3.2 Aforo vehicular

El aforo vehicular se contabilizó en las zonas 1 y 3. La figura 6 muestra las calzadas sobre las cuales se registró el tránsito de vehículos. Los resultados expuestos en la Tabla 2 expresan la cantidad de vehículos que transitan por cada calle en el período de una hora. Estos valores fueron obtenidos extrapolando un registro de 15 minutos que se realizó en la zona 1 y 3. La zona 2 comprende un paseo peatonal, por lo tanto, no se realizó un conteo de los vehículos.

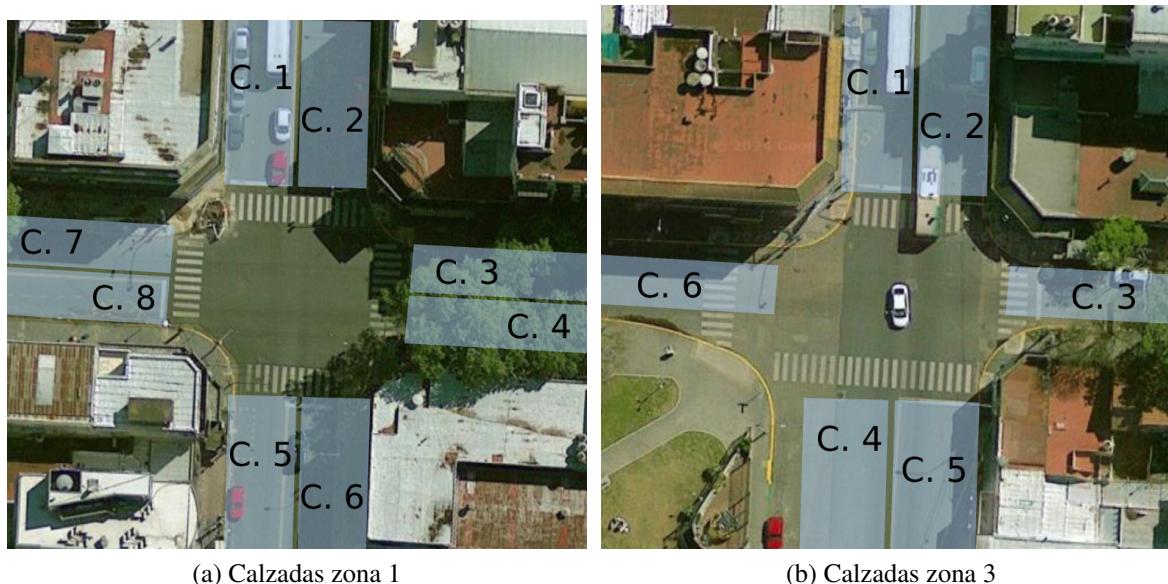


Figura 6: Calzadas donde se contabilizó el aforo vehicular.

Tabla 2: Aforo vehicular de las zonas 1 y 3 expresadas en vehículos por hora.

Calles	Zona 1		Zona 3	
	Aforo	% Vehículos pesados	Aforo	% Vehículos pesados
C1	508	13 %	C1	508
C2	604	11 %	C2	604
C3	402	10 %	C3	404
C4	114	21 %	C4	508
C5	508	13 %	C5	604
C6	604	11 %	C6	404
C7	192	22 %		
C8	516	13 %		

3.3 Medición de niveles de ruido urbano

En este apartado se describe la metodología utilizada para las distintas mediciones realizadas en los puntos descriptos en la sección 3.1.

3.3.1 Medición de ruido de tráfico vehicular

Como se describió anteriormente, se definieron 3 puntos para realizar las mediciones en cada zona. Al utilizar distintas posiciones se puede descartar fácilmente el aporte de fuentes externas que

no corresponden al ruido del tránsito vehicular. Por este motivo se busca que las tres posiciones de medición no tengan una diferencia mayor a 3 dB entre ellas.

El sonómetro se ubicó a 1,5 m de altura y a más de 2 m de cualquier superficie reflectante. Las mediciones se realizaron con un tiempo de integración de 10 minutos, tiempo suficiente para que se estabilice la lectura del nivel continuo equivalente. En la figura 7 se puede ver el posicionamiento de uno de los sonómetros durante la medición en la zona 1.



Figura 7: Medición de ruido de tránsito vehicular en la zona 1.

Además, se calculó el descriptor *Noise Pollution Level* (NPL) a partir de las mediciones realizadas siguiendo la Ecuación 1.

$$NPL = L_{Aeq,T} + (L_{10} - L_{90}) [\text{dB}] \quad (1)$$

Donde $L_{Aeq,T}$ es el nivel equivalente con ponderación A medido en un intervalo de tiempo T, L_{90} es el nivel superado durante el 10 % del tiempo de medición y L_{90} es el nivel superado el 90 % del tiempo.

3.3.2 Medición de ruido de tren

La medición de ruido de tren se realizó bajo la norma IRAM 4113-1 y es calificada como ruido intermitente. Se llevó a cabo la medición en la calle Cavassa, la cual no tiene cruce y, por lo tanto, no tuvo aporte directo de ruido de tránsito vehicular. Para cada sentido de circulación del tren se establecieron dos puntos de medición a 15 y 25 metros con respecto al centro de la vía. En la Figura 8 se muestra un esquema con las posiciones de los sonómetros durante la medición.

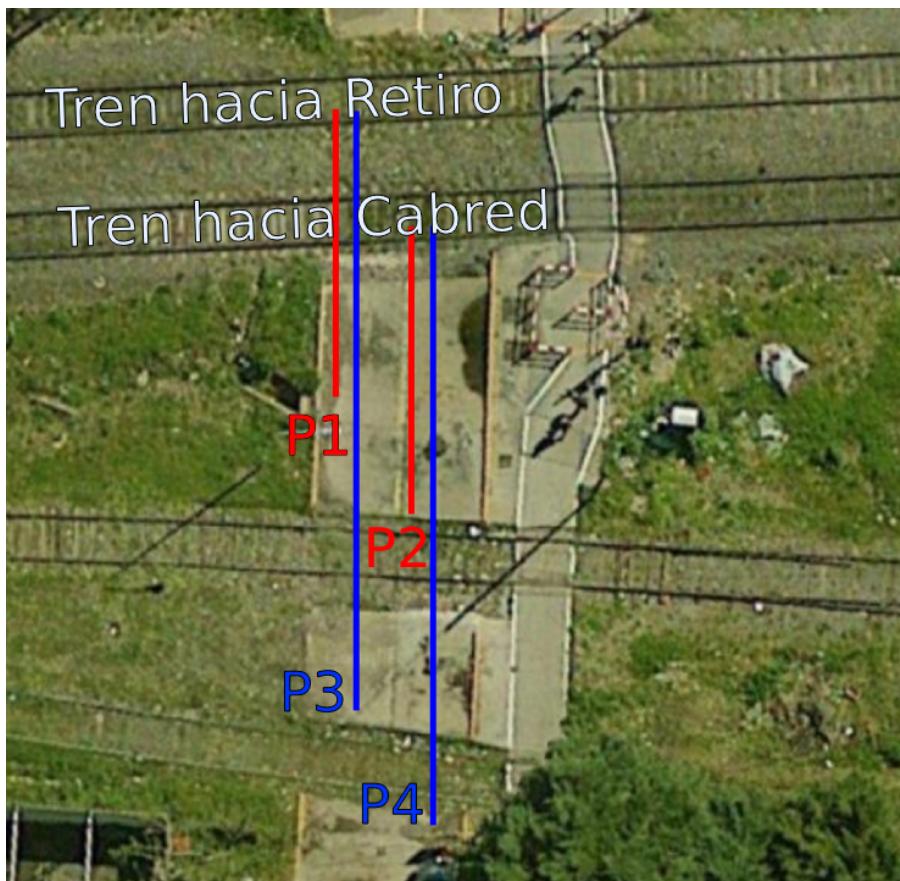


Figura 8: Puntos de medición para el ruido de tren. En rojo a 15 metros y en azul a 25 metros.

El descriptor TEL (nivel de exposición sonora de tránsito) fue usado para caracterizar el ruido del paso del tren. El mismo se calcula mediante la ecuación 2

$$TEL = L_{Aeq,T} + 10 \log \left(\frac{T}{T_p} \right) [\text{dB}] \quad (2)$$

donde T_p es el tiempo de paso del tren en segundos.

Además, se evaluó el espectro del ruido durante el paso del ferrocarril para determinar las características del ruido.

3.4 Simulación de mapa de ruido

La simulación del mapa de ruido se realizó con el software CadnaA. El modelado de los edificios se realizó en base a los valores obtenidos con el medidor de distancia láser. Para obtener mayor información sobre la geometría de los edificios, se importaron imágenes satelitales de la zona obtenidas mediante Google Maps.

Otra herramienta utilizada para el trazado de calles y edificios fue Street View, que ofrece una visualización 360° de la zona.

Para disminuir la complejidad de la simulación, se le asignó un mismo valor de altura a edificios linderos con alturas similares. Por otra parte, en lo que respecta al aforo vehicular, debido a que se dispuso del conteo distinguiendo cada sentido de circulación, se optó por aplicar un trazado de calle por cada uno de ellos. De esta manera, fue posible aplicar la información disponible configurando cada trazado, según el sentido y su correspondiente aforo. Cabe mencionar que en la simulación no se incluyeron las calles Nicaragua, ni Valentín Gomez debido a que no se contó con información de sus respectivos aforos. Sin embargo, estas calles se presentan mayormente como accesos para los vecinos cuyos hogares no se encuentran situados sobre las principales arterias de la zona. De esta manera, es posible inferir que presentan un aforo despreciable respecto a las que sí se consideraron en la simulación y su inclusión no habría aportado significativamente en el estudio.

En la Figura 9 se encuentra una imagen del modelo realizado en CadnaA, con las calles y edificios simulados.



Figura 9: Vista superior de la zona modelada en CadnaA.

Para el trazado del comportamiento del campo sonoro en el mapa, se optó por usar un trazado del tipo *Áreas isófonas* con un mallado de 10 m x 10 m a una altura de receptor de 4 m.

Para el cálculo se configuró un error máximo de 0,5 dB con un interpolación de mallas de 9 x 9. Como índices de cálculo se configuraron Ld (diurno) y Ln (nocturno), cuyos períodos de referencia abarcaron entre las 7:00 y 22:00 hs para el período diurno, y entre las 22:00 y 7:00 hs para el nocturno. Para ninguno de ellos se aplicaron penalizaciones. Por último se ajustó que la absorción del terreno sea $G = 0,01$ y se seleccionaron las opciones: *Considerar el Terreno bajo Carreteras/Parkings como reflectante ($G==0$)*; *Considerar Terreno bajo Edificios como Reflectante ($G==0$)*; y *Considerar terreno bajo Ferrocarriles como Absorbente ($G==1$)*

3.4.1 Simulación del ruido de tráfico vehicular

La simulación del ruido del tráfico vehicular se llevó a cabo mediante el método de cálculo NMPB-Routes-96.

Aunque 2 de las vías vehiculares que se simularon corresponden a avenidas, en las cuales la velocidad máxima permitida es de 60 km/h, la velocidad de circulación real es menor. Esto se debe a que por ellas circula una gran cantidad de rodados y existen semáforos con apenas 1 cuadra de diferencia. Por esta razón es que la velocidad de los vehículos se estableció en 40 km/h.

Tanto la Ley 1540 como la norma IRAM 4113 requieren mediciones de L_{day} y L_{night} , para lo cual se debe registrar el aforo vehicular a lo largo del día completo. En este caso se realizó el conteo entre las 19 y 21 hs en un único día, por lo que se tiene un registro limitado. Sin embargo, con base en el testimonio de algunos vecinos de la zona quienes comentaron que la circulación vehicular nocturna es significativamente inferior a la diurna, se optó por emplear los registros disponibles para el período diurno y tomar una tercera parte de los mismos para la simulación del período nocturno. Si bien esta determinación fue útil para hacer una distinción entre períodos, lo correcto es llevar a cabo un conteo del aforo vehicular durante las 24 hs del día para luego configurar el software de simulación.

3.4.2 Simulación de ruido de tren

Para la simulación del ruido generado por el tren, se comenzó por determinar la velocidad del tren en la ubicación señalada en la Figura 8. Este cálculo se realizó midiendo el tiempo que el tren tardó en atravesar ese punto, desde la locomotora hasta el último vagón. Cabe destacar que el tren de la línea San Martín consta de 7 vagones sin contar la máquina y tiene una longitud total aproximada de 180 metros, con una velocidad media de 32,4 km/h. El punto de medición se ubicó a 400 metros de la estación Caseros, lo cual confirma que la velocidad calculada está dentro de los valores esperados.

Para ingresar los datos en el software de simulación, se especificó el tipo de tren como *C06m* “Locomotoras Diesel Frenos a Disco”. La superestructura se configuró como “Traviesas de Madera en Balasto” y el tipo de riel como “Raíles con Juntas”.

De acuerdo al sitio web del Tren San Martín, tomando sólo un sentido de circulación del servicio Retiro - José C. Paz / Pilar / Dr. Cabred, circula con un total de 50 trenes durante el período diurno y 17 durante el nocturno, de lunes a sábado, mientras que el domingo lo hace con 35 trenes en el período diurno y 14 en el nocturno [11].

Con estos datos y seleccionando el método de cálculo SRM-II, el software CadnaA generó la estimación del ruido ferroviario en la zona deseada. Se trazaron 2 vías para simular ambos sentidos de circulación y se configuró la cantidad de trenes correspondiente de lunes a sábado. Si bien circulan otros servicios por las mismas vías, no fueron incluidos en la simulación debido a que no significan un incremento considerable en la cantidad de trenes que circulan cumpliendo con el servicio principal.

4. Resultado y análisis

4.1 Ruido de tráfico vehicular

En la Tabla 3 se muestran los niveles equivalentes registrados en un intervalo de 5 minutos con ponderación A y C, en integración *slow*.

Tabla 3: Valores medidos de $L_{Aeq,5}$ y $L_{Ceq,5}$ en cada zona.

Zona	Punto de medición	$L_{Aeq,5}$ slow [dB]	$L_{Ceq,5}$ slow [dB]
1	P1	72,5	84,4
	P2	72,9	84,2
	P3	73,7	84,6
2	P1	70,7	81,2
	P2	70,9	80,3
	P3	69,4	81,5
3	P1	71,1	83,4
	P2	74,3	83,4
	P3	74,1	83,6

Se puede ver que en la zona 1 y 2 las mediciones en cada punto no difieren en más de 3 dB, tanto en ponderación A como en C. En la zona 3, este margen es apenas superado en el punto 1, donde se registran aproximadamente 3 dB menos que en los otros puntos. Sin embargo, esta diferencia no se observa en el $L_{Ceq,5}$. Esto puede deberse a diferencias en el contenido espectral de las mediciones, resultando en valores similares al usar la ponderación C, pero cuando se aplica la ponderación A el nivel equivalente cambia.

Luego, a partir de las mediciones realizadas se procedió a calcular el indicador NPL, siguiendo la ecuación 1. Primero se calculó el NPL para cada punto de medición y luego se promediaron los resultados para obtener un valor de este indicador para cada zona. En la Tabla 4 se pueden ver los valores obtenidos.

Tabla 4: NPL calculado para cada zona.

Zona	NPL [dBA]	NPL [dBc]
1	84,2	94,4
2	83,8	93,7
3	85,5	95,2

Observando los resultados obtenidos, se puede ver que con ambas ponderaciones la zona con menor indicador de NPL es la zona 2. Esta observación está relacionada con la ausencia de cruces de calles, lo cual implica que no hay semáforos, el tránsito vehicular es muy bajo y no incluye vehículos pesados.

Por otro lado, se aprecia una diferencia cercana a los 10 dB entre el uso de ponderación A y C, lo cual indica la presencia de una clara componente de bajas frecuencias.

4.2 Ruido de tren

En la Figura 10 se encuentra el espectrograma del tren llegando a la estación de Caseros. Se puede observar al comienzo del registro la bocina del tren, con una frecuencia fundamental cercana a 1 kHz. Entre 5 y 10 kHz se aprecian unas tenues líneas que representan la alarma del cruce de la vía. En cuanto al aporte del tren en sí mismo se puede ver que la mayor energía se concentra por debajo de 1 kHz.

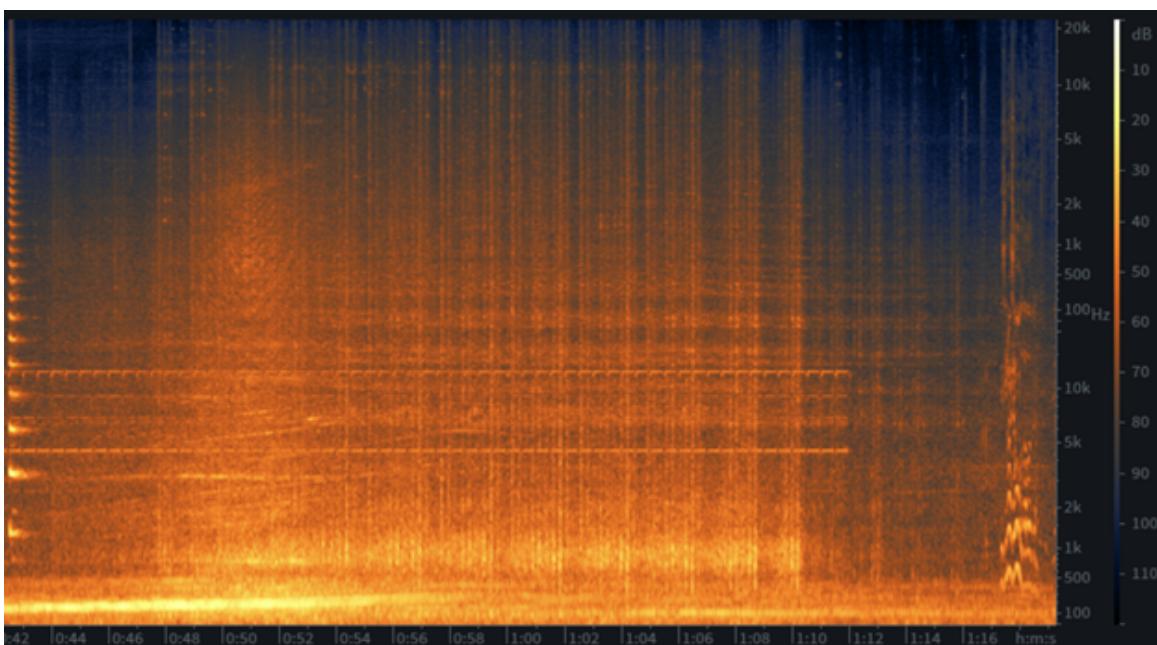


Figura 10: Espectrograma del tren llegando a la estación de Caseros.

Para caracterizar el impacto del paso del tren se calculó el nivel de exposición de tránsito (TEL). Además, se comparó el nivel equivalente con ponderación A en integración *fast* y *slow*. Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 5

Tabla 5: Indicador TEL calculado para cada sentido de circulación.

Sentido	TEL [dB]	L_{AFmax} [dB]	L_{ASmax} [dB]	ΔdB
Hacia Retiro	89,5	88,7	85,1	3,6
Hacia Cabred	86,2	84,9	82,4	2,5

Se puede ver que el descriptor TEL es mayor para el tren hacia Retiro, momento en el cual se encuentra acelerando. En el caso del tren en sentido a Cabred, momento en el cual desacelera, se registra un TEL menor. Esto puede deberse a la fricción de las ruedas con los rieles, la cual es distinta en cada caso y resulta en distintos valores del descriptor.

También interesa evaluar si existen componentes impulsivas en el registro del paso del tren. Para ello, se debería observar el nivel medido en integración *slow* y compararlo con el nivel registrado en integración *impulsive*. Al no haber realizado una medición con la configuración *impulsive*, se utilizaron los registros con integración *fast*.

Al tener diferencias menores a 5 dB se podría concluir que no existen componentes impulsivas. De todas formas, si se hubiera obtenido un registro con integración *impulsive* esta diferencia podría haber sido mayor.

4.3 Simulación

Con las configuraciones que fueron detalladas en la Sección 3.4, se obtuvieron los niveles sonoros del mapa que se muestra en la Figura 11.

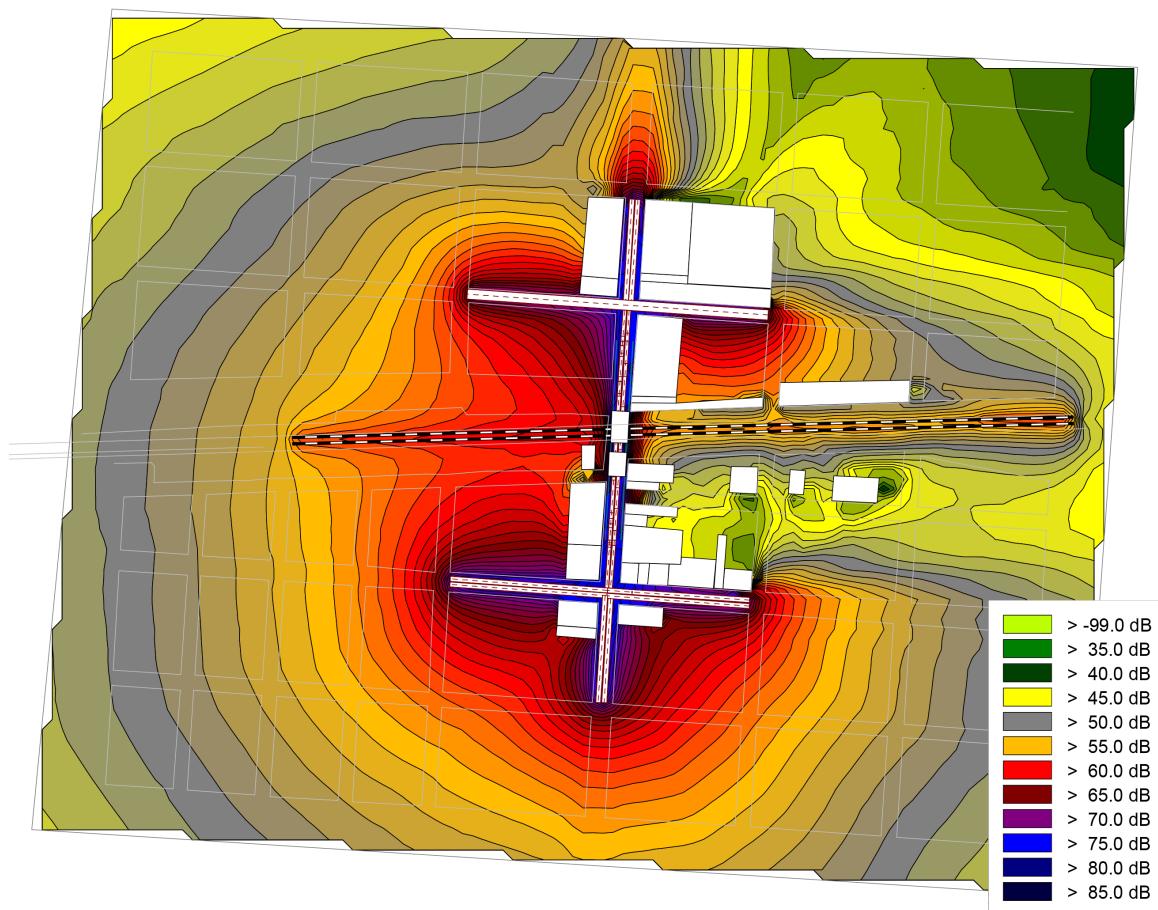


Figura 11: Vista superior del mapa completo simulado en CadnaA.

En la Figura 12 se ve un detalle de la Zona 1 de medición. Sobre cada una de las fachadas de los edificios de las esquinas que conformaron los puntos de medición de la zona, se hizo una evaluación de los valores de Ld y Ln expresados en dBA. Por otro lado, en la Figura 13 se muestra una vista en 3 dimensiones de la simulación de la misma zona.



Figura 12: Vista superior de la simulación de la Zona 1 de medición.

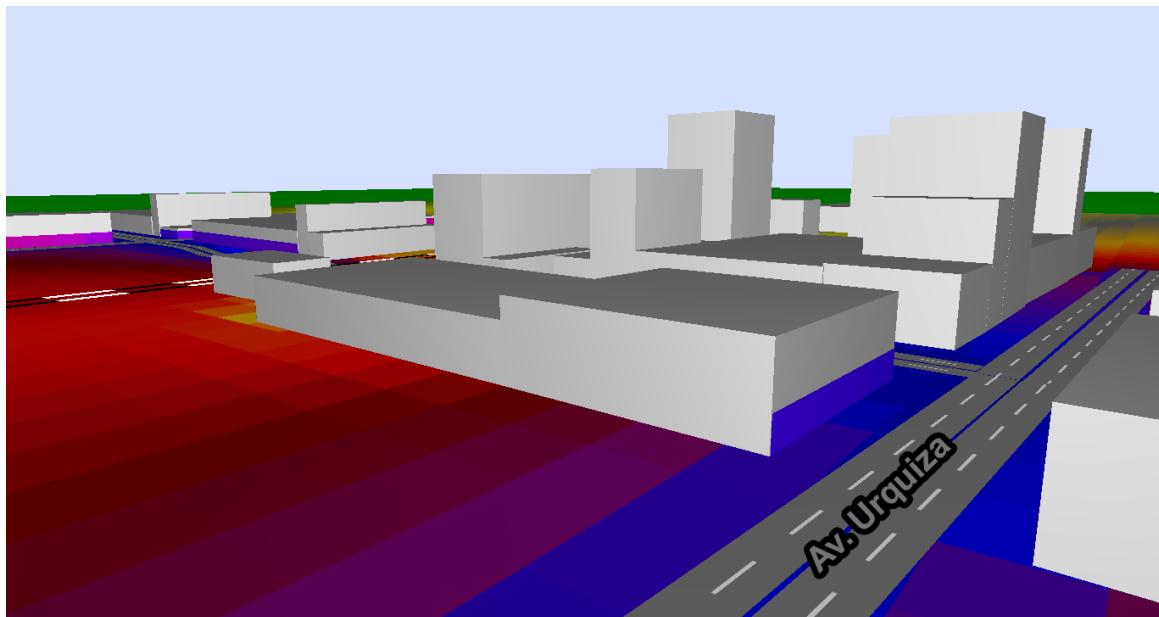


Figura 13: Vista 3D de la simulación de la Zona 1 de medición.

Por otra parte, en la Figura 14 se ve un detalle de la Zona 2 de medición. En este caso, dado que los puntos de medición de la zona no fueron en cercanía a fachadas, se hizo una evaluación de los valores de L_d y L_n en los edificios más próximos que fueron simulados. Además, en la Figura 15 se muestra una vista en 3 dimensiones de la simulación de la misma zona.

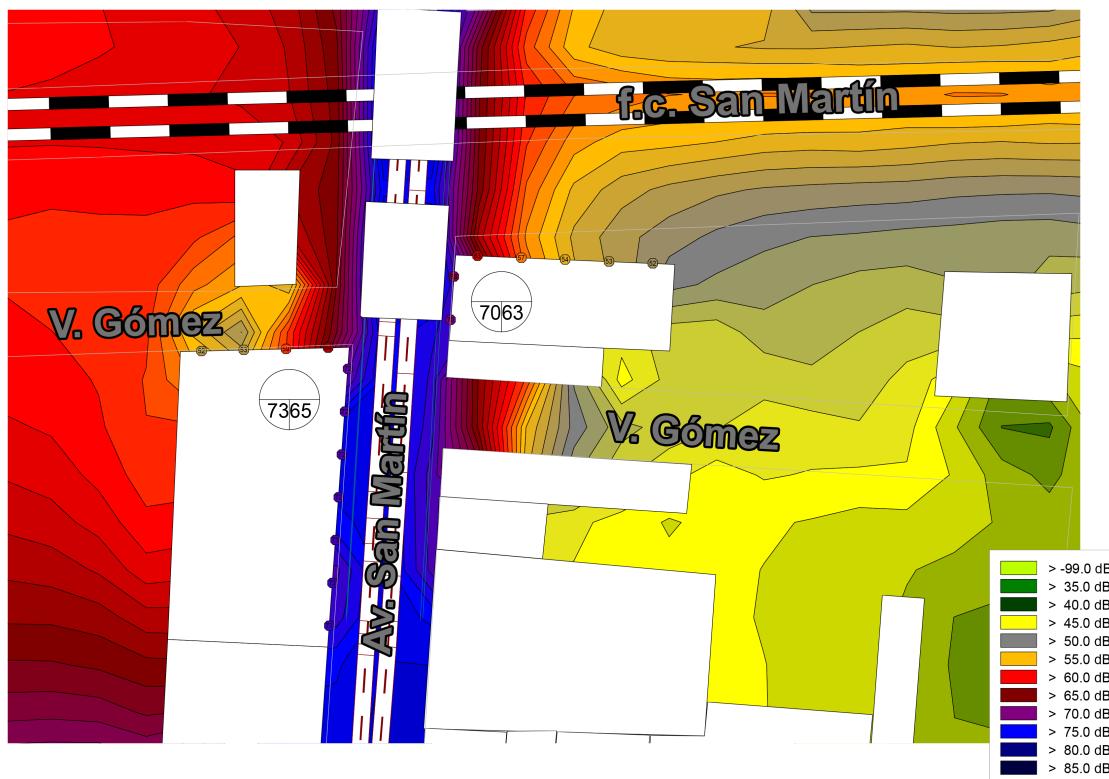


Figura 14: Vista superior de la simulación de la Zona 2 de medición.

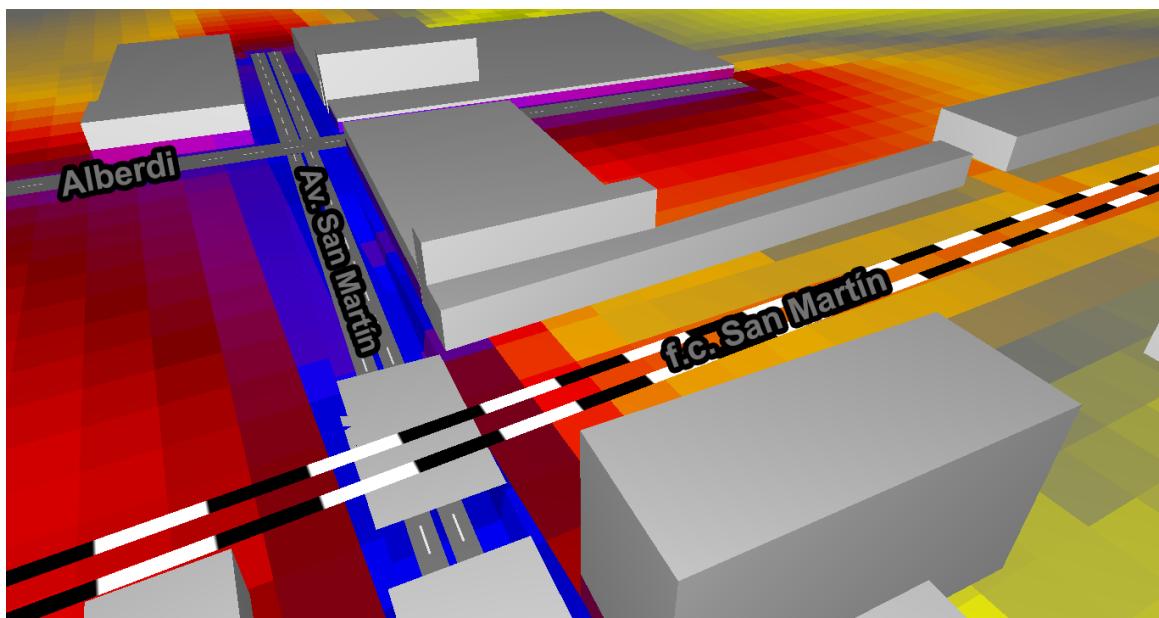


Figura 15: Vista 3D de la simulación de la Zona 2 de medición.

El detalle de la Zona 3 de medición puede apreciarse en la Figura 16. Una vez más se hizo una evaluación de los valores de Ld y Ln sobre cada una de las fachadas de los edificios de las esquinas que conformaron los puntos de medición de la zona. La vista en 3 dimensiones de la simulación de la zona se muestra en la Figura 17.

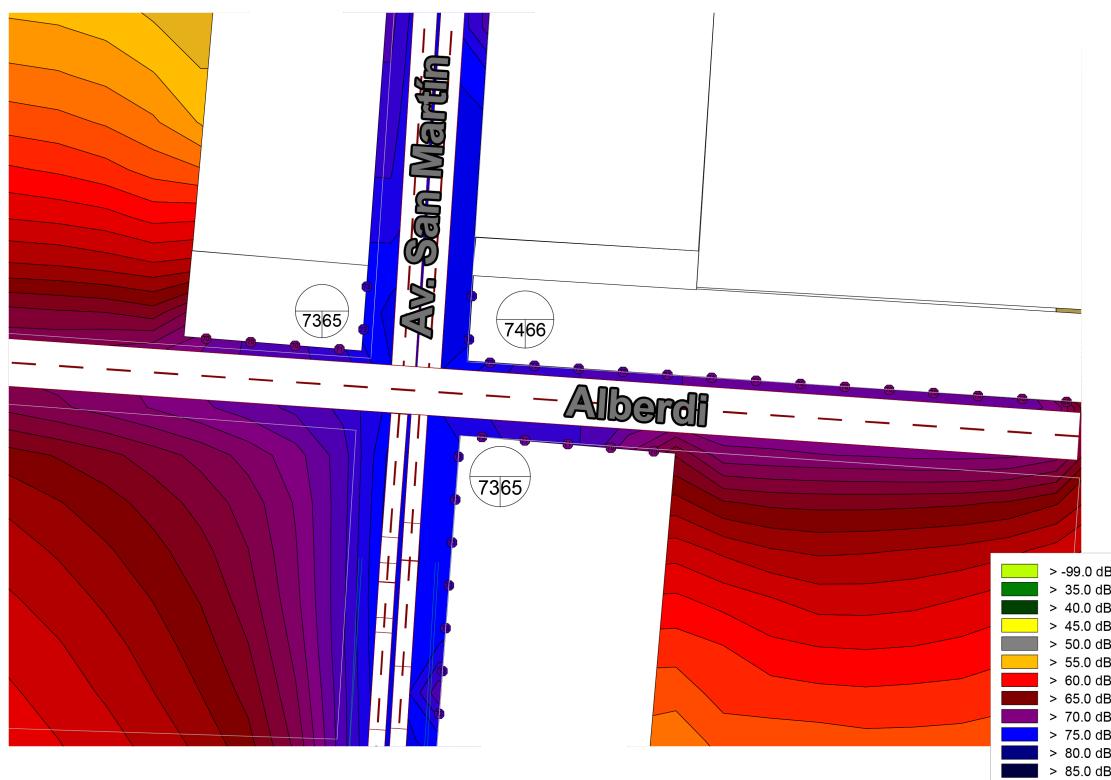


Figura 16: Vista superior de la simulación de la Zona 3 de medición.

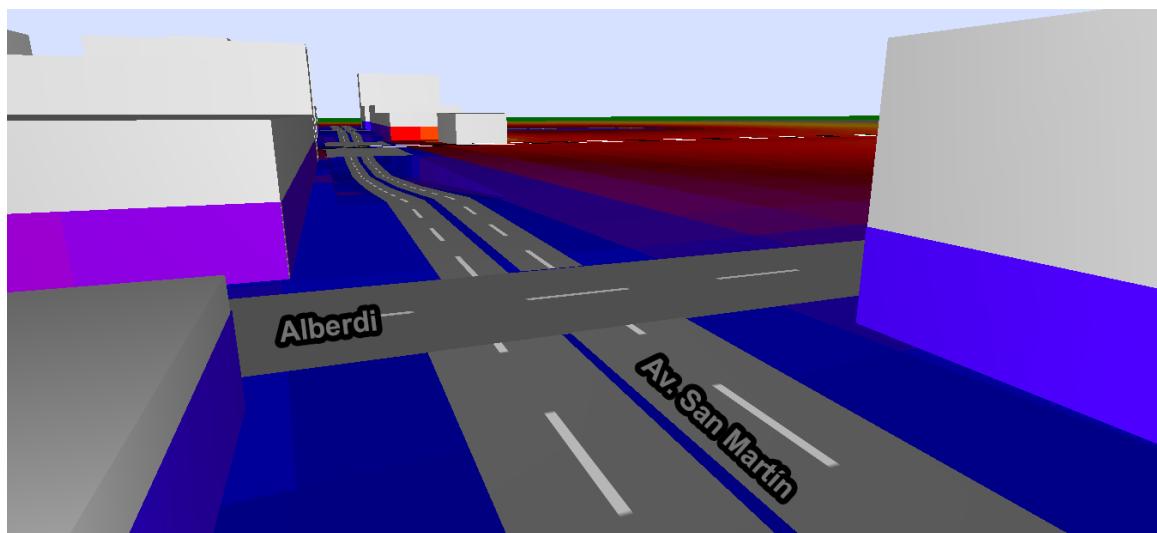


Figura 17: Vista 3D de la simulación de la Zona 3 de medición.

La Tabla 6 toma los valores medidos que son recopilados en la Tabla 3 y los compara con los simulados que se muestran en las Figuras 11, 12, 14 y 16.

Tabla 6: Comparación de valores medidos y simulados en cada zona.

Zona	Punto de medición	Medición [dBA]	Simulación [dBA]
1	P1	72,5	74,0
	P2	72,9	74,0
	P3	73,7	75,0
2	P1	70,7	71,5
	P2	70,9	73,0
	P3	69,4	70,0
3	P1	71,1	73,0
	P2	74,3	74,0
	P3	74,1	73,0

Se puede apreciar que los valores que se obtuvieron a través de la simulación son muy coherentes con aquellos que fueron medidos in situ. Esto se debe, en gran medida, al nivel de detalle con el cual se llevó a cabo el trazado del mapa, ajustando configuraciones de aforo vehicular, tipo de calzada y velocidad de circulación que sean coherentes con la realidad de la zona bajo estudio.

Por último, en la Figura 18 se muestra la vista superior de la simulación de la Zona 4, en la cual se llevaron a cabo las mediciones del tren San Martín.

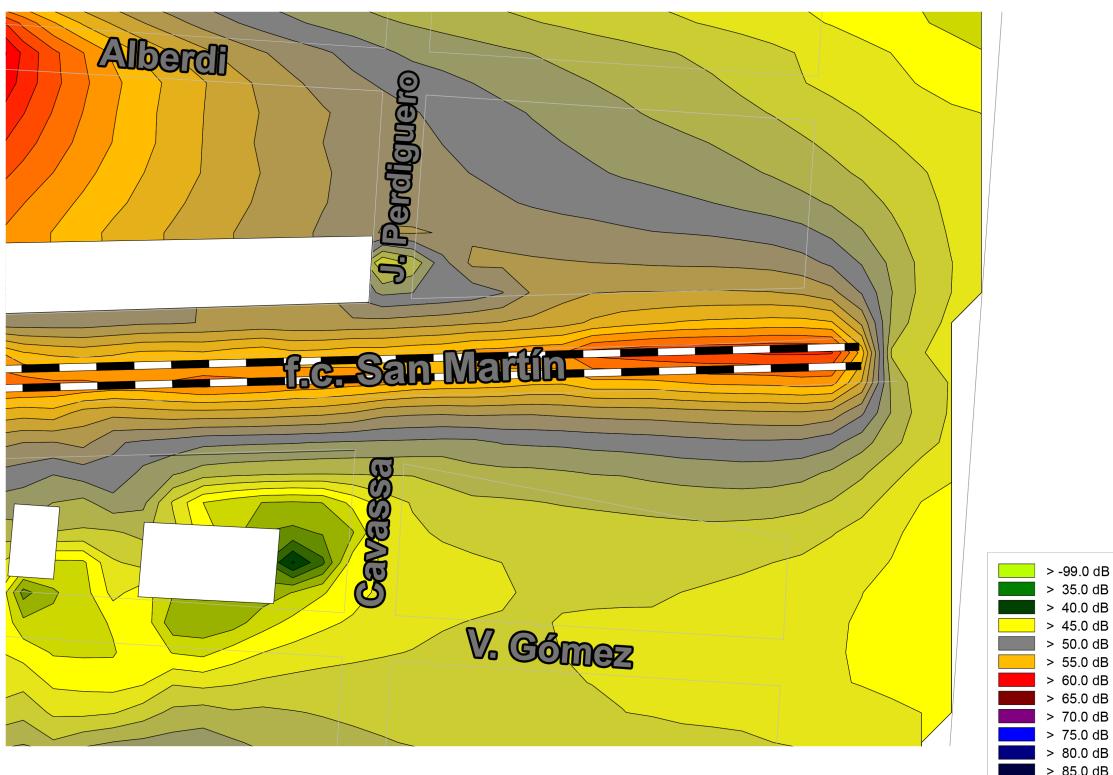


Figura 18: Vista superior de la simulación de la Zona 4 de medición.

4.4 Medidas de mitigación y planes de acción para la reducción del ruido urbano y ferroviario en Caseros

4.4.1 Reducción del nivel de las alarmas ferroviarias

Una de las principales fuentes de ruido ferroviario en Caseros son las alarmas de los trenes, cuyo nivel sonoro excesivo provoca molestias significativas a los residentes y transeúntes. Se propone disminuir el nivel de sonido de las alarmas, ya que su volumen actual induce a que algunas personas se arriesguen a cruzar las vías con la alarma sonando para evitar el ruido intenso de cerca.

- Ajuste de la temporización de las alarmas

Se sugiere ajustar la temporización de las alarmas ferroviarias para que comiencen a sonar con menos antelación al paso del tren. Actualmente, la alarma se activa con mucha anticipación, lo que incrementa innecesariamente el tiempo de exposición al ruido para las personas en las inmediaciones.

- Cambio del tipo de sonido de las alarmas

Otra medida viable es cambiar el tipo de sonido de las alarmas a un barrido de frecuencia (sine sweep) en lugar de un tono constante. Este tipo de sonido es menos molesto y puede ser percibido de manera más efectiva a niveles de sonoridad más bajos. Esta modificación puede reducir significativamente la incomodidad acústica sin comprometer la función de advertencia de las alarmas.

- Implementación de silenciadores para las alarmas

Adicionalmente, se podrían fabricar en la universidad, mediante impresión 3D, silenciadores específicos para las salidas de sonido de las alarmas ferroviarias. Estos dispositivos podrían tener la doble función de reducir el nivel sonoro y direccionar el sonido hacia abajo, minimizando así la dispersión innecesaria del ruido hacia áreas residenciales. La implementación de estos silenciadores contribuiría a limitar la propagación del sonido, reduciendo su impacto en las zonas circundantes.

Estas medidas de mitigación, en conjunto, no solo disminuirían el nivel de ruido percibido por la población, sino que también mejoraría la calidad de vida de los residentes de Caseros, promoviendo un ambiente acústico más saludable y menos perturbador. Evaluaciones adicionales y simulaciones acústicas serán necesarias para confirmar la efectividad de estas soluciones y ajustar los planes de acción según los resultados obtenidos.

4.4.2 Implementación de paisajes sonoros como solución de mitigación del ruido urbano

- Paisajes sonoros en esquinas y paradas de autobuses

Otra medida para mitigar el impacto del ruido es la implementación de paisajes sonoros. Esta estrategia consiste en instalar altavoces en ubicaciones estratégicas, como la esquina de Av. Urquiza y Av. San Martín, donde convergen varias paradas de autobuses muy concurridas, incluyendo las líneas 53, 181, 237, etc.

El propósito de los paisajes sonoros es enmascarar el ruido del tránsito y crear un ambiente acústico más agradable para las personas que esperan en las paradas de autobuses y transitan a pie por la zona. Al reducir la percepción del ruido ambiental, se disminuye el estrés y las molestias auditivas, mejorando así la calidad de vida de los habitantes y visitantes de Caseros.

Para lograr un efecto óptimo, es fundamental seleccionar cuidadosamente los sonidos que se emitirán. Estos pueden incluir sonidos naturales, como el canto de aves, el fluir de un arroyo, o el sonar del viento entre las hojas. Alternativamente, se pueden utilizar composiciones musicales suaves que no compitan con el ruido del tráfico, sino que lo enmascaren de manera sutil.

La implementación de esta medida requerirá la instalación de sistemas de altavoces discretos y bien distribuidos en las áreas seleccionadas. Posteriormente, se deberá monitorear y ajustar el sistema para asegurar que los paisajes sonoros cumplen eficazmente su función de enmascarar el ruido de tráfico sin causar nuevas molestias.

Además de mitigar el ruido, los paisajes sonoros pueden contribuir a crear una identidad acústica distintiva para Caseros, transformando puntos de alto tránsito en oasis urbanos más tranquilos y agradables. Esta intervención no solo mejora la experiencia auditiva de los usuarios de transporte público y peatones, sino que también puede tener un impacto positivo en la percepción general del entorno urbano.

4.4.3 Reorganización del tráfico y arborización para la mitigación del ruido en areas sensibles

Una solución adicional para mitigar el impacto del ruido urbano en la esquina de Av. San Martín y Av. Urquiza, especialmente considerando la proximidad de una escuela primaria, es la reorganización del tráfico en la Avenida Urquiza. Se propone convertir la avenida en una vía de una sola mano, lo cual reduciría significativamente el flujo vehicular y, consecuentemente, el ruido producido.

Junto con la reorganización del tráfico, se sugiere reducir el ancho de la avenida para destinar el espacio liberado a la plantación de árboles, como platanus o moreras. Estos árboles no solo actuarían como una barrera natural contra el ruido, sino que también mejoraría el ambiente urbano al proporcionar sombra y reducir la temperatura del entorno. Además, la presencia de árboles crea una barrera física que distanciaría los automóviles de los peatones y de la institución educativa, aumentando la seguridad y el confort de los transeúntes.

Siguiendo esta línea, se podrían implementar ciclovías en la misma área. Las ciclovías no solo promueven un medio de transporte más sostenible y saludable, sino que también ayudan a alejar la fuente sonora vehicular del área peatonal y de la escuela. La separación de carriles para bicicletas y vehículos motorizados puede reducir la exposición directa al ruido del tráfico para los peatones y estudiantes.

4.4.4 Enfoque en retroalimentación, adaptación y colaboración interdisciplinaria

Considerando el énfasis en la evaluación continua de la efectividad de las soluciones para garantizar la sostenibilidad acústica y el bienestar de la población, se podría enfatizar la importancia de la retroalimentación y la adaptación en el proceso de gestión del ruido urbano.

En este sentido, podría destacarse la necesidad de establecer mecanismos de retroalimentación que permitan recopilar datos sobre la eficacia de las medidas implementadas y su impacto en la reducción del ruido y en la percepción de la calidad del ambiente sonoro por parte de la población. Estos datos podrían utilizarse para ajustar y mejorar continuamente las estrategias de gestión del ruido, asegurando así una respuesta efectiva y adaptativa a las necesidades cambiantes de la comunidad.

Además, se podría hacer hincapié en la importancia de la colaboración interdisciplinaria y la participación activa de la comunidad en el proceso de gestión del ruido urbano. La integración de diversos enfoques y la participación de diferentes partes interesadas, como autoridades municipales, expertos en acústica, urbanistas y residentes locales, pueden enriquecer el proceso de toma de decisiones y promover soluciones más holísticas y contextualizadas.

5. Conclusión

Se analizó el impacto acústico derivado del tráfico vehicular y ferroviario en el área central de Caseros. Se emplearon simulaciones mediante el software CadnaA y se llevaron a cabo mediciones acústicas conforme a los protocolos establecidos por la norma IRAM 4113. También se siguieron recomendaciones de la ley 1540, sin embargo, se reconoce la necesidad de expandir el período de muestreo, abarcando tanto el día como la noche, y de aumentar el número de muestras recopiladas.

Asimismo, se destaca la importancia de efectuar mediciones en diferentes jornadas para reducir la incertidumbre en los resultados obtenidos.

El estudio realizado sobre el impacto del ruido urbano y ferroviario permitió identificar y analizar las principales fuentes de contaminación acústica, así como evaluar diversas medidas de mitigación y sus efectos potenciales.

Los resultados obtenidos en las mediciones de ruido vehicular muestran que, aunque los niveles de ruido varían entre las diferentes zonas, en general se mantienen dentro de un rango cercano, lo cual indica una distribución relativamente homogénea del ruido de tráfico. No obstante, la zona 3 presentó un valor de NPL ligeramente superior, atribuible a la presencia de intersecciones con mayor flujo vehicular y vehículos pesados.

En cuanto al ruido ferroviario, se constató que las alarmas del cruce de vías y la aceleración del tren hacia Retiro son las principales fuentes de alta intensidad sonora. La implementación de alarmas con barrido de frecuencia o la calibración del nivel de las alarmas son soluciones viables que podrían reducir significativamente la percepción de ruido sin comprometer la seguridad ferroviaria.

La simulación acústica realizada con el software CadnaA permitió corroborar los niveles de ruido medidos y visualizar su distribución espacial. Esta herramienta demostró ser eficaz para planificar y evaluar estrategias de mitigación, tales como la reorganización del tráfico y la arborización de áreas sensibles, contribuyendo a la creación de ambientes urbanos más sostenibles y saludables.

Las medidas de mitigación propuestas, tales como la intervención del paisajes sonoro y la reorganización del tráfico vehicular, tienen el potencial de mejorar la calidad de vida de los residentes y transeúntes de Caseros. La creación de ciclovías y barreras naturales de vegetación no solo reducirían la exposición al ruido, sino que también promoverían un entorno urbano más agradable y seguro.

La evaluación continua de la efectividad de estas medidas es crucial para garantizar la sostenibilidad acústica y el bienestar de la población. Mediante el monitoreo constante y ajustes basados en resultados, es posible asegurar que las intervenciones propuestas cumplan con sus objetivos a largo plazo, adaptándose a cambios en el entorno y necesidades de la comunidad.

Se destaca la importancia de una planificación urbana integral para abordar el problema del ruido en áreas urbanas. La adopción de soluciones enfocadas en la reducción del ruido y la evaluación continua de su efectividad son cruciales para garantizar la sostenibilidad acústica y el bienestar de la población.

Referencias

1. Datakustik. CadnaA; State-of-the-art Noise Prediction Software. <https://www.datakustik.com/products/cadnaa/cadnaa>, 2024.
2. E. Viro, J. Bonello, S. Gavinowich, and F. Ruffa. Protocolo de mediciones para trazado de mapas de ruido normalizados, 2002. En: LACEAC Laboratorio de Acústica y Electroacústica.
3. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental, parte 1 - magnitudes básicas y métodos de evaluación, 2005.
4. Standard ISO. Acoustics — description, measurement and assessment of environmental noise. <https://www.iso.org/standard/59765.html>, 2016.
5. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental, parte 2 - determinación de niveles de ruido ambiental, 2006.
6. Legislatura de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Ley 1540. <https://boletinoficial.buenosaires.gob.ar/normativaba/norma/67210>, 2007.
7. Parlamento Europeo Directiva 2002/49. Evaluación y gestión del ruido ambiental - declaración de la comisión ante el comité de conciliación de la directiva sobre evaluación y gestión del ruido ambiental. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX%3A32002L0049>, 2002.
8. Standard ISO. Acoustics — attenuation of sound during propagation outdoors. <https://www.iso.org/standard/74047.html>, 2024.
9. G. Dutilleux, J. Defrance, D. Ecotière, B. Gauvreau, M. Bérengier, F. Besnard, and E. Duc. Nmpb-routes-2008: The revision of the french method for road traffic noise prediction. *Acta Acustica united with Acustica*, 96:452–462, 05 2010.
10. Servicio metereológico nacional. <https://www.smn.gob.ar>, 2024.
11. Tren San Martín - República Argentina. Horarios servicio Retiro - José C. Paz / Pilar / Dr. Cabred. <https://www.trensanmartin.com.ar/pdf/cronograma-especial-palermo-cabred.pdf>, 2024. Accedido el: 24 de mayo de 2024.
12. B. Berglund, T. Lindvall, and D. H. Schwela. Guías para el ruido urbano, 1999.