



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

**DETERMINACIÓN DE LA EXPOSICIÓN PERSONAL A RUIDO
AMBIENTAL EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO METRO
DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTA

DULCE ANAHÍ ORTEGA TORÍZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2024.





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor José Agustín García Reynoso

VOCAL: Profesora Gema Luz Andraca Ayala

SECRETARIO: Profesor Iván Yassmany Hernández Paniagua

1° SUPLENTE: Profesora Alejandra Mendoza Campos

2° SUPLENTE: Profesor Erik Beristain Montiel

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Ciudad Universitaria,
CDMX.

ASESOR DEL TEMA

Dr. Iván Yassmany Hernández Paniagua

SUSTENTANTE

Dulce Anahí Ortega Toríz

AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater, la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Química por permitirme crecer, aprender y desarrollarme académicamente, por los retos y las experiencias vividas durante mi estadía en la carrera, los cuales me han brindado herramientas y recursos para formarme como profesionista y como ser humano.

Al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático por abrirme las puertas y brindarme el apoyo para la realización de este proyecto y para mi crecimiento profesional.

A la Escuela Icahn de Medicina de Mount Sinai y a la Universidad de Chicago, por el financiamiento recibido para la realización de este trabajo y su preocupación por la integridad de los involucrados durante las campañas de muestreo, así como la confianza para el uso de los equipos y la capacitación sobre estos.

Al Dr. Iván Yassmany Hernández Paniagua, mi asesor, por brindarme la confianza de llevar a cabo este proyecto, permitiéndome con su apoyo y guía desarrollar habilidades y afrontar pruebas que se presentaron en el camino. Por su paciencia, sus consejos y su compromiso, gracias.

A la Dra. Laura A. McGuinn, el Dr. Homero Harari, el Dr. Itai Kloog y el Dr. Iván Gutiérrez por su interés en el desarrollo de este proyecto y su apertura para la resolución de dudas surgidas durante las campañas de muestreo.

A la Dra. Gema Luz Andraca Ayala por su apoyo y consejos durante la realización del proyecto. Sus palabras de aliento, su disposición e interés me brindaron motivación durante este tiempo.

A la Mtra. Lida Solórzano por sus palabras de apoyo, apoyo e interés en este trabajo, lo cual significó mucho para mi persona.

A mi familia por ser mi más grande soporte, por su comprensión y apoyo incondicional durante mi carrera.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	5
1.1	Objetivos	5
1.1.1.	Objetivo General.....	5
1.1.2.	Objetivos Particulares.....	5
1.2.	Análisis situacional	6
II.	MARCO TEÓRICO	7
2.1.	¿Qué es el ruido?	8
2.2.	Contaminación acústica.....	11
2.3.	Guías y límites permisibles de ruido	12
2.4.	Daños a la salud.....	19
2.5.	Exposición personal a ruido ambiental en México	20
III.	MÉTODO	23
3.1.	Planeación de la medición	23
3.1.1.	Propósito	23
3.2.	Selección de equipo	24
3.3.	Selección de líneas del STC Metro.....	25
3.3.1.	Líneas seleccionadas para la campaña de muestreo	26
3.3.2.	Estaciones seleccionadas para muestreos	27
3.3.3.	Selección del periodo y horarios de muestreo	28
3.4.	Diseño experimental	29
IV.	RESULTADOS	31
4.1.	Exposición personal a ruido ambiental en líneas del STC Metro.....	31
4.2.	Comparación de la exposición personal a ruido entre días de la semana...	37
4.3.	Comparación de la exposición de ruido en andenes y estaciones	38
V.	DISCUSIÓN	40

5.1.	Mediciones realizadas en vagón.....	40
5.2.	Comparación de las mediciones realizadas en estaciones	41
5.3.	Comparación con estudios existentes	42
5.4.	Normatividad y riesgo	43
VI.	CONCLUSIONES	45
VII.	REFERENCIAS	47
VIII.	ANEXOS.....	52
	ANEXO I.....	52
	ANEXO II.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Valores guía para el ruido urbano en ambientes específicos y efectos identificados en la salud humana	13
Tabla 2.	Límites máximos permisibles de exposición	16
Tabla 3.	Límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas.....	16
Tabla 4.	Límites máximos permisibles de emisiones sonoras en el punto de referencia que deben de cumplir las fuentes emisoras.....	17
Tabla 5.	Límites máximos permisibles de recepción de emisiones sonoras en el punto de denuncia.....	17
Tabla 6.	Límites máximos permisibles de los automóviles, camionetas, camiones y tractocamiones son expresados en dB(A) de acuerdo a su peso bruto vehicular.....	18
Tabla 7.	Líneas seleccionadas para la campaña de muestreo y sus características	27
Tabla 8.	Estaciones seleccionadas por línea para la campaña de muestreo	27
Tabla 9.	Calendario de las campañas de muestreo realizadas	28

Tabla 10. Estudios existentes realizado alrededor del mundo sobre exposición a ruido ambiental en metro	42
Tabla 11. Niveles de presión sonora expresada en decibeles con ponderación A para la estación Copilco, Línea 3 STC Metro.....	52
Tabla 12. Ejemplo memoria de cálculo del nivel sonoro equivalente para el segmento correspondiente a la estación Copilco de la Línea 3 del STC Metro.	53
Tabla 13. Ejemplo memoria de cálculo del tiempo máximo permisible de exposición para los trayectos completos de las líneas medidas del STC Metro.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comparación de niveles aproximados de ruido para actividades comunes.....	15
Figura 2. Mapa de ruido para la ZMVM.....	21
Figura 3. Fotografía del equipo sonómetro Larson Davis Soundtrack LxT1 utilizado para medir los niveles de ruido en el STC Metro.....	25
Figura 4. Tipos de trenes en operación en el STC Metro.	26
Figura 5. Mapa de Movilidad Integrada de la Ciudad de México.	30
Figura 6. Niveles sonoros equivalentes calculados en la Línea 3 del STC Metro para la ruta Universidad – Indios Verdes e Indios Verdes – Universidad y sus segmentos.....	32
Figura 7. Niveles sonoros equivalentes calculados en la Línea 4 del STC Metro para la ruta Santa Anita – Martín Carrera – Martín Carrera – Santa Anita y sus segmentos.....	33
Figura 8. Niveles sonoros equivalentes calculados en la Línea 6 del STC Metro para la ruta Martín Carrera – El Rosario – El Rosario – Martín Carrera y sus segmentos.....	34
Figura 9. Niveles sonoros equivalentes calculados en la Línea 9 del STC Metro para la ruta Tacubaya – Pantitlán – Pantitlán - Tacubaya y sus segmentos.	35

Figura 10. Niveles sonoros equivalentes calculados en la Línea 12 del STC Metro para la ruta Mixcoac – Periférico Oriente – Periférico Oriente – Mixcoac y sus segmentos 36

Figura 11. Comparación de nivel sonoro equivalente calculado (L_{eq}), nivel sonoro máximo (L_{Amax}) y el nivel sonoro mínimo (L_{Amin}) para las cinco líneas medidas del STC Metro 37

Figura 12. Comparación de los niveles sonoros equivalentes calculados para días laborales, feriados y de fin de semana en que se realizaron mediciones de la exposición personal a ruido en las cinco líneas seleccionadas del STC Metro 38

Figura 13. Comparación de la exposición a ruido (L_{eq} , L_{Amin} y L_{Amax}) determinada en andenes y estaciones para cada una de las líneas en que se realizó muestreo del STC Metro de la Ciudad de México 39

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Determinar los niveles de ruido ambiental al que están expuestos los usuarios del STC Metro de la Ciudad de México mediante mediciones con sonómetros calibrados para identificar el riesgo ambiental a ruido.

1.1.2. Objetivos Particulares

- Identificar las líneas donde existe mayor exposición a ruido ambiental dentro del STC Metro.
- A partir de las mediciones comparar la exposición a ruido ambiental durante los traslados en el STC Metro.
- Identificar el tipo de día (laboral, fin de semana o laboral) en el que se está mayormente expuesto a ruido ambiental en el STC Metro.
- Identificar los factores que influyen en la exposición a ruido ambiental en el Sistema de Transporte de la Ciudad de México.

Descripción de los apartados de este trabajo, el cual se desarrolló en 8 apartados

El apartado 1 introduce a los objetivos de este trabajo, así como una breve descripción de este.

El apartado 2 abarca el marco teórico y los antecedentes correspondientes al ruido y a la contaminación acústica, también se mencionan estudios previos realizados en función de esta problemática.

El apartado 3 corresponde a los métodos de medición y su planeación, así como la descripción de los equipos.

En el apartado 4 se presentan los resultados obtenidos en este proyecto.

El apartado 5 incluye el análisis de los resultados.

El apartado 6 contiene las conclusiones del trabajo.

El apartado 7 presenta las referencias bibliográficas utilizadas para el desarrollo de este proyecto y trabajo escrito.

El apéndice muestra un ejemplo de memoria de cálculo utilizada para los datos obtenidos.

1.2. Análisis situacional

El ruido es una forma de energía, que se transmite desde la fuente hacia el espacio circundante o contiguo. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), en países económicamente desarrollados, el ruido es la primera molestia ambiental, siendo el tráfico vehicular la fuente más importante de la contaminación acústica (SEMARNAT, 2017). De acuerdo con la OMS, el ruido excesivo daña gravemente la salud humana e interfiere con las actividades diarias de las personas de todas las edades. Ese ha documentado que el ruido puede generar perturbaciones en el sueño, causar efectos cardiovasculares y psicofisiológicos, así como una reducción en el rendimiento y problemas en las conductas sociales de los afectados, sin mencionar los obvios daños a la salud auditiva de los mismos (OMS, 2010) En la actualidad, se han realizado llamados a los gobiernos internacionales por parte de organizaciones de salud para llevar a cabo acciones para conocer el origen de la problemática que representa la contaminación acústica y su relación con la pérdida auditiva en la población, así como la implementación de legislación que regule y disminuya la exposición a dicho tipo de contaminación, la cual, debido al veloz avance de la tecnología, industria y comercio, potencializa la generación de ruido y, a su vez, los daños a la salud de quienes se encuentren expuestos a esta. Es por ello por lo que las investigaciones enfocadas en la contaminación acústica presentan un peso importante en la actualidad para la sociedad.

En zonas urbanas, la principal fuente de emisión de contaminación de ruido son los sistemas de transporte debido a la densidad de población de estas y sus requerimientos para atenderlo. En la Ciudad de México uno de los transportes más utilizados corresponde al Sistema de Transporte Colectivo (STC) Metro. Los usuarios del STC Metro experimentan diariamente el ruido producido por el sistema de transporte, el cual puede generarle serias afectaciones a su salud (PAOT, 2009). A pesar de la relevancia de este problema, a la fecha no se cuenta con suficientes estudios referentes a la contaminación acústica que permitan apoyar en la generación de estrategias de prevención y mitigación de la exposición a ruido. Por ello, es imperativo tomar acción frente a este problema de salud pública. Teniendo en cuenta lo anterior, el presente proyecto tiene como finalidad conocer el nivel de ruido al que están sometidos los usuarios de distintas líneas del STC Metro.

II. MARCO TEÓRICO

La contaminación atmosférica se denomina como la presencia de cualquier agente físico, biológico o químico en lugares, formas y concentraciones tales que sean nocivos para la salud, seguridad y bienestar para los seres vivos en general (Palacios, 2022). Los agentes o contaminantes físicos son aquellos que al adicionarse al ambiente alteran la calidad de los componentes de este y provocan daños a los seres vivos. Entre los contaminantes físicos se encuentran el ruido, las radiaciones, la temperatura o la luz.

En términos físicos, el sonido es producido por una perturbación mecánica provocada por una perturbación mecánica propagada como un movimiento de ondas en el aire. Por otro lado, el ruido es un sonido desagradable o molesto que puede resultar nocivo para la salud, particularmente para el aparato auditivo (Berglund et al., 1995). El ruido es una forma de energía, que se transmite desde la fuente hacia el espacio circundante o contiguo. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), en países económicamente desarrollados, el ruido es la primera molestia ambiental, siendo el tráfico vehicular la fuente más importante de la contaminación acústica (SEMARNAT, 2017). De acuerdo con la OMS, el ruido excesivo daña gravemente la salud humana e interfiere con las actividades diarias de las personas de todas las edades. Ese ha documentado que el ruido puede generar perturbaciones en el sueño, causar efectos cardiovasculares y psicofisiológicos, así como una reducción en el rendimiento y problemas en las conductas sociales de los afectados, sin mencionar los obvios daños a la salud auditiva de los mismos (OMS, 2010).

En el continente americano, alrededor de 217 millones de personas viven con pérdida auditiva, y se estima que para el año 2050, el número de individuos afectados aumente a 322 millones. Ello genera una necesidad imperativa de acciones para prevenir y abordar este problema de salud pública con el fin de mitigar su impacto adverso en todas las etapas de la vida. La trayectoria auditiva de un individuo a lo largo de su vida determina su capacidad auditiva en cualquier momento (OMS, 2022). La Organización Panamericana de la Salud realizó un llamado a los Estados Miembros para ejecutar las intervenciones necesarias para el cuidado de la audición, enfocándose en la prevención, identificación y tratamiento de la pérdida auditiva, así como sus orígenes. Es por ello por lo que las investigaciones enfocadas en la contaminación acústica presentan un peso importante en la actualidad para la sociedad. La contaminación acústica representa un problema

ambiental de relevancia con mayor presencia en la sociedad actual debido al rápido avance de las actividades industriales, comerciales y de servicios que constituyen fuentes fijas y móviles, las cuales generan diferentes tipos de ruido, perjudicando a los seres vivos (NOM-081-SEMARNAT, 1994). La exposición personal a contaminación por ruido ambiental está asociada con diversos daños a la salud humana e interfiere con las actividades diarias de las personas de todas las edades. Esta puede generar perturbaciones en el sueño, causar efectos cardiovasculares y psicofisiológicos, así como una reducción en el rendimiento y problemas en las conductas de los individuos, teniendo como problema principal los daños obvios al aparato auditivo de los mismos (OMS, 2010).

2.1. ¿Qué es el ruido?

Sonido y ruido

En términos físicos, el sonido es producido por una perturbación mecánica provocada por una perturbación mecánica propagada como un movimiento de ondas en el aire. El sonido provoca respuestas fisiológicas en el oído y en las vías auditivas, estas respuestas pueden ser descritas y medidas con parámetros físicos o electrofisiológicos, como lo son el movimiento vibratorio en el tímpano o los cambios en los potenciales bioeléctricos en los tejidos sensoriales y neurales (Berglund et al., 1995).

Mientras que el ruido es un sonido considerado como desagradable o molesto que puede resultar nocivo para la salud, particularmente para el aparato auditivo. Comúnmente se define como energía acústica audible que afecta negativamente a los seres humanos psicológica y fisiológicamente (Berglund et al., 1995).

Onda sonora

Es una onda longitudinal que surge de la vibración de una fuente de sonido. Se define como onda longitudinal cuando la dirección del movimiento de las partículas en el medio tiene lugar en la misma dirección de propagación (Flores, P., 1990).

Presión sonora

Se denomina presión sonora a las fluctuaciones de la presión atmosférica por encima y por debajo del valor estático, producido cuando se propaga una onda sonora a su a través. Es una medida básica de las vibraciones del aire que constituyen el sonido (Berglund et al., 1995).

Frecuencia

Es el número de revoluciones por segundo en el aire en el cual se propaga el sonido, tiene como unidad el Hertz (Hz). De forma general, el rango de frecuencia audible del ser humano es de 20 a 20,000 Hz (OMS, 2020). Al presentarse un sonido complejo, el espectro de frecuencias se puede dividir en secciones que se denominan bandas frecuenciales, esto para facilitar el agrupamiento del contenido en frecuencias de un sonido, estas bandas se designan con los extremos y la frecuencia central. Para utilizar las bandas frecuenciales se utilizan filtros electrónicos que suelen tener un ancho de banda de una octava o de un tercio de octava. Siendo una octava una banda de frecuencia en la que la más alta es el doble de la más baja. El proceso de dividir un sonido complejo en estos intervalos se denomina análisis de frecuencia, los resultados de este proceso se presentan en un espectrograma (Brüel & Kjær, 2018).

Decibel (dB)

El ruido se expresa en decibeles, el decibel se refiere a la décima parte de un bel, que para la presión sonora se define como:

$$L_{dB} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^2,$$

donde; p es la presión acústica medida,

p_0 es la presión acústica de referencia, igual a 20 μ Pa,

L_{dB} es el nivel de la presión acústica medida expresado en dB.

Debido a que el rango de presión sonora que puede detectar el ser humano es muy amplio se mide en escala logarítmica, esto provoca que no se pueda sumar ni promediar de forma aritmética (OMS, 1995).

Equipos de medición

Se utilizan sonómetros para la medición del nivel de presión sonora, esto a través de ponderaciones normalizadas en frecuencia y tiempo en bandas de tercios de octava, estas son los intervalos entre dos frecuencias, cuya razón es $2^{1/3}$ (NADF-005-AMBT, 2013). Estos instrumentos responden al sonido con proximidad a como lo hace el oído humano, facilitando medidas reproducibles de los niveles de presión sonora. Existen distintas clases de sonómetros, dentro de estas destacan dos, los sonómetros de clase 1 y clase 2. Los sonómetros de clase 1 son los más precisos, con tolerancias menores, pero con un costo

más elevado pues cuentan con la certificación de la International Electrotechnical Commission (IEC) 651/804. Por otro lado, los sonómetros de clase 2 presentan una precisión menor y por lo anterior tienen un costo menor que los sonómetros de clase 1 (Ruiz, 2003).

Ponderaciones de frecuencia

Debido a que los sistemas auditivos no perciben todas las frecuencias sonoras se utilizan diferentes tipos de ponderaciones para determinar las frecuencias que produce el ruido ambiental. Las ponderaciones de frecuencia fueron descritas en la década de 1940 en estándares americanos y alemanes (Hedegaard, 1999). Estas se utilizan para que los sonómetros midan y proporcionen los niveles de presión sonora que representan lo que perciben nuestros oídos. En términos generales, son filtros electrónicos que contienen los sonómetros que ajustan el modo de medición. Esta se expresa como un subíndice en el parámetro a medir, por ejemplo, L_A , para indicar que esta medida incluye tal ponderación de frecuencia.

En 1991, la IEC comenzó con un grupo de trabajo encargado de preparar un nuevo estándar de ponderación para la medición de presión sonora, el cual corresponde a la IEC 61672, que incluye especificaciones para lograr integrar y promediar los niveles de sonido, siendo esta norma la que establece que únicamente existan dos clases de precisión para sonómetros. Esta norma define las ponderaciones de frecuencia A, C y Z (Hedegaard, 1999). La ponderación A ajusta la medición de manera que se equipare a la respuesta del oído humano ante los niveles de presión sonora. Los filtros de ponderación A cubren un espectro de 10 a 20 kHz, lo que corresponde a todo el espectro auditivo percibido por el oído humano (Brüel & Kjær, 2018). Esta se emplea en la mayoría de las medidas de ruido ambiental, especificada en la normatividad mexicana e internacional.

La ponderación C fue diseñada como respuesta plana con una caída suave ante frecuencias más altas y bajas, es decir, mediciones llamadas “pico”. Finalmente, la ponderación Z es una respuesta de frecuencia definida como plana en rango de frecuencia definido para las ponderaciones anteriores, utilizando los mismos límites de tolerancia (Hedegaard, 1999).

Fuente emisora de ruido

Son todo objeto, actividad, operación o proceso que genere o pueda generar emisiones de ruido al ambiente, existen dos tipos de fuentes, fuentes fijas y fuentes móviles. Las fuentes fijas son toda instalación establecida en un solo lugar, cuyo fin sea desarrollar actividades de servicios, industriales, comerciales o actividades que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera (NOM-081-SEMARNAT-1994). Estos pueden ser bienes inmuebles en general donde su maquinaria, herramientas o instalaciones en general, produzcan de forma continua o discontinua emisiones sonoras. Se considera que las fuentes fijas están situadas dentro de los límites físicos y legales de un predio ubicado en un lugar determinado. Se considera como fuente móvil a todo vehículo motorizado que pueda emitir ruido al ambiente. A este tipo de fuente de emisión le corresponde el 70 % de las emisiones de ruido ambiental presente en zonas urbanas (Platzer et al., 2007).

2.2. Contaminación acústica

En 1972, la Organización Mundial de la Salud (OMS) decidió catalogar al ruido de manera genérica como un tipo más de contaminación. Siete años después, la Conferencia de Estocolmo, llamada oficialmente Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano, se clasificó al ruido como un contaminante específico (Amable et al., 2017). Desde la década de 1980, la OMS estableció como objetivo analizar el problema del ruido ambiental, estableciendo por ello reglas y guías para su estudio, análisis y control. Estas guías se relacionan directamente con los daños a la salud, y buscan funcionar como bases para las normas internacionales (Berglund et al., 1995).

En 1992 en Alemania, en una reunión del grupo de trabajo de la OMS sección europea, se realizó una revisión de los criterios y valores para la guía para la salud, haciendo actualizaciones de estos y estableciendo los valores de referencia y una evaluación de los riesgos en materia de ruido ambiental. El objetivo de esta reunión fue ampliar las guías para el ruido urbano y con esto aumentar su cobertura y aplicación. En 1999, se convocó a un grupo de especialistas para finalizar las Guías para el ruido urbano, las cuales representan una respuesta ante el ruido ambiental como contaminante específico.

La contaminación por ruido es el exceso de sonido que altera las condiciones normales del ambiente en una determinada zona. Este tipo de contaminación se diferencia de otros por requerir muy pocos recursos para producirse y emitirse, su dificultad para ser medido y

cuantificado en cuestión de instrumentación no deja residuos y no tiene un efecto acumulativo en el medio, sin embargo, sí puede tenerlo en el ser humano. En términos generales, la contaminación acústica se define como la presencia de sonido perturbador y desagradable, que provoca malestar y riesgo de enfermedades en la población (Rodríguez, 2014).

La contaminación acústica es característica de las ciudades industrializadas, sobre todo en los grandes núcleos urbanos donde el tráfico vehicular es intenso (Platzer et al., 2004). La principal emisión de contaminación de ruido en zonas urbanas resulta del sistema de transporte debido a la densidad de población de estas, el cual consta de vehículos particulares y transporte público (SEMARNAT, 2017).

La contaminación por ruido presenta una fuerte problemática en materia de salud pública principalmente en grandes ciudades, como es el caso de la Ciudad de México y de la Zona Metropolitana del Valle de México. Esto se debe a que las grandes ciudades afrontan diversos conflictos en cuanto desarrollo urbano. La Ciudad de México es un territorio con fortalezas y carencias, ventajas y también deterioros, lo cual genera necesidad de plantear y evaluar alternativas para solucionar los problemas que se originan en esta, siendo el ruido ambiental uno de los principales (UAM, 2014). Es importante destacar que la Ciudad de México se encuentra dentro de las diez ciudades más ruidosas del mundo (Audiotech, 2023).

Por lo mencionado anteriormente, resulta imperativo realizar estudios y mediciones de ruido en distintos ambientes de la Ciudad de México y sus colindancias, ya que al ser una de las ciudades más pobladas, está sujeta a experimentar afectaciones por la contaminación acústica. Con el apoyo de las guías y el acatamiento de la normatividad existente, estos estudios presentan un área prometedora para combatir este tipo de contaminación.

2.3. Guías y límites permisibles de ruido

En las guías para el ruido urbano emitidas por la OMS en 1999, se presentan los valores guía respecto a varios ambientes específicos y los efectos a la salud relacionados a estos (Tabla 1). Para cada uno de los efectos sobre la salud, se establecieron los límites específicos del ruido con el menor nivel que produce un daño a la salud (OMS, 1999).

Tabla 1. Valores guía para el ruido urbano en ambientes específicos y efectos identificados en la salud humana

Ambiente Específico	Efecto(s) críticos(s) sobre la salud	L_{Aeq} [dB(A)]	Tiempo [horas]	L_{max} [dB]
Exteriores	Molestia grave en el día y al anochecer	55	16	-
	Molestia moderada en el día y al anochecer	50	16	-
Interior de la vivienda, dormitorios	Interferencia en la comunicación oral y molestia moderada en el día y al anochecer	35	16	45
	Trastorno del sueño durante la noche	30	8	
Fuera de los dormitorios	Trastorno del sueño, ventana abierta (valores en exteriores)	45	8	60
Salas de clase e interior de centros preescolares	Interferencia en la comunicación oral, disturbio en el análisis de información y comunicación del mensaje	35	Durante clases	-
Dormitorios de centros preescolares, interiores	Trastorno del sueño	30	Durante el descanso	45
Escuelas, áreas exteriores de juego	Molestia (fuente externa)	55	Durante el juego	-
Hospitales, pabellones, interiores	Trastorno del sueño durante la noche	30	8	40
	Trastorno del sueño durante el día y al anochecer	30	16	-
Hospitales, salas de tratamiento, interiores	Interferencia en el descanso y la recuperación	¹		
Áreas industriales, comerciales y de	Deficiencia auditiva	70	24	110

¹ Lo más bajo posible

tránsito, interiores y exteriores				
Ceremonias, festivos y eventos de entretenimiento	Deficiencia auditiva (patrones: <5 veces/año)	100	4	110
Discursos públicos, interiores y exteriores	Deficiencia auditiva	85	1	110
Ambiente Específico	Efecto(s) críticos(s) sobre la salud	L_{Aeq} [dB(A)]	Tiempo [horas]	L_{max} [dB]
Música y otros sonidos a través de audífonos o parlantes	Deficiencia auditiva (valor de campo libre)	85 ²	1	110
Sonidos de impulso de juguetes, fuegos artificiales y armas	Deficiencia auditiva (adultos)	-	-	140 ³
	Deficiencia auditiva (niños)	-	-	120 ²
Exteriores de parques de diversión y áreas de conservación	Interrupción de la tranquilidad	4		

Tomada de la Guía para ruido urbano, OMS (1999).

A través de las Guías para el ruido urbano publicadas por la OMS, la Noise Pollution Clearinghouse (NPC), organización norteamericana sin fines de lucro que comparte amplios recursos relacionados con ruido, reporta una gráfica realizando una comparación entre sonidos varios correspondientes a actividades comunes (Fig. 1)

² Con audífonos, adaptado a valores de campo libre

³ : Presión sonora máxima medida a 100 mm del oído.

⁴ Se debe preservar la tranquilidad de los parques y áreas de conservación y se debe mantener baja la relación entre el ruido intruso y el sonido natural de fondo.

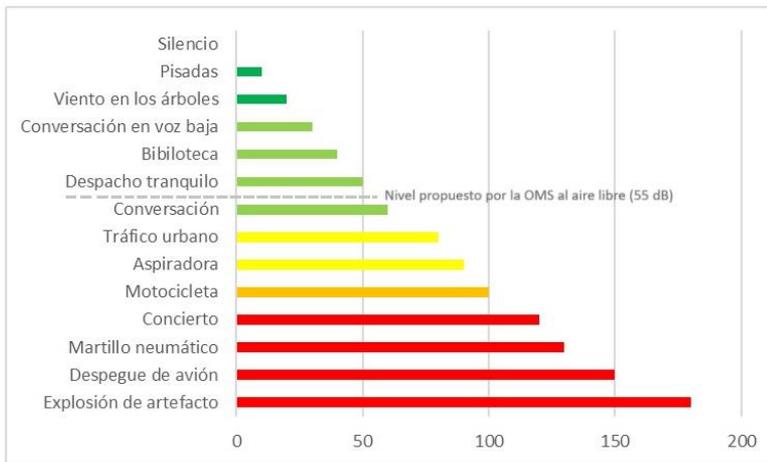


Figura 1. Comparación de niveles aproximados de ruido para actividades comunes. Tomado de: Moreno et al. (2015).

Con base en reportes realizados por la Organización Mundial de la Salud respecto a los niveles de ruido, múltiples países han establecido normas para regular el severo problema que representa el ruido ambiental. En 1990, la International Organization for Standardization (ISO) emitió una Norma Internacional denominada “Acústica – Determinación de la exposición a ruido laboral y estimación de la pérdida auditiva inducida por ruido”, la cual expone la relación entre la exposición a ruido y el desplazamiento permanente del umbral auditivo. En su más reciente edición, la organización expone el desplazamiento del umbral aproximado ante exposiciones determinadas, permitiendo a cada usuario la definición del nivel aceptable para evitar este desplazamiento (ISO, 1990).

México es uno de los países que ha presentado interés en controlar y cuantificar los niveles de ruido, reconociendo el ruido ambiental un problema importante a abordar y estableciendo normas para dichos objetivos. La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) en materia de ruido, establece en el capítulo VIII artículo 155 que quedan prohibidas las emisiones de ruido, vibraciones, energía térmica, luz intrusa y la generación de contaminación visual en cuanto rebasen los límites máximos establecidos en las normas oficiales mexicanas. Así como en los artículos 156 y 156 BIS, se establece que dichas normas establecerán los procedimientos para la prevención y control de la contaminación acústica y el establecimiento y operación de los sistemas de monitoreo del ruido (LGEEPA, 2023). Esto se presenta en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-STPS-2001 presentada por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social, la cual

establece las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se genere ruido, con el objetivo de asegurar condiciones sanas para los trabajadores. En la norma antes mencionada se establecen las definiciones correspondientes a ruido y ambientes laborales, los límites máximos de exposición (Tabla 2) y los métodos para determinar el Nivel de Exposición a Ruido (NER) en decibeles con ponderación A.

Tabla 2. Límites máximos permisibles de exposición

Nivel de exposición a ruido	Tiempo máximo permisible de exposición
90 dB(A)	8 horas
93 dB(A)	4 horas
96 dB(A)	2 horas
99 dB(A)	1 hora
102 dB(A)	30 minutos
105 dB(A)	15 minutos

Tomada de Secretaría del Trabajo y Previsión Social (NOM-011-STPS-2001).

También la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales a través de la NOM-081-SEMARNAT-1994 estableció los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición (Tabla 3).

Tabla 3. Límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas

Zona	Horario	Límite máximo permisible
Residencial (exteriores)	6:00 a 22:00	55 dB(A)
	22:00 a 6:00	50 dB(A)
Zona	Horario (local)	Límite máximo permisible
Industriales y comerciales	06:00 a 22:00	68 dB(A)
	22:00 a 06:00	65 dB(A)

Escuelas (áreas exteriores de juego)	Durante el juego	55 dB(A)
Ceremonias, festivales y eventos de entretenimiento	4 horas	100 dB(A)

Tomada de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (NOM-081-SEMARNAT-1994).

La Secretaría de Medio Ambiente emitió en 2013 la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-005-AMBT-2013 que establece las condiciones de medición y los límites máximos permisibles de emisiones sonoras (Tabla 4 y Tabla 5), que deberán cumplir los responsables de fuentes emisoras ubicadas en el Distrito Federal, ahora Ciudad de México.

Tabla 4. Límites máximos permisibles de emisiones sonoras en el punto de referencia que deben de cumplir las fuentes emisoras

Horario	Límite máximo permisible
6:00 a 20:00 h	65 dB(A)
20:00 a 6:00 h	62 dB(A)

Tomada de Secretaría de Medio Ambiente (NADF-005-AMBT-2013).

Tabla 5. Límites máximos permisibles de recepción de emisiones sonoras en el punto de denuncia

Horario	Límite máximo permisible
6:00 a 20:00 h	63 dB(A)
20:00 a 6:00 h	60 dB(A)

Tomada de Secretaría de Medio Ambiente (NADF-005-AMBT-2013).

El Instituto Nacional de Ecología en 1995 estableció a través de la Norma Oficial Mexicana NOM-080-ECOL-1994 los límites máximos permisibles de emisión de ruido proveniente del escape de los vehículos automotores, motocicletas y triciclos motorizados en circulación y su método de medición (Tabla 6). Destacando que se exceptúan los vehículos de maquinaria pesada para construcción y los que transitan por riel, perteneciendo los trenes del STC Metro al último grupo mencionado.

Tabla 6. Límites máximos permisibles de los automóviles, camionetas, camiones y tractocamiones son expresados en dB(A) de acuerdo con su peso bruto vehicular.

Peso bruto vehicular (kg)	Límites máximos permisibles [dB(A)]
Hasta 3,000	86
Más de 3,000 y hasta 10,000	92
Más de 10,000	99

En el año 2000, el Gobierno de la Ciudad de México publicó la Ley Ambiental de Protección a la Tierra en la Ciudad de México, reformada en agosto del 2023, la cual define los principios mediante los cuales se reformula, conduce y evalúa la política ambiental en nuestra ciudad, haciendo énfasis en el problema que representan las zonas de calidad acústicas.

Una zona de calidad acústica es aquella parte del territorio que presenta una vulnerabilidad a la emisión de ruidos y sonidos que puedan afectar de manera significativa la salud de las personas y el medio ambiente y sobre la cual la autoridad puede emitir opiniones o restricciones por las emisiones de ruido (Gobierno de la Ciudad de México, 2023).

Esta ley establece la prohibición de las emisiones de ruido que rebasen las normas oficiales mexicanas y las normas ambientales para a Ciudad de México, la obligación de los propietarios de fuentes que generen emisiones de ruido de instalar mecanismos de disminución de estas y campañas por parte de las autoridades en materia de este tipo de emisiones y de otros tipos. De forma general, esta ley establece y decreta las acciones correspondientes a la regulación, control y mitigación de distintos tipos de contaminación, incluyendo la acústica.

Dentro de esta búsqueda de la mitigación de la contaminación por ruido, en las reformas que se realizaron a la ley antes mencionada, se dictaminaron sanciones para las personas que hagan ruido a niveles superiores a los 65 dB en la Ciudad de México, siendo arrestadas por 36 horas, clausura de sus negocios, decomiso de sus bienes, suspensión de actividades o la acreditación a una multa (Capital 21, 2021).

2.4. Daños a la salud

En las Guías para el Ruido Urbano publicadas por la OMS, se presentan los valores guía para efectos específicos del ruido en la salud. Estos efectos van desde interferencia en la percepción del habla hasta pérdida auditiva. A continuación se presentan los principales efectos negativos a la salud reportados en la literatura.

- Interferencia en la percepción del habla

Gran parte de la población mundial es susceptible a interferencias en la comunicación oral, siendo los adultos mayores y personas con problemas de audición los más perjudicados. La razón de la señal en comparación con el ruido debe ser al menos de 15 dB con un nivel de voz de 50 dB, siendo este nivel un promedio del nivel de voz en hombres y mujeres ubicados a un metro de distancia. Por lo tanto, para una percepción clara del habla, el nivel de ruido de fondo debe ser igual o menor a 35 dB(A) (Berglund et al., 1995).

- Deficiencia auditiva

El ruido que provoca deficiencias auditivas no está limitado a actividades laborales, este puede involucrar actividades recreativas, tales como conciertos, clubes nocturnos, deportes motorizados y de tiro, entre otros (OMS, 1999). La norma ISO 1999 establece que la exposición a largo plazo a niveles de presión sonora de L_{Aeq} , durante 24 horas de hasta 70 dB(A) no produce deficiencias auditivas. Sin embargo, para evitar la pérdida auditiva provocada por la exposición de ruido de impulso, las presiones sonoras máximas nunca deben exceder de 120 dB para niños y 140 dB para adultos (ISO, 1990).

- Trastornos del sueño

Dentro de este efecto negativo a la salud, los principales grupos afectados son los adultos mayores, personas con trastornos físicos o mentales o personas con dificultades para conciliar el sueño. Los efectos cuantificables del ruido sobre el sueño se inician a partir de L_{Aeq} de 30 dB(A), a niveles superiores se pueden intensificar los efectos sobre el sueño. Al presentarse ruido continuo, el nivel de presión sonora equivalente no debe superar el nivel antes mencionado. A diferencia de la baja presencia de ruido de fondo, el ruido por encima de 45 dB en L_{Amax} debe limitarse (Berglund et al., 1995).

- Molestia

La molestia generada por ruido varía entre individuos, así como por las características físicas del mismo. Durante el día, poca parte de la población se sienten altamente perturbadas por niveles de L_{Aeq} por debajo de los 55 dB(A) y pocas se sienten moderadamente perturbadas con niveles de L_{Aeq} por debajo de los 50 dB(A). Destacando que por la tarde y la noche estos valores tienen que ser 5 a 10 dB menos que durante el día (OMS, 1999).

- Comportamiento social

El ruido puede afectar adversamente a la lectura, atención, resolución de problemas, memoria, desarrollo social y desempeño de la actividad laboral, provocando a su vez accidentes en las zonas de trabajo. Los niveles por encima de 80 dB(A) puede propiciar el comportamiento agresivo de los individuos que se encuentran expuestos a estos (Sánchez et al., 2014). Se ha demostrado a través de estudios realizados por la población internacional que la exposición continua a elevados niveles de ruido puede repercutir significativamente en las aptitudes y habilidades de aprendizaje en ambientes escolares (Campos, 2007).

2.5. Exposición personal a ruido ambiental en México

La Organización Panamericana de la Salud realizó un llamado a los Estados Miembros para ejecutar las intervenciones necesarias para el cuidado de la audición, enfocándose en la prevención, identificación y tratamiento de la pérdida auditiva, así como sus orígenes. Es por ello por lo que las investigaciones enfocadas en la contaminación acústica representan un peso importante en la actualidad para la sociedad.

En la Ciudad de México se han llevado a cabo algunos estudios para conocer los niveles de exposición a ruido ambiental en diferentes ambientes, esto se debe a la importancia que representa este tipo de contaminación en los tiempos actuales. Por ejemplo, en 2009, la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT) realizó una evaluación del ruido generado en la Red del Sistema de Transporte Colectivo Metro, reconociendo que la exposición a niveles de ruido elevados en el transporte público puede tener diferentes repercusiones en diversos aspectos de los usuarios de dicha red. Este estudio se realizó en 49 estaciones de la 175 que conformaban hasta ese momento el STC Metro, considerando los tres tipos de estación que existen: superficial, subterránea y elevada. El

valor máximo registrado fue de 85.8 dB(A), mientras que el valor mínimo registrado fue de 62.3 dB(A). Es de resaltar que todas las mediciones obtenidas en dicho estudio se encontraron por encima de lo establecido en la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-005-AMBT-2006, registrándose promedios de medición de 75.8 dB(A) en hora pico y de 76 dB(A) en horas valle (PAOT, 2009). Dichos resultados remarcaron la necesidad de continuar con el monitoreo de los niveles de exposición a ruido en dicho medio de transporte.

En 2011, la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco en colaboración con la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal realizaron el primer mapa de ruido para la Zona Metropolitana del Valle de México (Fig. 2), el cual surgió a partir de la necesidad de realizar un análisis profundo por zonas específicas de la ciudad con el objetivo de servir como monitor de la evolución del problema de ruido ambiental en la ciudad (Rodríguez et al., 2011).

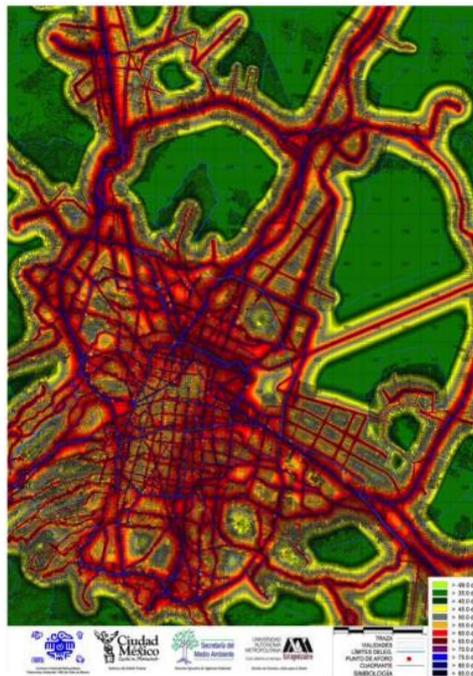


Figura 2. Mapa de ruido para la ZMVM. Tomado de Rodríguez et al, 2011.

En 2017, Aparicio et al. (2020) realizaron un estudio de la exposición de ciclistas a la contaminación atmosférica y al ruido en la Ciudad de México en cinco alcaldías; Álvaro Obregón, Benito Juárez, Coyoacán, Cuauhtémoc y Miguel Hidalgo. En este estudio se

cuantificó el nivel de ruido al que los ciclistas están expuestos minuto a minuto, variando el día, horario y locación. Los niveles de ruido medidos en la Ciudad de México resultaron relativamente altos comparados con la NADF-005-AMBT-2013, con valores promedio por encima de los 70 dB(A), siendo que para el 95 % de los viajes de los ciclistas, los niveles de ruido exceden el valor establecido por la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México en la norma mencionada anteriormente. En este estudio se concluyó que los niveles de exposición a ruido ambiental por tráfico urbano son particularmente altos en general en la ciudad.

III. MÉTODO

3.1. Planeación de la medición

3.1.1. Propósito

Determinación de los niveles de exposición de los usuarios de transporte público durante su traslado.

Nivel sonoro equivalente (L_{eq}): Es la energía media integrada a través de la red de ponderación A a lo largo del periodo de medición, este nivel se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$L_{eq} = 10 \log \sum_i^n 10^{\frac{L_i}{10}} \cdot t$$

Siendo:

n = Número total de muestras tomadas

L_i = nivel de ruido en dBA

t_i = fracción de la muestra total de tiempo

Dosis: Cantidad de energía sonora que un trabajador puede recibir durante la jornada laboral, está determinada por el nivel sonoro equivalente al que se está expuesto y por la duración de esta exposición.

La dosis considerada en este trabajo correspondió a la duración del trayecto completo para cada línea, destacando que para cada caso es diferente, lo cual depende de la distancia que recorren las líneas.

3.2. Selección de equipo

Para este proyecto se utilizó el sonómetro Larson Davis Soundtrack LxT1 Clase 1 (Fig. 3), este equipo está dividido en cinco piezas:

- Micrófono
- Preamplificador
- Procesador principal o cuerpo del sonómetro:
- Filtro
- Calibrador acústico de precisión de 1000 Hz Larson Davis 200: con capacidad de calibrar a 94 y 114 dB.

El sonómetro funciona midiendo el cambio en la presión sonora. El micrófono recibe la onda sonora y con esta genera una señal eléctrica proporcional, pasándola por el preamplificador nivelando la señal para finalmente enviarla al procesador principal, este último aplicando una ponderación de frecuencia (Brüel & Kjær, 2018).

Este equipo utiliza la red de ponderación de frecuencia A, el cual ajusta la medición de manera que se equipare a la respuesta del oído humano ante los niveles de presión sonora, debido a que los filtros de esta ponderación cubren el espectro auditivo percibido por el ser humano de 10 a 20 kHz, como se mencionó anteriormente. Este equipo mide los niveles de presión sonora LA reportados en decibeles con ponderación A (dB_A).



Figura 3. Fotografía del equipo sonómetro Larson Davis Soundtrack LxT1 utilizado para medir los niveles de ruido en el STC Metro.

3.3. Selección de líneas del STC Metro

El STC Metro cuenta con 12 líneas distribuidas en la Ciudad de México y parte del Estado de México, con una extensión de 226.488 km de red (Gobierno de la CDMX, 2023). Dentro de los sistemas de transporte urbano de la Zona Metropolitana del Valle de México, el STC Metro representa el principal medio de transporte (INEGI, 2023), presentando de enero a septiembre de 2023 una afluencia de 833,252,090 usuarios (Gobierno de la CDMX, 2023).

Las mediciones se realizaron en cinco de las 12 líneas del STC Metro, con el objetivo de abarcar los cuatro puntos cardinales de la Ciudad de México, las cuales se describen a continuación (Figura 5).

3.3.1. Líneas seleccionadas para la campaña de muestreo

La selección de las líneas para llevar a cabo las mediciones se basó principalmente en la configuración de las líneas y en el tipo de tren que estas emplean, motriz neumático y férreo (Figura 4). Dentro de las cinco líneas elegidas para este proyecto (Tabla 6), se eligió una línea que abarcara de norte a sur de la ciudad, la cual corresponde a la Línea 3 (ruta Indios Verdes-Universidad). Se eligieron tres líneas que abarcaran del oeste al este en distintos puntos de la ciudad, en el norte la Línea 6 (El Rosario-Martín Carrera), en la parte media de la ciudad la Línea 9 (Tacubaya-Pantitlán) y en el sur la Línea 12 (Mixcoac-Tláhuac). Como quinta línea se optó por la Línea 4 (Martín Carrera- Santa Anita). La Figura 4 muestra la distribución geográfica de las líneas seleccionadas dentro del Mapa de Movilidad Integrada de la Ciudad de México.

Se realizaron muestreos para medir los niveles de presión sonora que permitieron la determinación de la exposición personal de usuarios dentro del STC Metro, en andenes y en ruta. Se seleccionaron cinco líneas para realizar los muestreos con el objetivo de cubrir los cuatro puntos cardinales de la Ciudad de México, líneas que abarcaran de sur a norte y de oriente a poniente, así como aquellas que tienen diferente configuración; subterráneas, de superficie y elevadas.

De igual forma se decidió realizar mediciones en líneas de mayor y menor afluencia para conocer la diferencia respecto a los niveles de ruido entre estas

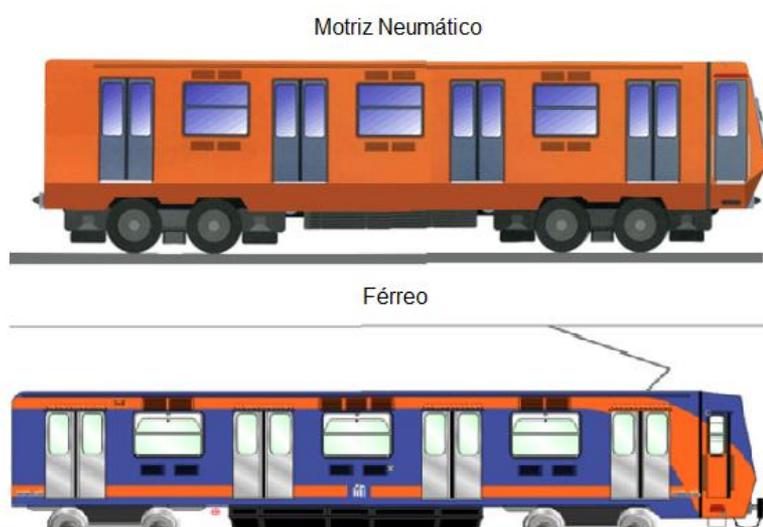


Figura 4. Tipos de trenes en operación en el STC Metro. Tomada de <https://www.metro.cdmx.gob.mx/operacion/carro-neumatico-y-ferrero>

Tabla 7. Líneas seleccionadas para la campaña de muestreo y sus características

Línea	Longitud (km)	Número de estaciones	Zonas que abarca	Año de inauguración en su totalidad
3 INDIOS VERDES UNIVERSIDAD	23.6	21	Norte, centro y sur	1983
4 SANTA ANITA MARTIN CARRERA	10.74	10	Norte	1982
6 EL ROSARIO MARTIN CARRERA	13.94	11	Noroeste y noreste	1986
9 PANTITLAN TACUBAYA	15.67	12	Oeste, centro, este	1988
12 TLAHUAC MIXCOAC	23.72	20	Suroeste, sur, sureste	2012

3.3.2. Estaciones seleccionadas para muestreos

Adicionalmente a las mediciones realizadas dentro de los vagones, en cada línea se llevaron a cabo mediciones en andenes y estaciones de correspondencia, es decir, aquellas estaciones en las que se unen dos o más líneas, y terminales de cada línea. La Tabla 7 presenta las estaciones en las que se realizaron mediciones en los andenes y qué tipo le corresponde a cada una.

Tabla 8. Estaciones seleccionadas por línea para la campaña de muestreo

LÍNEA	3	Terminales	Indios Verdes	LÍNEA	6	Terminales	El Rosario		
			Universidad				Martín Carrera		
		Correspondencia	Deportivo 18 de marzo			Correspondencia	Instituto del Petróleo		
			La Raza				Deportivo 18 de marzo		
			Guerrero						
		Hidalgo	Terminales		Pantitlán				
		Balderas			Tacubaya				
	4	Terminales	Santa Anita		9	Correspondencia	Jamaica	Correspondencia	Chabacano
			Martín Carrera					Centro Médico	
		Correspondencia	Jamaica					Periférico Oriente*	
Candelaria				Mixcoac					
Morelos				Atlalilco					
	Consulado		Ermita						
			12	Terminales	Zapata				

3.3.3. Selección del periodo y horarios de muestreo

Se decidió realizar las mediciones de los niveles de ruido en un horario matutino entre las 08:00-12:00 CDT para las mediciones en los andenes de las estaciones y en ruta dentro de los vagones de las cinco estaciones.

De igual forma se decidió realizar mediciones en líneas de mayor y menor afluencia para conocer la diferencia respecto a los niveles de ruido entre estas. Se optó por medir en tres tipos de día: días laborales (lunes, martes y miércoles), fin de semana (sábado) y días feriados. La Tabla 8 presenta el calendario correspondiente a las campañas de muestreo y fechas realizadas en este trabajo.

Tabla 9. Calendario de las campañas de muestreo realizadas

Línea	Fecha de medición	Tipo de día
3	10 de abril de 2023	Laboral (lunes)
	11 de abril de 2023	Laboral (martes)
	12 de abril de 2023	Laboral (miércoles)
	30 de abril de 2023	Fin de semana
	1° de mayo de 2023	Feriado
4	4 de septiembre de 2023	Laboral (lunes)
	5 de septiembre de 2023	Laboral (martes)
	6 de septiembre de 2023	Laboral (miércoles)
	21 de octubre de 2023	Fin de semana
	15 de septiembre de 2023	Feriado
6	9 de octubre de 2023	Laboral (lunes)
	10 de octubre de 2023	Laboral (martes)
	11 de octubre de 2023	Laboral (miércoles)
	21 de octubre de 2023	Fin de semana
	2 de noviembre de 2023	Feriado
9	4 de septiembre de 2023	Laboral (lunes)
	5 de septiembre de 2023	Laboral (martes)
	6 de septiembre de 2023	Laboral (miércoles)
	14 de octubre de 2023	Fin de semana
	2 de noviembre de 2023	Feriado
12	4 de septiembre de 2023	Laboral (lunes)
	5 de septiembre de 2023	Laboral (martes)
	6 de septiembre de 2023	Laboral (miércoles)
	14 de octubre de 2023	Fin de semana
	15 de septiembre de 2023	Feriado

3.4. Diseño experimental

El protocolo para realizar dichas mediciones fue el siguiente:

- ✓ Se realizó el armado de los sonómetros Larson Davis Soundtrack LxT1 Clase 1, configurando adecuadamente la fecha y hora y calibrando el equipo con el equipo correspondiente a 94 dB. Dicha calibración debía tener un valor de ± 1.0 dB para obtener mediciones fiables y reproducibles.
- ✓ En las mediciones correspondientes a los andenes de las estaciones seleccionadas, los sonómetros se colocaron a un metro de la persona que realizó las mediciones a una altura aproximada de 1.5 m del piso, el cual corresponde a la altura promedio del oído humano. Dichas mediciones se realizaron durante 5 minutos en cada andén, ubicándose en el punto medio de este de una de las direcciones de la estación.
- ✓ Para cada andén de las diferentes estaciones medidas, se anotó en una bitácora la hora exacta a la que la medición iniciaba y finalizaba.
- ✓ En el caso de las mediciones en vagones, se decidió abordar el vagón del centro del tren y mantener el sonómetro cerca de la persona por cuestiones de seguridad. Estas mediciones tenían la duración del trayecto completo de la línea, es decir, un viaje ida-regreso dentro de la línea, realizando un paro al equipo cuando este se encontrara en la última estación y el paro final al llegar a la estación de inicio.
- ✓ Para cada línea se realizó una bitácora para las mediciones en ruta, anotando la hora en la que se ascendió al vagón en la primera estación y el cierre de puertas de esta, sucesivamente se anotó la apertura y cierre de puertas en cada estación. Como objetivo de tener más información durante el procesamiento de los datos recolectados.
- ✓ Al regresar al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático después de cada día de muestreo, se realizó una calibración final antes de realizar el guardado de datos en el equipo, la cual debía presentar un valor de ± 1.0 dB, indicando que las mediciones eran confiables.

- ✓ Se realizó la descarga de los datos diaria para evitar pérdidas de éstos.
- ✓ Se calculó el nivel sonoro equivalente (L_{eq}) para los trayectos completos para cada línea, así como para cada segmento dentro de las líneas y para cada tipo de día (laboral, día de fin de semana y día feriado). Se elaboraron gráficas con los datos obtenidos tras los cálculos de exposición a ruido ambiental para cada línea, los segmentos correspondientes a estas y la comparación de dichos niveles respecto al tipo de día.



Figura 5. Mapa de Movilidad Integrada de la Ciudad de México. Tomado de: <https://metro.cdmx.gob.mx/storage/app/media/lared/mapa-mi-cdmx-stc160522-2.pdf>

IV. RESULTADOS

4.1. Exposición personal a ruido ambiental en líneas del STC Metro

Para realizar el análisis de la información obtenida en este proyecto, se calculó el nivel sonoro equivalente para el trayecto completo de las cinco líneas medidas del STC Metro, así como los L_{eq} para cada uno de los segmentos correspondientes a dichos trayectos (Anexo I). Por segmentos, se refiere a los periodos a los tramos entre estaciones y en las mismas estaciones, dentro de los vagones.

La Figura 6 muestra el nivel sonoro equivalente (L_{eq}) calculado para la ruta completa de la Línea 3 del STC Metro en el trayecto Universidad – Indios Verdes – Indios Verdes – Universidad, el cual está representado por la línea punteada de color rojo. Este valor corresponde a 77.3 dBA. Además, se calcularon los L_{eq} para cada segmento de esta ruta, mayormente, estos segmentos no superan el L_{eq} completo de la línea. Sin embargo, se encontraron siete segmentos por encima de este valor calculado, los cuales pueden ser considerados puntos críticos de esta línea. Siendo el segmento de Universidad – Copilco el que presentó el valor más elevado para este criterio con 78.1 dBA, este segmento representa la salida del tren de una de las dos terminales de la línea para comenzar con el recorrido a través de la línea, saliendo de una estación superficial para entrar a un tramo subterráneo. Otros segmentos que presentaron valores superiores al L_{eq} completo de la línea corresponden a los segmentos Copilco – MAQ, MAQ – Viveros, Viveros – Coyoacán, Guerrero – Tlatelolco, MAQ – Copilco, Copilco – Universidad (segmentos subterráneos) y, por último, el segmento de La Raza – Potrero, en este segmento el tren sale de tramo subterráneo para transitar por segmentos superficiales. El L_{eq} más bajo para el trayecto de esta línea se obtuvo durante la estación Deportivo 18 de Marzo con un valor de 69.4 dBA.

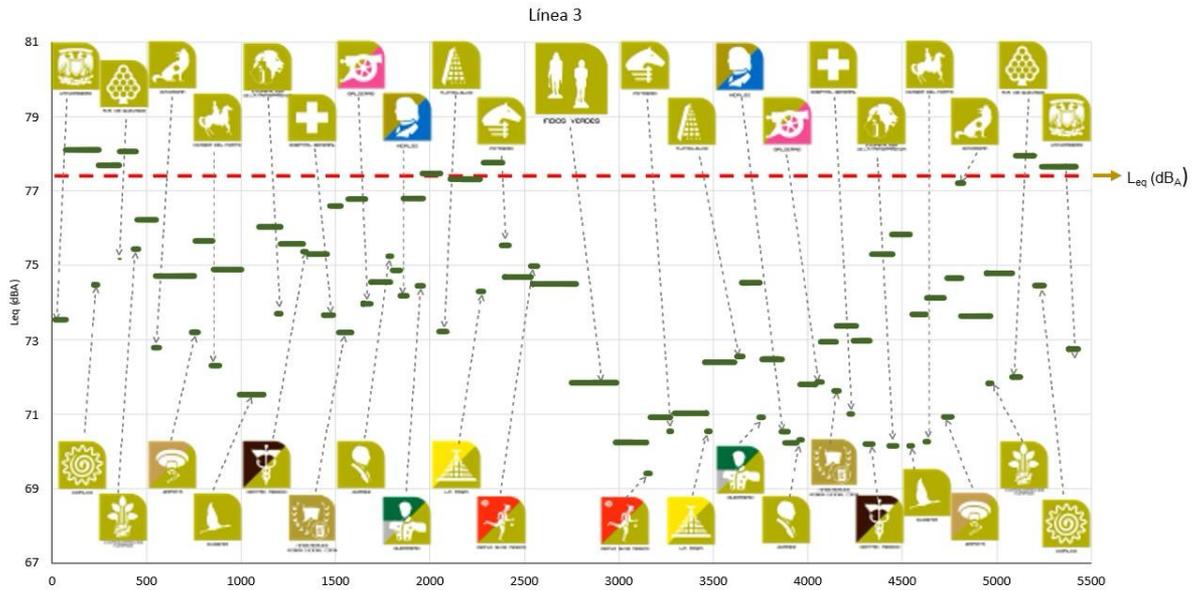


Figura 6. Niveles sonoros equivalentes calculados en la Línea 3 del STC Metro para la ruta Universidad – Indios Verdes e Indios Verdes – Universidad y sus segmentos

En la Figura 7 se muestran los niveles sonoros equivalentes calculados para la Línea 4 del STC Metro, para la ruta completa Santa Anita – Martín Carrera – Martín Carrera – Santa Anita y para los segmentos de esta. Para esta línea y su trayecto completo, el nivel sonoro equivalente calculado resultó de 72.1 dBA, el cual está representado en dicha figura por la línea punteada de color rojo.

Los resultados de los cálculos de L_{eq} para los segmentos de esta línea fueron, en su mayoría, superiores al L_{eq} completo de la línea, lo que indica que la mayor parte de la línea presenta puntos críticos de exposición a ruido a analizar dentro del sistema, no se observaron distinciones entre estaciones y trayectos entre estas en los niveles sonoros equivalentes calculados, destacando que el mayor porcentaje de la línea es elevado, mientras que sólo cuatro estaciones de esta línea son superficiales.

El L_{eq} más alto dentro de los segmentos correspondió a la estación Santa Anita de la segunda parte del trayecto, con un valor de 82.7 dBA. Contrariamente, el valor más pequeño calculado resultó el nivel sonoro equivalente en la misma estación en la primera parte del trayecto (64.8 dBA).

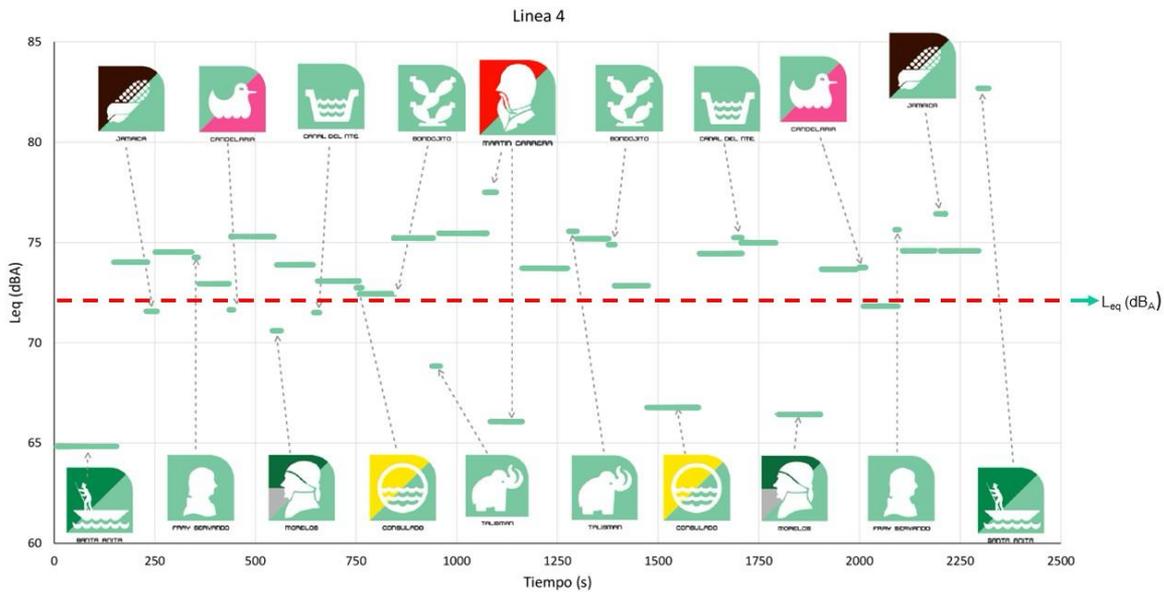


Figura 7. Niveles sonoros equivalentes calculados en la Línea 4 del STC Metro para la ruta Santa Anita – Martín Carrera – Martín Carrera – Santa Anita y sus segmentos

La Figura 8 representa los niveles sonoros equivalentes calculados para la ruta completa de la línea 6 que consta de dos trayectos, el primero de ellos se refiere a Martín Carrera – El Rosario y el segundo a El Rosario – Martín Carrera y los segmentos para la línea antes mencionada. La línea punteada de color verde muestra el valor del L_{eq} para el trayecto completo de esta línea correspondiente a 78.0 dBA.

Para esta línea sólo se encontraron tres segmentos que presentan valores de L_{eq} superiores al calculado para toda la línea, siendo la estación Instituto del Petróleo la más alta con un L_{eq} de 80.7, seguida por los segmentos de El Rosario-Tezozómoc, Tezozómoc – Azcapotzalco, los cuales representan puntos críticos de exposición a ruido en esta línea, dichos segmentos se encuentran en tramos subterráneos lo cual puede influir en dicha exposición. Sin embargo, la mayoría de los niveles sonoros equivalentes calculados para los segmentos de esta línea se encuentran cercanos al L_{eq} calculado para la línea completa. En tanto que el L_{eq} más bajo para la Línea 6 del STC Metro, se presentó en la estación Ferrería con un valor de 70.0 dBA.

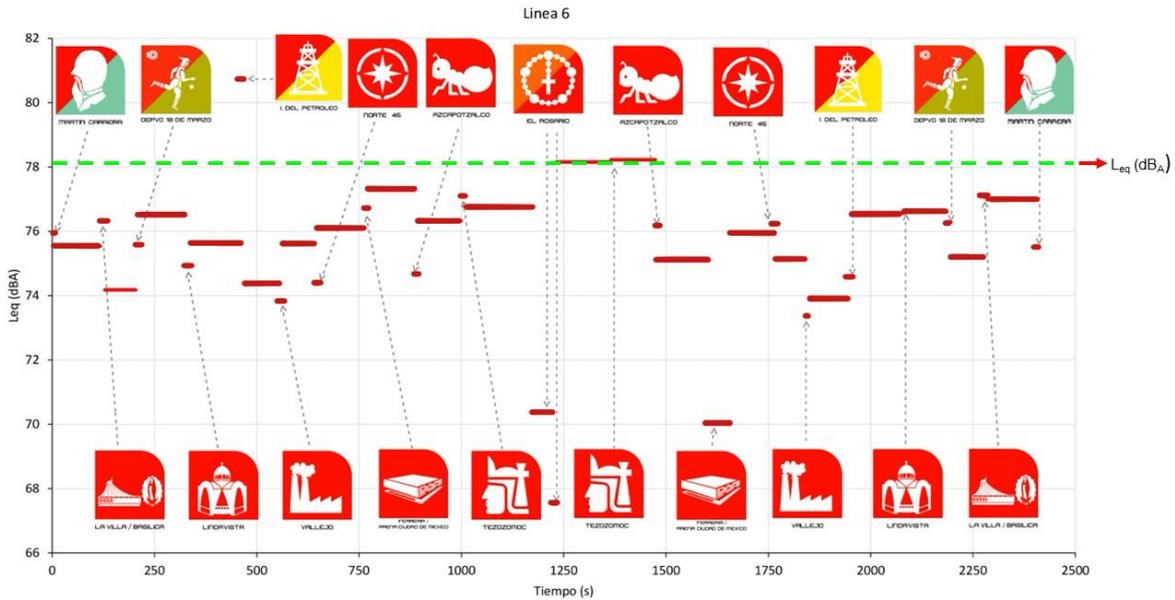


Figura 8. Niveles sonoros equivalentes calculados en la Línea 6 del STC Metro para la ruta Martín Carrera – El Rosario – El Rosario – Martín Carrera y sus segmentos

En la Figura 9 se presentan los niveles sonoros equivalentes calculados para los segmentos de la Línea 9 en los trayectos Tacubaya – Pantitlán y Pantitlán – Tacubaya, así como el Leq para el trayecto completo de la línea, el cual es presentado con una línea roja punteada, correspondiéndole un valor de 75.9 dBA.

En esta línea sólo se cuantificaron ocho segmentos por arriba del Leq para el trayecto completo, es decir, por encima de los 75.9 dBA, el nivel sonoro equivalente más alto le pertenece al segmento de Tacubaya – Patriotismo (83.6 dBA). El segmento anterior, junto con los segmentos Patriotismo – Chilpancingo, Chilpancingo (estación), Chilpancingo – Centro Médico, Centro Médico – Lázaro Cárdenas, Lázaro Cárdenas – Chabacano, Jamaica – Mixiuhca, Mixiuhca – Velódromo representan los puntos críticos de esta línea en materia de exposición a ruido, destacando que estos segmentos se encuentran en tramos subterráneos de la línea.

El nivel sonoro equivalente más bajo se observó en el segmento que corresponde a la estación Chabacano de la segunda parte del trayecto con 65.4 dBA, este segmento también es subterráneo. A pesar de que este valor es el menor se observó que para los segmentos

que se encuentran en tramos elevados, los valores de L_{eq} calculados son menores respecto a los subterráneos pues los de estos se ven incrementados en este tipo de tramos.

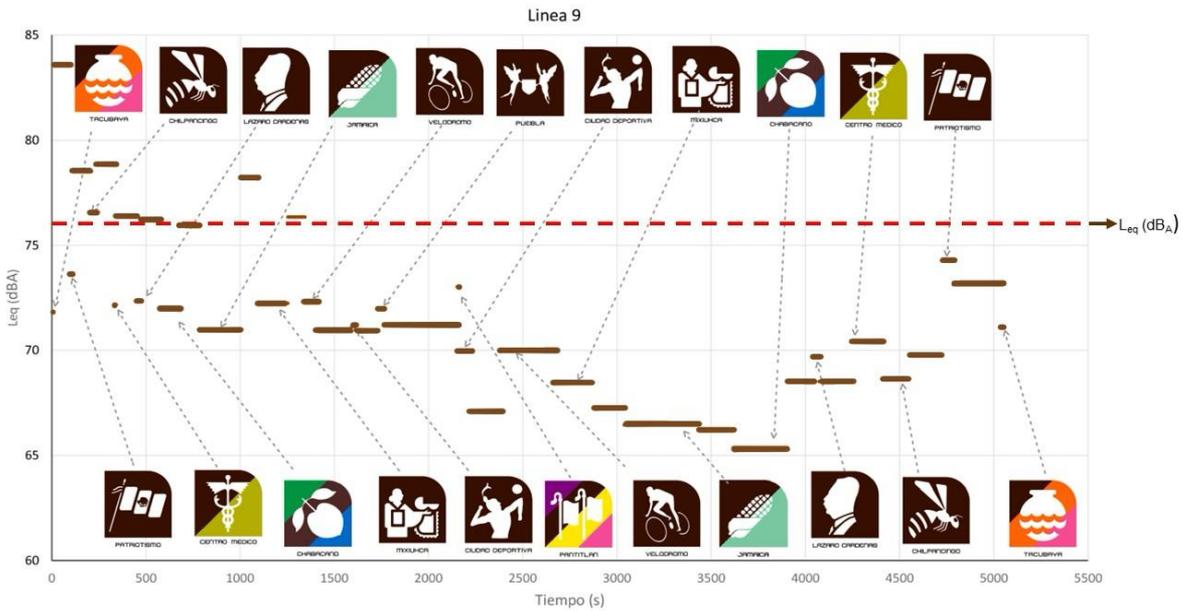


Figura 9. Niveles sonoros equivalentes calculados en la Línea 9 del STC Metro para la ruta Tacubaya – Pantitlán – Pantitlán - Tacubaya y sus segmentos.

En la Figura 10 se muestran los cálculos correspondientes a los niveles sonoros equivalentes para la Línea 12 del STC Metro, tanto para el trayecto completo de la Línea como para los segmentos de esta para las dos partes del trayecto correspondiente a Mixcoac – Periférico Oriente y Periférico Oriente – Mixcoac, destacando que las mediciones se realizaron hasta la estación terminal provisional Periférico Oriente debido a que el resto de la línea se encontraba en reparaciones a causa del accidente ocurrido en 2021, en el cual se desplomó el tramo Olivos – Tezonco.

El nivel sonoro equivalente calculado para la Línea 12 está representado en la figura antes mencionada por la línea punteada de color rojo, resultando un valor de 77.5 dBA. Tras realizar los cálculos para obtener los L_{eq} para cada segmento de dicha línea se observaron cinco segmentos que superan el L_{eq} para la línea completa (Zapata – Parque de los Venados, Parque de los Venados – Eje Central, Mexicaltzingo – Atlalilco, Ermita – Eje Central y Eje Central – Parque de los Venados), los cuales corresponden a tramos subterráneos dentro de la línea. El segmento que presentó el valor más alto de L_{eq} (85.1

dBA) resultó ser Parque de los Venados – Eje Central de la primera parte del trayecto completo de esta línea.

El L_{eq} más bajo para la Línea 12 se presentó en el segmento de la estación terminal provisional Periférico Oriente en la primera parte del trayecto completo con 65.9 dBA, resaltando que esta estación se encuentra dentro de los tramos elevados de la línea. Respecto al tipo de línea se pudo observar que los L_{eq} para los segmentos dentro del tramo elevado presentaron valores inferiores respecto a los segmentos en el tramo subterráneo, pues los correspondientes a este último mencionado se encuentran mayormente cercanos al L_{eq} de la línea completa.

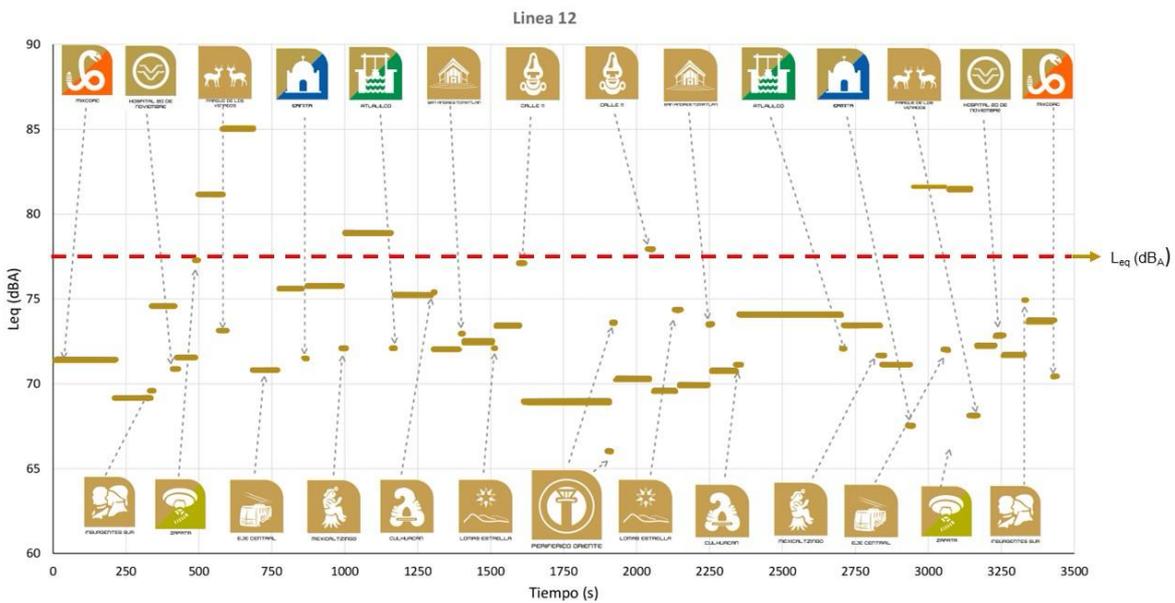


Figura 10. Niveles sonoros equivalentes calculados en la Línea 12 del STC Metro para la ruta Mixcoac – Periférico Oriente – Periférico Oriente – Mixcoac y sus segmentos

Se realizó una comparación entre las cinco líneas medidas de sus niveles de ruido máximos (L_{Amax}) y mínimos (L_{Amin}) medidos, así como de los niveles sonoros equivalentes calculados (L_{eq}) para cada una de estas, los cuales se presentan en la Figura 11. El L_{Amax} para cada línea se ve representado por los rombos de color rojo, el L_{Amin} por los puntos de color azul y el L_{eq} por la línea color naranja. Se pudo observar que el nivel sonoro más alto medido se presentó en la Línea 12 (97.9 dBA). Mientras que el L_{Amin} se presentó en la línea 4 (50.0 dBA). Los niveles sonoros equivalentes se calcularon para el recorrido completo de

las cinco líneas, es decir, en viaje redondo, estos valores oscilan desde los 72 dBA hasta los 78 dBA, resaltando que la línea 6 fue la que presentó el L_{eq} más alto (78.0 dBA).

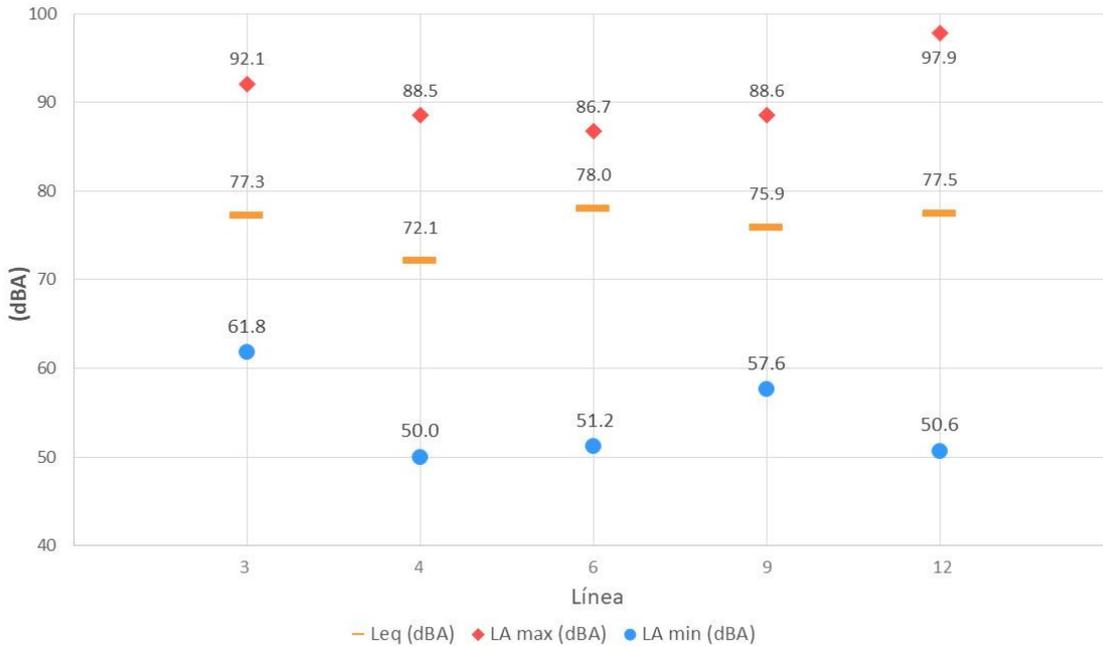


Figura 11. Comparación de nivel sonoro equivalente calculado (L_{eq}), nivel sonoro máximo (L_{Amax}) y el nivel sonoro mínimo (L_{Amin}) para las cinco líneas medidas del STC Metro

4.2. Comparación de la exposición personal a ruido entre días de la semana

Se realizó una gráfica donde se presentan los niveles sonoros equivalentes calculados para cada tipo de día para las cinco líneas medidas. La Figura 12 muestra la comparación entre los días laborales (línea azul), feriados (línea verde) y de fin de semana (amarillo), para las líneas 3, 6 y 9 se pudo observar que los niveles sonoros equivalentes son más altos en días feriados, superando los 78 dBA, esto se puede deber a que no hay ruido de fondo que interfiera o afecte los resultados en la realización de las mediciones de ruido en comparación con los días de fin de semana o laborales, estos últimos resultaron ser los más bajos para estas tres líneas.

Mientras que para las líneas 4 y 12, en los días laborales ocurrió lo contrario pues los niveles sonoros equivalentes resultaron ser los más altos con 72.4 y 78.3 dBA, respectivamente. La Línea 4 no presentó diferencia en el cálculo de los Leq para los días feriados y de fin de semana pues ambos tipos de día presentaron un valor de 71.7 dBA. La Línea 12 presenta un comportamiento diferente al resto de las líneas pues el Leq más bajo correspondió a los días de fin de semana con un valor de 75.0 dBA, seguido por los días feriados con 76.7 dBA.

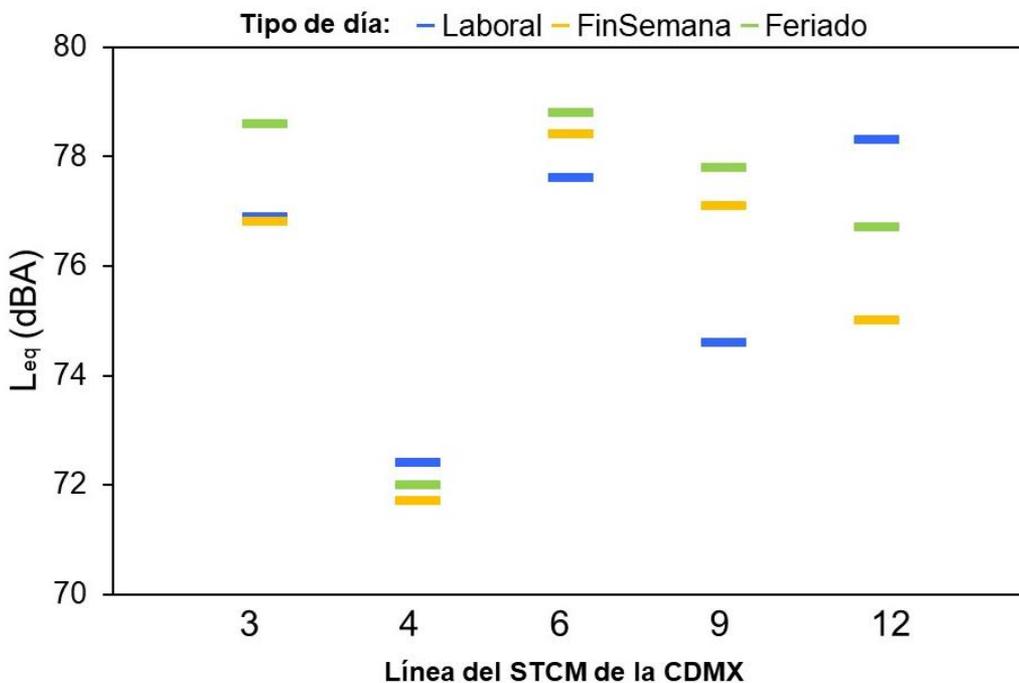


Figura 12. Comparación de los niveles sonoros equivalentes calculados para días laborales, feriados y de fin de semana en que se realizaron mediciones de la exposición personal a ruido en las cinco líneas seleccionadas del STC Metro

4.3. Comparación de la exposición de ruido en andenes y estaciones

En la Figura 13, se muestra la gráfica realizada para los datos obtenidos tras las mediciones (L_{Amax} y L_{Amin}), y calculados (L_{eq}) los cuales corresponden a los rombos rojos, puntos azules y líneas negras, respectivamente, en las estaciones del STC Metro para andenes y vagones a la apertura de las puertas de los trenes. Mientras que las líneas punteadas representan la división entre los resultados para cada línea.

Se observó que los niveles sonoros máximos medidos y los niveles sonoros equivalentes son mayores en andenes que en las estaciones dentro de los vagones. Sin embargo, para los datos obtenidos de niveles sonoros mínimos los valores más bajos también corresponden a las mediciones realizadas en andenes.

Destacando que el nivel sonoro máximo L_{Amax} medido corresponde a la Línea 3 en andén, en el cual se obtuvo un valor de 102.4 dBA, mientras que los L_{Amax} para el resto de las líneas oscilan entre los 89 dBA y los 92 dBA, los cuales representan picos de exposición o ruido impulsivo representando valores críticos puntuales. El nivel sonoro mínimo medido se registró en la Línea 6 también medido en andén (44.1 dBA), siendo esta línea la que presenta una menor diferencia entre vagones y andenes, esto puede ser debido a que toda la línea a excepción de una terminal es subterránea y su trayecto es recto.

Los niveles sonoros equivalentes para ambos casos oscilan entre los 68.8 dBA (Línea 4 en vagón) hasta los 77.9 dBA (Línea 3 en andén). Destacando, como se mencionó anteriormente, que los valores son mayores en andenes que dentro de los vagones para todas las líneas medidas.

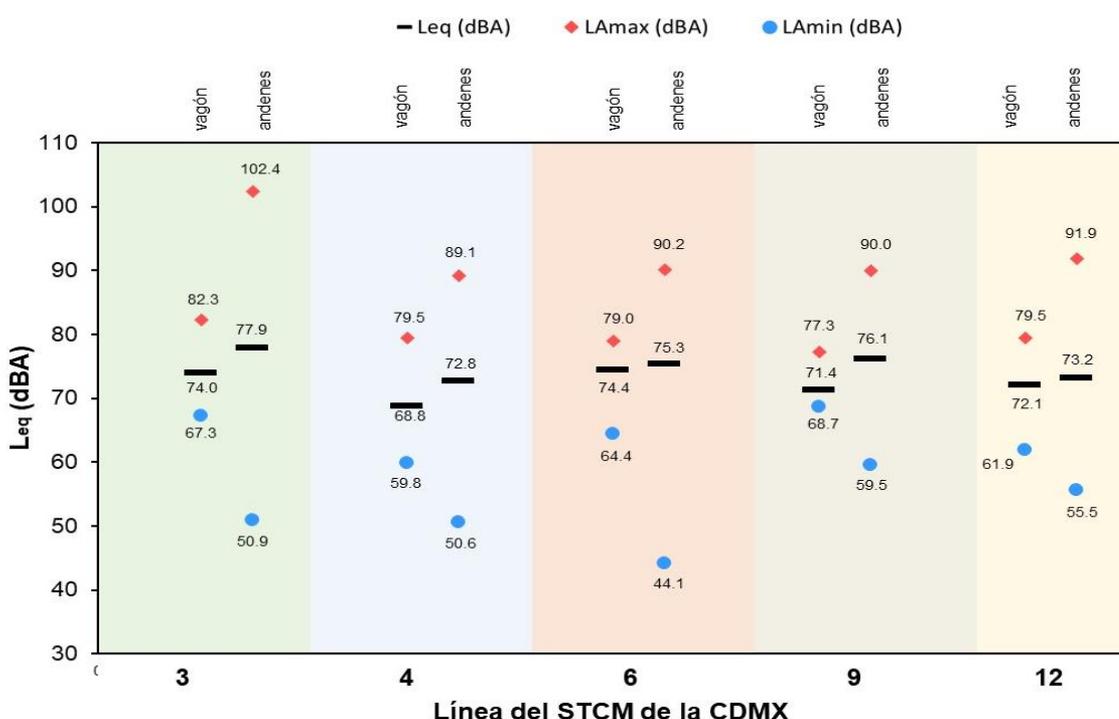


Figura 13. Comparación de la exposición a ruido (Leq, LAmin y LAmax) determinada en andenes y estaciones para cada una de las líneas en que se realizó muestreo del STC Metro de la Ciudad de México

V. DISCUSIÓN

5.1. Mediciones realizadas en vagón

De acuerdo con las mediciones realizadas en las cinco líneas del STC Metro, se determinó que el 1.39 % de los niveles de ruido superan los 85 dB. Es de resaltar que los picos de exposición con valores superiores a 85 dB, conocido como ruido impulsivo, puede exponer a los individuos a un riesgo mayor de sufrir pérdida de audición, incluso tratándose de pocos segundos de exposición (Clifford et al, 2009). Más aún, en el presente estudio se determinó que el 0.17 % de las mediciones son mayores o iguales a 90 dB, pero solo dos mediciones superiores a los 100 dB durante la campaña de muestreo. En la Ciudad de México el promedio de viaje diario en el STC Metro es de 85 minutos (Hernández-Paniagua et al., 2023), lo que representa un riesgo a potencial largo plazo para el sistema auditivo (Yao et al, 2017).

Con los cálculos realizados para la determinación del nivel sonoro equivalente para cada línea medida en este proyecto se observó que la línea con mayor exposición a ruido durante su trayecto completo, es decir, viaje completo, corresponde a la Línea 6 (78.0 dBA), la cual únicamente cuenta con una estación superficial y el resto de estas son subterráneas. Este valor puede ser debido a que a distancia entre estaciones y tiempo de permanencia dentro de túneles es mayor en comparación con las otras líneas, como sucede con las Líneas 3 y 12, que la mayoría de sus segmentos en operación son subterráneos con valores de L_{eq} de 77.3 y 77.5 dBA, respectivamente. En los túneles el ruido emitido por los trenes que transitan es reflejado por el revestimiento de estos provocando un efecto de resonancia, es decir, potencializa la frecuencia sonora (PIARC, 2018). En contraste, los tramos superficiales y elevados permiten una mayor dispersión de las ondas sonoras al estar en ambientes abiertos o al aire libre (Flores, 1990), lo que coincide con los datos medidos y calculados en la línea 4.

Se ha reportado que los tramos con curvas en su diseño presentan los niveles más altos de ruido en comparación con los segmentos rectos (Shah et al., 2017), lo que coincide con el comportamiento observado en trayectos de la línea 3 (La Raza-Potrero) y línea 12 (Zapata-Parque de los Venados). Esto puede confirmar que el diseño de las líneas influye de forma significativa sobre la potencialización del ruido emitido en secciones específicas de las líneas monitoreadas. Como una medida de mitigación de los efectos de los túneles

sobre los niveles de exposición a ruido en las diferentes líneas del STC Metro, se ha sugerido que las paredes de estos sean revestidas con materiales fonoabsorbentes, además reemplazar el balastro existente por asfalto fonoabsorbente, principalmente en tramos subterráneos e instalaciones cerradas (Quevedo, 2003). Otro factor que impacta la exposición a ruido dentro de los vagones del STC Metro es la afluencia dentro de estos, pues los cuerpos de los usuarios funcionan como cuerpos de atenuación de ruido, absorbiendo las ondas e impidiendo su dispersión dentro del espacio donde se emite este contaminante (PAOT, 2009). Este comportamiento fue observado en el presente estudio en los días no laborales cuando se observaron mayoritariamente mayores exposiciones a ruido que en días laborales, debido a una menor atenuación de este causado por un menor número de usuarios.

5.2. Comparación de las mediciones realizadas en estaciones

En las líneas estudiadas los andenes son los sitios del STC Metro en donde ocurre la mayor exposición a ruido, pues los valores de niveles sonoros equivalentes son mayores respecto a los valores calculados para las estaciones dentro de los vagones con puertas abiertas en estas. Los niveles de ruido en andenes son impactados por factores como i) el uso de silbatos y altavoces, ii) la ausencia o presencia de trenes en las estaciones, iii) la afluencia de usuarios en los andenes y, iv) la realización de operativos policiales dentro de las instalaciones.

Es importante destacar que la Línea 3 mostró la mayor diferencia para las mediciones realizadas en andenes y vagones, con máximos de hasta 102.4 y 82.3 dBA, respectivamente, así como los valores obtenidos tras el cálculo del L_{eq} (74.0 y 77.9 dBA). Estos valores de $L_{Amáx}$ y L_{Amin} representan picos de exposición que podrían provocar daños al sistema auditivo de los usuarios (Clifford et al., 2009), sobre todo si la exposición ocurre de forma crónica. El valor máximo puntual en un andén corresponde a la línea 3, siendo también el mayor de toda la base de datos recolectada en este proyecto, de igual forma presenta el L_{eq} calculado más alto para andenes. La configuración de las estaciones mostró ser un factor menos relevante en la exposición a ruido que la geometría y tipo de segmentos entre estaciones, ya que, a pesar de ser impactadas mayormente por el ruido emitido por el tráfico vehicular, aéreo y de comercio, los niveles medidos fueron menores que en estaciones subterráneas en las cuales se genera ruido in situ.

5.3. Comparación con estudios existentes

A pesar de la relevancia de la exposición a ruido que experimentan diariamente los usuarios de sistemas de transportes de metro a nivel mundial, son escasos los estudios que han abordado este problema a la fecha. No obstante, los pocos reportes existentes, los resultados obtenidos en el presente proyecto son consistentes con los reportados en otras áreas urbanas alrededor del mundo (Tabla 9). Globalmente, destaca que el metro es uno de los transportes que emite mayor contaminación acústica, y por consecuencia, somete a los individuos que se encuentran dentro de sus instalaciones incluyendo andenes, trenes y estaciones. Por ejemplo, en la ciudad de Nueva York, Robyn et al. (2006) comparó los niveles de ruido en el metro dentro de vagones y estaciones con paradas de autobús, observando que los niveles de ruido máximos ($L_{Amáx}$) se presentaron en andenes (106 dBA) y dentro de los vagones (112 dBA). Similarmente, la exposición a ruido en el metro de Toronto, Canadá, fue la mayor de diferentes medios de transporte, presentando altos valores de ruido impulsivo con picos de hasta 109.8 dBA ($L_{Amáx}$).

Tabla 10. Estudios existentes realizado alrededor del mundo sobre exposición a ruido ambiental en metro

No.	Autor artículo	Ciudad/Estado	País	Año medición
1	Robyn et al, 2006	Nueva York	EE.UU.	2005
2	Singh et al, 2020	Londres	Inglaterra	2006-2019
3	Informe PAOT, 2009	Ciudad de México	México	2009
4	Tabacchi et al, 2011	Madrid	España	2010
5	Yao et al, 2017	Toronto	Canadá	2016
6	Ravi et al, 2016	Nueva York	EE.UU.	2016

Niveles de exposición a ruido, incluyendo picos, similares a los medidos en el STC Metro fueron reportados para el metro de Londres, Inglaterra, por Singh et al. (2020) cuando realizaron muestreos en 2006, 2018 y 2019. De forma general mediciones que superan 80 dB, con picos de hasta 100 dBA ($L_{Amáx}$), fueron reportados durante los muestreos que ellos realizaron y evidencian una exposición significativa a ruido en este transporte. En Madrid, un estudio realizado por Tabacchi et al. (2011) de la exposición a ruido durante el traslado en el metro reportó un valor de L_{eq} de 72.8 dBA, el cual es de forma general menor a los determinados en la Ciudad de México. Valores como los reportados en el metro de Madrid no representan un peligro elevado, y pueden servir para obtener información tecnológica y

de infraestructura, que apoye el diseño de estrategias y políticas con el objeto de mitigar la exposición a ruido y las afectaciones a la salud auditiva de usuarios y trabajadores de este transporte. Por ejemplo, guías de diseño de estaciones, pueden ser obtenidas de estudios similares, ya que, por ejemplo, Shah et al. (2016), que monitorearon ruido en el metro de Nueva York, E.U.A., identificaron que las estaciones con diseño curvo presentan valores superiores de exposición a ruido respecto a las estaciones con diseño recto.

5.4. Normatividad y riesgo

La legislación mexicana solo contempla i) los límites máximos permisibles de emisión de ruido de fuentes fijas y ii) la exposición de trabajadores a ruido estable, inestable o impulsivo durante el ejercicio de sus labores.

En cuanto a la emisión de ruido de fuentes fijas, la NOM-011-STPS-2001 establece que los límites máximos permisibles de exposición de los trabajadores a ruido estable, inestable o impulsivo durante una jornada de 8 horas no debe superar un LAeq igual a 90 dB en dicho periodo. Se realizó el cálculo del Tiempo Máximo Permissible de Exposición (TMPE) para conocer si los trayectos completos de las líneas medidas incumplen con la norma antes mencionada (Anexo II). De acuerdo con los resultados de este cálculo, al ser todos los valores de TMPE negativos, se determinó que para ninguno de estos recorridos se incumple dicha norma. Sin embargo, según los datos reportados en el presente proyecto, los trabajadores del STC Metro se encuentran expuestos a picos de ruido que pueden superar los 100 dB. Aunque estos valores no son continuos, podrían representar un riesgo para la salud a largo plazo, por lo que es recomendable que todo el personal que labora en instalaciones del STC Metro haga uso de equipo de seguridad que proteja el sistema auditivo.

Por otro lado, los niveles sonoros equivalentes calculados para la estadía dentro de los vagones en el presente estudio a los que están expuestos los usuarios y trabajadores del STC Metro, exceden hasta por 12 dBA la NADF-005-AMBT-2013, la cual se utilizó como referencia para este proyecto, que establece 65 dBA como valor máximo de exposición (L_{eq}) en un horario de 06:00 a 20:00 horas, generados por fuentes emisoras ubicadas dentro de la Ciudad de México.

Tomando únicamente como referencia la NOM-080-ECOL-1994 para la comparación de los valores obtenidos en este trabajo, pues los trenes del STC Metro pertenecen al grupo

de vehículos que transitan por rieles y no cuentan con escape. Considerando que el peso bruto vehicular del tren neumático a 4/4 de carga (70 kg/pasajero) es de 40,800 kg y del tren férreo a 4/4 de carga 33,511 kg (METRO CDMX,2008), no se infringiría dicha norma pues los niveles pues, ninguna corrida presentó valores superiores a los 99 dB(A) en dos mediciones consecutivas para realizar el promedio algorítmico que se establece en dicha norma.

VI. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se determinó la exposición a ruido ambiental en cinco líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro en la Zona Metropolitana del Valle de México. Esta determinación se llevó a cabo mediante el cálculo del nivel sonoro equivalente para las cinco líneas y se observaron los niveles de ruido máximos medidos y los niveles de ruido mínimos medidos. Respecto a los valores obtenidos de L_{eq} para estas líneas, no se incumple la NOM-081-SEMARNAT-1994 en ningún caso.

Sin embargo, picos superiores a 85 dB ($L_{Amáx}$), que corresponden a ruido impulsivo, representaron el 1.39 % de las mediciones obtenidas. Estos picos de exposición resaltaron en túneles en los tramos subterráneos que generan un efecto de resonancia, potencializando la frecuencia sonora y se explican por el diseño de las líneas del metro. Factores como la afluencia dentro de los vagones y en los andenes, el diseño de las instalaciones, la presencia de elementos de seguridad y los silbatos de estos, y el desplazamiento de los trenes también impactaron los niveles medidos de ruido.

La exposición a ruido dentro de los vagones estuvo influenciada por la afluencia de usuarios, ya que los cuerpos de los usuarios reducen la dispersión de ondas sonoras dentro del espacio donde se emite el ruido, conllevando a una disminución de los niveles de presión sonora. La comparación de los niveles sonoros equivalentes en andenes y cuando los vagones se encontraban con las puertas abiertas en estaciones mostró que los usuarios están más expuestos durante se estadía en andenes, lo cual es claramente evidente en los resultados correspondientes a la Línea 3.

La comparación de los niveles sonoros equivalentes en este proyecto contra la Norma Ambiental aplicable NADF-005-AMBT-2013 que establece como límite el valor de 65 dB en un horario de 6:00 a 20:00 h, mostró que la exposición dentro de vagones del STC Metro puede encontrarse excediendo dicho límite dentro de ese horario, superando dicho límite hasta por 12 dBA. Sin embargo, es necesario realizar mediciones de ruido ambiental en otros horarios para confirmar dicho comportamiento a lo largo del día.

Los resultados obtenidos en el presente proyecto mostraron que los usuarios y trabajadores del STC Metro están ligeramente expuestos a contaminación acústica en dicho

ambiente, principalmente por el ruido impulsivo. Sin embargo, no se considera que la esta exposición sea de alto riesgo para la salud de los usuarios y trabajadores.

Como recomendación, esta ligera exposición debe ser considerada ya que, de no atender esta situación, podría llegar a comprometer el bienestar de estos, afectando a una gran parte de la población de usuarios debido a la alta demanda diaria de este medio de transporte. La información reportada en este trabajo sugiere que futuros estudios de contaminación acústica deben ser realizados en otros sistemas de transporte.

En la actualidad, las autoridades de nuestra ciudad se encuentran en la labor de regular, controlar y mitigar las emisiones de ruido generadas por distintos tipos de fuentes, ya sean fijas o móviles, de acuerdo con la Ley Ambiental de Protección a la Tierra en la Ciudad de México.

Finalmente, es deseable la expedición de normas que regulen los métodos de medición y los límites máximos permisibles a que están expuestos los usuarios de sistemas de transporte público, específicamente en el Sistema de Transporte Colectivo Metro.

VII. REFERENCIAS

- Alfie Cohen, Miriam, & Salinas Castillo, Osvaldo. (2017). Ruido en la ciudad. Contaminación auditiva y ciudad caminable. *Estudios demográficos y urbanos*, 32(1), 65-96. Recuperado en 29 de noviembre de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-72102017000100065&lng=es&tlng=es.
- Amable Álvarez, I., Méndez Martínez, J., Delgado Pérez, L., Acebo Figueroa, F., de Armas Mestre, J., & Rivero Llop, M. L. (2017). *Contaminación ambiental por ruido*. Revista Médica Electrónica, 39(3), 640-649.
- Apparicio, P., Gelb, J., Negro-Poblete, P., Carrier, M., Potvin, S., & Lesage-Mann, E. (2020). *Cyclists' exposure to air pollution and noise in Mexico City-Contribution of real-time traffic density indicators integrated into GIS*. Revue internationale de géomatique, 30(3-4), 155-179.
- Apparicio, P., Gelb, J., Carrier, M., Mathieu, M. È., & Kingham, S. (2018). Exposure to noise and air pollution by mode of transportation during rush hours in Montreal. *Journal of Transport Geography*, 70, 182-192.
- Audiotech. (2023). Relación entre pérdida auditiva y contaminación acústica en las ciudades. Instituto Audiológico Audiotech. [Blog virtual]. Recuperado el 6 de diciembre de 2023 de <https://audiotech.com.mx/relacion-entre-perdida-auditiva-y-contaminacion-acustica-en-las-ciudades/#:~:text=La%20Ciudad%20de%20M%C3%A9xico%20se,ciudades%20m%C3%A1s%20ruidosas%20del%20mundo>.
- Berglund, B., Lindvall, T., Schwela, D. H., & World Health Organization. (1999). *Guidelines for community noise*.
- Brüel & Kjaer. (2018). *¿Qué es un sonómetro?* HKB Company. Sitio web. Recuperado el 5 de diciembre de 2023 de <https://www.bksv.com/es/knowledge/blog/sound/what-is-a-sound-level-meter>
- Campos, J. M., (2007). *Hacia un Subsistema de Gestión Ambiental de Calidad Acústica Urbana: Bases generales para su diseño (I)*. Economía y Desarrollo, 142(2), 205-243.
- Canaria, G. (2004). *La contaminación acústica*. Blog Ecologistas en Acción. Recuperado el 9 de mayo de 2023 de <https://www.ecologistasenaccion.org/5350/la-contaminacion-acustica/>

- Capital 21 Web. (2021). Servicio de Medios Públicos: Congreso CDMX aprueba multar a quienes excedan límites de ruido. Recuperado el 21 de febrero de 2024 de <https://www.capital21.cdmx.gob.mx/noticias/?p=16072>
- Clark, C., Martín, R., Van Kempen, E., Alfred, T., Head, J., Davies, H. W., ... & Stansfeld, S. A. (2006). *Exposure-effect relations between aircraft and road traffic noise exposure at school and reading comprehension: the RANCH project*. American journal of epidemiology, 163(1), 27-37.
- Clifford, R. E., & Rogers, R. A. (2009). *Impulse noise: theoretical solutions to the quandary of cochlear protection*. Annals of Otology, Rhinology & Laryngology, 118(6), 417-427.
- Congreso de los Estados Unidos Mexicanos. (1988). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Capítulo 8, pp 76. Recuperada el 5 de diciembre de 2023 de <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>
- Flores, P. (1990). *Manual de Acústica, Ruido y Vibraciones, Fundamentos básicos y sistemas de control*. Tercera edición, Wavepulse Acoustics, 22-31. Gracey & Associates.
- (2013). Acoustic Glossary: Sound Level Frequency Weightings. Recuperado el 18 de mayo de 2023 de <https://acoustic-glossary.co.uk/frequency-weighting.htm#a-weighting>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2023). Ley Ambiental de Protección a la Tierra en la Ciudad de México. Recuperada el 21 de febrero de 2024 de <https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/index.php/leyes/leyes/117-ley-ambiental-de-proteccion-a-la-tierra-en-la-ciudad-#ley-ambiental-de-protecci%C3%B3n-a-la-tierra-en-la-ciudad-de-m%C3%A9xico>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2023). Sistema de Transporte Colectivo Metro: Inauguraciones y ampliaciones en orden cronológico. Recuperado el 31 de diciembre de 2023 de <https://www.metro.cdmx.gob.mx/cronologia-del-metro>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2023). Sistema de Transporte Colectivo Metro: Afluencia por estación por línea. Recuperado el 8 de mayo de 2023 de <https://metro.cdmx.gob.mx/operacion/mas-informacion/afluencia-de-estacion-por-linea>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2008). Sistema de Transporte Colectivo Metro: Características generales del material rodante. Recuperado el 21 de febrero de 2024 de <https://metro.cdmx.gob.mx/operacion/mas-informacion/material-rodante>
- Hedegaard, P. (1999). Frequency weightings and responses. Brüel & Kjær. Recuperado el 5 de diciembre de 2023 de http://www.conforg.fr/acoustics2008/cdrom/data/fa1999-berlin/FILES/PDF/3A/3ANSE_4.PDF

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2021). *Principales resultados Censo de Población y Vivienda 2020. Comunicado de Prensa, número 98/21*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Ciudad de México, México. Recuperado el 6 de diciembre de 2022 de https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/EstSociodemo/ResultadoCenso2020_CdMx.pdf
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2023). *Estadística de Transporte Urbano de Pasajeros, indicadores económicos de coyuntura*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Ciudad de México, México. Recuperado el 31 de diciembre de 2023 de https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/transporteurbano/doc/ETUP2023_09.pdf
- International Organization for Standardization. (1990). *Acoustics – Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment*. ISO 1999:1990. Genève, Suiza.
- Miyara, F. (s.f). Estimación del riesgo auditivo mediante la Norma Internacional ISO 1999. Blog digital de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario, Argentina. Recuperado el 27 de diciembre de 2023 de <https://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/iso1999.htm>
- Moroe, N., & Mabaso, P. (2022). *Quantifying traffic noise pollution levels: a cross-sectional survey in South Africa*. *Scientific Reports*, 12(1), 1-11.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). (2010). *Fact Sheets: Ruido*. Blog de la Organización Mundial de la Salud, Europa. Recuperado el 10 de mayo de 2023 de <https://www.who.int/europe/news-room/fact-sheets/item/noise>
- OMS (Organización Mundial de la Salud). (2022). *Salud auditiva*. Blog Organización Panamericana de la Salud. Recuperado el 8 de mayo de 2023 de <https://www.paho.org/es/temas/salud-auditiva>
- Palacios, I., Moreno, D. (2022). *Contaminación Ambiental*. *Revista Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento*. 93-103. Recuperado el 02 de octubre de 2023 de [https://doi.org/10.26820/recimundo/6.\(2\).abr.2022.93-103](https://doi.org/10.26820/recimundo/6.(2).abr.2022.93-103)
- Paniagua, I. Y. H., Muñoz, O. A., Pérez, I. R., García, O. A., Buendía, R. I. G., Ayala, G. L. A., & Jazcilevich, A. (2023). *Reduced commuter exposure to PM2.5 and PAHs in response to improved emission standards in bus rapid transit systems in Mexico*. *Environmental Pollution*, 335, 122236.

- PAOT (Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial). (2009). Evaluación de ruido generado por la construcción de la Línea 12 del SCT Metro. Informe. Recuperado el 18 de mayo de 2023 de http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/estudios/Medicion_Ruido_L12_MJZ_0_marzo_2009.pdf
- PIARC (Asociación Mundial de la Carretera). (2018). Manual de Túneles, Ruido y Vibraciones). Sitio web de la Asociación. Recuperado el 11 de enero de 2024 de <https://tunnelsmanual.piarc.org/es/explotacion-y-mantenimiento-aspectos-medioambientales/ruido-y-vibraciones>
- Platzer, U., Iñiguez, R., Cevo, J., Ayala, F. (2007) Environmental noise levels measurement of the city of Santiago, Chile. Artículo científico. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-48162007000200005>
- Quevedo, R. (2003). El ruido, un enemigo temible. Boletín, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Recuperado el 9 de mayo de 2023 de <https://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/rita.htm>
- Ruiz, D. (2003). *Sonómetros, sus especificaciones técnicas y su uso*. Blog en línea. Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada. Recuperado el 5 de diciembre de 2023 de <https://www.ruidos.org/Documentos/sonometros.html>
- Shah, R. R., Suen, J. J., Cellum, I. P., Spitzer, J. B., & Lalwani, A. K. (2017). The influence of subway station design on noise levels. *The Laryngoscope*, 127(5), 1169-1174.
- Sánchez, Y. G., & Díaz, Y. F. (2014). *Efectos de la contaminación sónica sobre la salud de estudiantes y docentes, en centros escolares*. *Revista cubana de Higiene y Epidemiología*, 52(3), 402-410.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2013). *Calidad del Aire: Una práctica de vida. Cuaderno digital de divulgación ambiental*. Ciudad de México, México. Recuperado el 7 de diciembre de 2022 de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001593.pdf>
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2017). *Descontaminación Acústica*. Blog de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, México. Recuperado el 6 de diciembre de 2022 de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/ssshhh-es-dia-mundial-de-la-descontaminacion-acustica?idiom=es>

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (1994) *Límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición* (NOM-081-SEMARNAT-1994). Acuerdo publicado el 3 de diciembre de 2013 en el Diario Oficial de la Federación.

Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. *NADF-005-AMBT-2006. Establece las condiciones de medición y los límites máximos permisibles de emisiones sonoras que deberán cumplir los responsables de fuentes emisoras ubicadas en el Distrito Federal*. Publicada en el Gaceta de Gobierno del Distrito Federal el 27 de septiembre de 2006.

Shapiro, S.S., Wilk, M.B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52, 591-611

Singh, T., Biggs, T., Crossley, E., Faoury, M., Mahmood, A., Salamat, A., & Brown, P. (2020). *Noise exposure on the London Underground, an observational study over a decade*. *The Laryngoscope*, 130(12), 2891-2895.

STPS (Secretaría de Trabajo y Previsión Social). (2001). *Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se genere ruido* (NOM-011-STPS-2001). Publicada el 17 de abril de 2002 en el Diario Oficial de la Federación.

Tabacchi, M., Pavón, I., Ausejo, M., Asensio, C., & Recuero, M. (2011). Assessment of noise exposure during commuting in the Madrid subway. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 8(9), 533-539.

TRB (Transportation Research Board). (2023). Diseño e implementación de un silenciador de túneles urbanos. Blog digital de National Academies: Sciences, Engineering, Medicine. Recuperado el 11 de enero de 2024 de <https://trid.trb.org/view/965374>

UAM (Universidad Autónoma Metropolitana). (2014). El ruido también contamina: doctor Fausto Rodríguez Manzo. [Blog universitario digital]. Recuperado el 6 de diciembre de 2023 de <https://alephuamazcapotzalco.wordpress.com/2014/10/01/el-ruido-tambien-contamina-doctor-fausto-rodriquez-manzo/>

Yao, C. M., Ma, A. K., Cushing, S. L., & Lin, V. Y. (2017). *Noise exposure while commuting in Toronto-a study of personal and public transportation in Toronto*. *Journal of Otolaryngology-Head & Neck Surgery*, 46(1), 1-8

VIII. ANEXOS

ANEXO I

Memoria de cálculo para nivel sonoro equivalente

Teniendo los niveles de presión sonora expresados en decibeles con ponderación A (dBA) y con ayuda de la siguiente ecuación (1) se calculó el nivel sonoro equivalente para todas las líneas, sus segmentos individuales y para los diferentes días de muestreo para conocer la exposición a ruido ambiental.

$$L_{eq} = 10 \log \sum_i^n 10^{\frac{L_i}{10}} \cdot t \dots\dots\dots (1)$$

Como ejemplo para este cálculo se utilizan los datos obtenidos en el segmento correspondiente a la estación Copilco de la Línea 3 dentro del vagón para la primera parte del trayecto de esta (Tabla 10),

Tabla 11. Niveles de presión sonora expresada en decibeles con ponderación A para la estación Copilco, Línea 3 STC Metro

Tiempo (s)	L _A (dB _A)
1	75.8
2	76.0
3	74.8
4	73.9
5	73.4
6	74.0
7	74.7
8	75.2
9	74.2
10	73.1
11	72.9

Tabla 12. Ejemplo memoria de cálculo del nivel sonoro equivalente para el segmento correspondiente a la estación Copilco de la Línea 3 del STC Metro.

Muestras Tiempo [s]	Muestras Tiempo [min]	Nivel Directo [dBA]	Intensidad $10^{Li/10}$	Suma $Sti \times 10^{Li/10}$	Media Int $[Sti \times 10^{Li/10}]/t$	Nivel Eq Leq [dBA]
1	0.017	75.8	38424126.2	38424126.2	38424126.2	75.85
2	0.033	76.0	39873650.7	78297776.9	39148888.45	75.93
3	0.050	74.8	30502328.92	108800105.8	36266701.94	75.60
4	0.067	73.9	24812070.13	133612175.9	33403043.99	75.24
5	0.083	73.4	21971615.99	155583791.9	31116758.39	74.93
6	0.100	74.0	25068653.06	180652445.0	30108740.83	74.79
7	0.117	74.7	29672217.24	210324662.2	30046380.32	74.78
8	0.133	75.2	32759932.63	243084594.9	30385574.36	74.83
9	0.150	74.2	26050616.17	269135211.0	29903912.34	74.76
10	0.167	73.1	20220179.19	289355390.2	28935539.02	74.61
11	0.183	72.9	19512728.42	308868118.7	28078919.88	74.48

Utilizando la ecuación antes mencionada se realizó el cálculo de forma segmentada como se muestra a continuación (Tabla 11), destacando que el valor resaltado en color amarillo representa el L_{eq} para dicho segmento.

ANEXO II

Memoria de cálculo para el tiempo máximo permisible de exposición

Se realizó el cálculo del tiempo máximo permisible de exposición (TMPE) con el nivel de exposición a ruido (NER) para el trayecto completo de cada línea, así como para la estadía dentro de las estaciones en vagón y andenes por medio de la Ecuación 2.

$$TMPE = \frac{8}{2^{\frac{NER-90}{3}}} \dots \dots \dots (2)$$

A continuación, se muestra como ejemplo el cálculo del TMPE para los trayectos completos de cada línea en la Tabla 12.

Tabla 13. Ejemplo memoria de cálculo del tiempo máximo permisible de exposición para los trayectos completos de las líneas medidas del STC Metro

Línea	L _{eq} (dBA)	TMPE
3	77.26	-0.94
4	72.13	-0.67
6	78.03	-1.00
9	75.89	-0.85
12	77.48	-0.96