

"AUNAR ESFUERZOS PARA LA GENERACIÓN DE INVESTIGACIÓN APLICADA PARA EL DESARROLLO DE METODOLOGÍAS Y LINEAMIENTOS PARA LA ZONIFICACIÓN ACÚSTICA, ASÍ COMO LA CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL PARQUE AUTOMOTOR QUE PERMITA FORTALECER LA GESTIÓN DE RUIDO Y AVANZAR EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE ACCIÓN PARA LA PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN POR RUIDO DEL VALLE DE ABURRÁ"

INFORME FINAL

Convenio Especial de Cooperación, celebrado entre El Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Universidad de San Buenaventura Medellín.

Medellín, 30 de diciembre de 2021





AUNAR ESFUERZOS PARA LA GENERACIÓN DE INVESTIGACIÓN APLICADA PARA EL DESARROLLO DE METODOLOGÍAS Y LINEAMIENTOS PARA LA ZONIFICACIÓN ACÚSTICA, ASÍ COMO LA CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL PARQUE AUTOMOTOR QUE PERMITA FORTALECER LA GESTIÓN DE RUIDO Y AVANZAR EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE ACCIÓN PARA LA PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN POR RUIDO DEL VALLE DE ABURRÁ

Un convenio del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Universidad de San Buenaventura

Juan David Palacio Cardona, Director del Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Diana Maria Montoya Velilla, Subdirectora Ambiental del Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Fray Luis Fernando Benítez Arias O.F.M Rector de la Universidad de San Buenaventura Medellín.

Equipo de trabajo

Diego Mauricio Murillo Gómez, Director del Proyecto

Jonathan Ochoa Villegas, Asistente dirección del Proyecto;

Luis Alberto Tafur Jiménez, Ingeniero líder

Helena Pérez Garcés, Ingeniera líder

Andres Felipe Montoya Flórez, Ingeniero líder

Luis Esteban Gómez Cadavid, Ingeniero líder

Jehny Marcela Martínez Castañeda, Ingeniera técnico Administrativa

Hernán Alejandro Acosta, Ingeniero técnico administrativo

David Andrés Mejía Chaves, Ingeniero técnico

Juan David Yarce Vergara, Ingeniero técnico

Oscar Fabian Zemanate Silva, Ingeniero técnico

Paulina Higuita Caro, Ingeniero técnico

Sebastián Carvalho Salazar, Ingeniero técnico





Daniela Villegas Echeverri, Ingeniero técnico
Alejandro Gómez Echavarría, Ingeniero técnico
Susana Arias Arboleda, Auxiliar de procesamiento de datos
Eloísa Arcila Fernández, Ingeniera de sonido Paisaje Sonoro
Santiago Arenas Moya, Ingeniero de apoyo proceso de calidad

Profesionales de apoyo a la gestión administrativa Sergio Andrés Rodríguez, Coordinador Contratación Pública Liliana María Roldan, Analista de Costos y Presupuestos.

Supervisión Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Diana Catalina Hoyos Giraldo, Profesional Universitario Enrique Raul Córdoba Castro, apoyo a la supervisión. David Mejía Ocampo, apoyo a la supervisión.





INT	RODUCCIÓN	. 11
CARAC	TERIZACIÓN VEHICULAR	12
1. acú	Definir los procedimientos de medición requeridos para la caracterización de la emi astica vehicular	
	1.1 Estado del arte relacionado con la caracterización de la emisión de ruido en vehículos y fact que la afectan	
	1. Factores que influyen en la emisión de ruido de vehículos de carretera y su caracteriza 14 1.1 Fuentes principales de ruido en un vehículo	ación 14 14 16 16 16 18 19 21 22 24 r ISO
	2.2.1Influencia de las fuentes principales en el ruido de paso	
	 2.2.2Medición del ruido de paso según el estándar ISO 362 2.2.3Medición de la influencia de la carretera en el ruido del tráfico según el estándar ISO 1 31 	28 1819
	3. Metodología estadística para la toma de muestras	
	3.1 Tamaño de la muestra en algunos estudios	
	 3.2 Distribución del parque automotor del modelo LEAP en el valle de Aburrá 3.3 Distribución del parque automotor según base de datos de fuentes móviles del AMVA 4. Estado del arte 	36
	4.1 Legislación en torno a la emisión de ruido de vehículos de carretera	
	4.1.1Unión Europea y Reino Unido	
	4.1.2Estados Unidos	41
	4.1.3Latinoamérica	42
	4.2 Estudios en Colombia sobre emisión de ruido vehicular	
	4.3 Otros estudios en emisión de ruido vehicular	
	4.4 Emisión de ruido de vehículos de combustible alternativo	
	4.5 Tecnologías para la medición de ruido de vehículos	
	4.5.1Arreglos de micrófonos	
	4.5.2Sonda de velocidad de partícula p-u	
	4.6 Dosimetría	
	4.7 Modelación del ruido vehicular	
	5. Conclusiones.	
	1.2 Metodología toma de muestras	59 60





	6.1 Estado estacionario	
	6.2 Estado dinámico	60
2.	Caracterizar la emisión acústica de vehículos que se movilizan en el Valle de Aburrá	61
	2.1 Informe técnico de emisión de ruido de vehículos por categorías de acuerdo con su clasific	
	El documento incluye la evaluación bajo métodos estandarizados, resultados de la sonda tipo	PU y
	dosimetrías en conductores	
	1. Descripción de la muestra	
	1.1 Categorías según la masa de los vehículos	
	1.1.1Vehículos livianos	
	1.1.2Vehículos medianos	
	1.1.3Vehículos pesados	
	1.1.4Motos	
	1.2 Subcategorías	
	1.3 Categorías según el tipo de combustible	
	2. Mediciones de emisión de ruido	
	2.1 ANOVA para mediciones por categorías	
	2.1.1Supuesto de normalidad	
	2.1.2Supuesto de homogeneidad de varianza	
	2.1.3Prueba de hipótesis	
	2.2 Mediciones en estado estacionario	
	2.2.1Análisis por categorías	75
	2.2.2Análisis por subcategorías	
	2.2.3Análisis por tipo de combustible	79
	2.2.4Análisis por bandas de octava	80
	2.3 Mediciones en estado dinámico	
	2.3.1Análisis por categorías	
	2.3.2Análisis por subcategorías	
	2.3.3Análisis por tipo de combustible	
	2.3.4Análisis por bandas de octava	
	2.4 Mediciones para vehículos híbridos y eléctricos	
	3. Medición de la emisión de ruido según el estándar ISO 362	
	3.1 Procedimiento de medición para categoría M1	
	3.2 Caso de estudio para un Nissan Versa modelo 2013	
	4. Medición de dosimetría	
	4.1.1Propósito de la medición:	
	4.1.2Características de la medición	
	4.1.3Definiciones	
	4.1.4Procedimiento de medición	
	4.1.5Resultados	
	5. Caracterización Vehicular mediante Holografías acústicas con Sonda PU	104
	5.1 Propósito de la medición:	
	5.2 Características de la medición	104
	5.2.1Descripción del lugar de medición	104
	5.2.2Procedimiento de medición	
	5.3 Evaluación de vehículos	
	5.4 Conclusiones Generales	108



2.2

Lineamientos para la zonificación acústica y caracterización acústica del parque automotor.

Mapa de ruido automotor 2D en zona de estudio con los valores de emisión medidos para cada



	tipología	de vehículode	109
	2.3 F	Recopilación y análisis de la información relacionada sobre el parque automotor y	clasificación
	en el Va	lle de Aburrá y su asociación con las mediciones del parque automotor	111
	2.4 A	Análisis Aforos vehiculares registrados por SIMM y niveles de ruido registrado por es	staciones de
	Monitore	eo de Ruido SITA	125
3.	Poolizo	r una correctorización ecúctico de 10 (diez) euperficies de rededura un	ados on lo
		r una caracterización acústica de 10 (diez) superficies de rodadura usa a vial del Valle de Aburrá	
111116	aesii uctui d		
	1.	Introducción	
	6.	Metodología	
	6.1		
		P Diseño del protocolo	
		Medición del coeficiente de absorción de superficies de rodadura usados en la inf	
	vial del \	/alle de Aburrá	
	3.1.1	g	
	a.	Sistema de medición. Kit de impedancia y software Impedance	
		Resultados	
		S Selección de tramos viales	
		3.1Eliminación	
	6.3	3.2Priorización	
	a.	Punto 1: Pista de pruebas, Parqueadero Universidad de San Buenaventura, Bel 135	lo. (Flexible)
	b.	Punto 2: Hospital Mental (Flexible)	136
	C.	. Punto 3: Fabricato (Flexible)	137
	d.	Punto 4: Copacabana Haceb (Flexible)	138
	e.	Punto 5: Terminal del Norte (Segmento Rígido)	139
	f.	Punto 6: Autopista Sur Itagüí (Flexible)	140
	g.	Punto 7: Variante Caldas (Flexible)	141
	h.	Punto 8: Sabaneta (Flexible)	142
	i.	Punto 9: Viva Envigado (Flexible)	143
	j.	Punto 10: Carabobo (Flexible)	144
	k.	Punto 11: Palmas (Flexible)	145
	3.3 A	Análisis y discusión	146
CONCLU	SIONES		1.10
CONCLU	JIUNEJ		140





Figura 1. Posiciones de micrófono para las mediciones del vehículo en estado estacionario según la
norma ISO 5130
Figura 2. Dimensiones de la pista de pruebas para las mediciones de ruido de paso
Figura 3. Distribución del parque automotor Valle de Aburrá, año 2018
Figura 4. Distribución de los vehículos diésel de la muestra proporcionada por el AMVA
Figura 5. Distribución de los vehículos a gasolina de la muestra proporcionada por el AMVA 37
Figura 6. Distribución de las motocicletas según su cilindraje (muestra proporcionada por el AMVA
Size a 7 Disease le la cieta le contra de la cieta le cieta le contra de la cieta le cieta
Figura 7. Dimensiones de la pista de pruebas para la norma de emisión de ruido de vehículos en El
Figura 8. Distribución de la muestra de vehículos por categorías
Figura 9. Distribución de la muestra de vehículos por subcategorías.
Figura 10. Distribución del tipo de combustible según las categorías establecidas
Figura 11. Distribución de los vehículos según el año del modelo
Figura 12. Gráficos de probabilidad para las categorías en estado estacionario.
Figure 13. Gráficos de probabilidad para las categorías en estado dinámico
Figura 14. Comportamiento estadístico de los niveles obtenidos en mediciones en estado
estacionario
Figura 15. Histograma por categoría para mediciones en estado estacionario
Figura 16. Promedio aritmético por categorías para mediciones en estado estacionario
Figura 17. Comportamiento estadístico de los niveles obtenidos en mediciones en estado
estacionario por subcategorías
Figura 18. Comportamiento estadístico de los niveles por categorías (livianos y motos) y tipo de
combustible para mediciones en estado estacionario
Figura 19. Niveles promedio por banda de octava por categoría para las mediciones en estado
estacionario
Figura 20. Mediciones por bandas de octava para vehículos livianos en estado estacionario 8
Figura 21. Mediciones por bandas de octava para vehículos medianos en estado estacionario 82
Figura 22. Mediciones por bandas de octava para vehículos pesados en estado estacionario 83
Figura 23. Mediciones por bandas de octava para motos en estado estacionario 83
Figura 24. Comportamiento estadístico de los niveles obtenidos en las mediciones en estado
dinámico85
Figura 25. Histograma por categoría para mediciones en estado dinámico 86
Figura 26. Promedio aritmético por categorías para mediciones en estado dinámico
Figura 27. Comportamiento estadístico de los niveles obtenidos en mediciones en estado dinámico
por subcategorías88
Figura 28. Comportamiento estadístico de los niveles por categorías (livianos y motos) y tipo de
combustible para mediciones en estado dinámico.
Figura 29. Niveles promedio por banda de octava por categoría para las mediciones en estado
dinámico90
Figura 30. Mediciones por bandas de octava para vehículos livianos en estado dinámico 90
Figura 31. Mediciones por bandas de octava para vehículos medianos en estado dinámico 9
Figura 32. Mediciones por bandas de octava para vehículos pesados en estado dinámico 92
Figura 33 Mediciones por bandas de octava para motos en estado dinámico 92





Figura 34. Visualización del parqueadero de la Universidad de San Buenaventura sede Bello	98
Figura 35. Visualización del parqueadero de la Universidad de San Buenaventura sede Bello	. 105
Figura 36. Diagrama esquemático de conexión medición sonda PU.	. 106
Figura 37. Barrido horizontal y vertical con Sonda PU	. 106
Figura 38. Ejemplo, Holografías por bandas de frecuencia vehículo mediano	. 108
Figura 39. Impacto por ruido debido a vehículos livianos	
Figura 40. Impacto por ruido debido a vehículos Medianos	. 110
Figura 41. Impacto por ruido debido a vehículos Motocicletas	. 111
Figura 42. Potencia acústica en función de la velocidad por categorías, bajo condicione	
referencia.	
Figura 43. Representación de una fuente lineal en CNOSSOS.	. 118
Figura 44. Nivel de potencia de una fuente lineal.	. 118
Figura 45. Modelo del sitio de medición para pruebas en estado dinámico	. 121
Figura 46. Modelo	. 122
Figura 47. Cálculo del nivel de presión sonora	. 122
Figura 48. Niveles medidos en estado dinámico.	. 123
Figura 49. Representación del nivel de presión sonora máximo registrado en las mediciones	. 124
Figura 50. Modelo para estimación de ruido en avenida Guayabal	
Figura 51. Modelo para estimación de ruido en Avenida Regional	. 127
Figura 52. Configuración de la pistola de impedancia. Componentes. Tomado de [33]	. 132
Figura 53. Esquema de configuración para pruebas en campo libre. Adaptado de [7]	. 132
Figura 54. Diagrama de Conexión del Sistema Microflown (Pistola de Impedancia)	. 133
Figura 55. Punto 1: Universidad San Buenaventura Bello (6°19'52.0"N 75°34'08.2"W)	. 136
Figura 56. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en la pista de pruebas o	de la
Universidad de San Buenaventura Medellín	. 136
Figura 57. Punto 2: Hospital Mental (6°19'23.9"N 75°33'49.4"W)	. 137
Figura 58. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Bello cerca al Hospital Menta	
Antioquia	. 137
Figura 59. Punto 3: Fabricato (6°19'37.0"N 75°33'28.0"W)	. 138
Figura 60. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Bello en la glorieta de Fabrica	cato.
Figura 61. Punto 4: Copacabana Haceb (6°21'04.1"N 75°30'29.3"W)	. 139
Figura 62. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Copacabana en la autopista fr	rente
HACEB.	. 139
Figura 63. Punto 5: Terminal del Norte (6°16'33.0"N 75°34'13.1"W)	. 140
Figura 64. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Medellín en la Terminal del N	lorte.
	. 140
Figura 65. Punto 6: Autopista Sur Itagüí (6°09'48.0"N 75°36'47.9"W)	. 141
Figura 66. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Sabaneta, Autopista	Sur
(Cementerio Jardines Montesacro)	
Figura 67. Punto 7: Variante Caldas (6°08'28.2"N 75°37'55.9"W)	
Figura 68. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Variante a caldas	
Figura 69. Punto 8: Sabaneta (6°09'01.4"N 75°37'41.6"W)	





Figura 70. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Sabaneta en estación la Estre del Metro	
Figura 71. Punto 9: Viva Envigado (6°10'38.7"N 75°35'32.3"W)	
Figura 72. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Vía distribuidora a la altura de V	
Envigado	
Figura 73. Punto 10: Carabobo (6°14'29.4"N 75°34'21.8"W)	
Figura 74. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Medellín, Carabobo con	
huesos	
Figura 75. Punto 11: Palmas (6°13'54.4"N 75°33'57.2"W)	
Figura 76. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Medellín, vía las palmas 1	
	70
LISTA DE TABLAS	
Tabla 1. Calidad y temporalidad de la información priorizada	13
Tabla 2. Velocidades para la prueba de velocidad de la norma ISO 362 de las diferentes categor	ías
de vehículo	
Tabla 3. Tamaños de muestra en algunos estudios de ruido vehicular	
Tabla 4. Niveles límite estipulados en el reglamento 540/2014	
Tabla 5. Norma de emisión para vehículos medianos y pesados en EU	
Tabla 6. Niveles máximos estipulados en el decreto 7 de Chile, para vehículos livianos y mediar	
Tabla 7. Niveles máximos estipulados en el decreto 7 de Chile, para motocicletas	
Tabla 8. Niveles máximos de emisión para vehículos automotores según la norma NOM-079-ECC	
1994 (estado dinámico)	
Tabla 9. Niveles máximos de emisión para motocicletas según la norma NOM-082-ECOL-19	
(estado dinámico)	
Tabla 10. Niveles máximos de emisión para vehículos automotores según la norma NOM-080-ECC	
1994 (estado estacionario)	
Tabla 11. Niveles máximos de emisión para motocicletas según la norma NOM-082-ECOL-19	
(estado estacionario)	
Tabla 12. Número de vehículos según el tipo de combustible que usan	
Tabla 13. Cantidad de vehículos por tipología y categoría evaluada	
Tabla 14. Distribución de los vehículos medidos según año del modelo.	
Tabla 15. Resumen ANOVA	69
Tabla 16. Relación r para estacionario y dinámico	72
Tabla 17. Resumen ANOVA para mediciones en estado estacionario	
Tabla 18. Resumen ANOVA para mediciones en estado dinámico.	
Tabla 19. Prueba Shapiro-Wilk para mediciones en estado estacionario	
Tabla 20. Prueba Shapiro-Wilk para mediciones en estado dinámico	
Tabla 21. Niveles medidos en dBA en estado dinámico para híbridos y eléctricos	
Tabla 22. Valores para reportar en dBA según ISO 362.	
Tabla 23. Velocidad rotacional objetivo del motor para las diferentes categorías de vehículos	99
Tabla 24. Vehículos medidos	00
Tabla 25. Registro fotográfico	03





Tabla 26. vehiculos evaluados mediante tecnica de holografia acustica	107
Tabla 27. Categorías según CNOSSOS	112
Tabla 28. Nivel de presión sonora calculado asumiendo una fuente lineal infinita	120
Tabla 29. Niveles de potencia de la vía por categoría	121
Tabla 30. Niveles de presión sonora simulados por categoría	122
Tabla 31. Niveles medidos en estado dinámico	123
Tabla 32. Nivel de potencia acústica de una fuente lineal, obtenidos a partir de los niveles de	presión
medidos	124
Tabla 33. Diferencia entre los niveles de potencia acústica calculados y los obtenidos mediante	e Lmax
	125
Tabla 34. Resultados Estación de monitoreo MED-ZOOL – Aforo vehicular Av. Guayabal	125
Tabla 35. Resultados Estación de monitoreo MED-PJIR – Aforo vehicular Av. Regional	126
Tabla 36. Protocolo definido para determinar del coeficiente de absorción sonora me	ediante
mediciones con la Sonda PU y el kit de impedancia de Microflown Technologies	133
Tabla 37. Ensayos definidos.	134
Tabla 38. Sitios Medidos	135





INTRODUCCIÓN

Mediante el Acuerdo Metropolitano No. 24 de 2019 fue adoptado el Plan de Acción para la Prevención y Control de la Contaminación por Ruido del Valle de Aburrá, contempla medidas orientadas a la prevención, mitigación, corrección y seguimiento de los impactos generados por el ruido, que permitan abordar de manera integral esta problemática. Dicho Plan está estructurado en seis ejes transversales y 7 temáticos.

En los ejes temáticos, se tiene el **Eje temático 2: Planeación y Ordenamiento territorial con criterios de sostenibilidad,** que busca incorporar lineamientos relativos a la contaminación por ruido en los diferentes instrumentos de planificación, como los Planes de Ordenamiento Territorial (POT), Planes Básicos de Ordenamiento Territorial (PBOT), Planes Parciales.

La planeación y ordenamiento urbano de los municipios son el cimiento sobre el que se ha de construir la calidad ambiental acústica de las ciudades del futuro, cada vez más pobladas, industrializadas y complejas, para analizar las modificaciones y las afecciones que los niveles de ruido pueden significar sobre los usos presentes o futuros.

El eje temático 4: Reducción de la contaminación acústica de los medios de transporte y promoción de un modelo de movilidad sostenible y de bajas emisiones de ruido, contempla acciones hacia el sector transporte, dado que los resultados de la actualización de los mapas de ruido ambiental evidencian el transporte motorizado como la fuente sonora de mayor impacto acústico en la región.

En este sentido, se hace importante priorizar el desarrollo de acciones frente a esta fuente de ruido ambiental, empezando por la caracterización de la emisión acústica y así avanzar en su gestión eficiente y efectiva

Este documento contiene las actividades desarrolladas para la definición de lineamientos de Zonificación Acústica y los resultados de la caracterización acústica del parque automotor que circula en el Valle de Aburrá. Lo anterior, en el marco del Convenio Especial de Cooperación No. 643 de 2021 suscrito entre la Universidad de San Buenaventura y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, ejecutado entre el 28 de mayo de 2021 y el 30 de diciembre de 2021.





CARACTERIZACIÓN VEHICULAR

1. Definir los procedimientos de medición requeridos para la caracterización de la emisión acústica vehicular

Esta fase corresponde a una revisión documental sobre los diferentes estándares internacionales (ISO - ANSI entre otros), normas técnicas y bibliografía científica relacionada con la caracterización acústica de vehículos. Aspectos relacionados con la caracterización dinámica y estacionaria de vehículos son considerados. A su vez, otros factores que influyen en la emisión de ruido tales como el gradiente de la vía, aceleración del vehículo, velocidades de operación, revoluciones por minuto, entre otros estarán incluidos en el estudio.

Los principales productos de esta fase corresponden a la gestión documental del proyecto y un estado del arte sobre técnicas para la caracterización de la emisión de ruido en vehículos automotores.

1.1 Estado del arte relacionado con la caracterización de la emisión de ruido en vehículos y factores que la afectan

La emisión de ruido vehicular es una preocupación importante para las personas que viven en las grandes ciudades del mundo, debido al impacto negativo que tiene sobre la salud. La organización mundial de la salud (OMS) indica que las emisiones de ruido son la segunda causa más común de enfermedad en la unión europea (UE), solo detrás de las partículas generadas por los vehículos de motor [1]. La UE reconoce la falta de esfuerzos para reducir la contaminación acústica en Europa. De este modo, lleva a cabo un proceso exhaustivo de evaluación y revisión de la contaminación acústica con el objetivo de mitigar el impacto de los vehículos de carretera. En 2015 se modificó el Anexo II de la Directiva 2002/49/CE, publicando un método de cálculo para la evaluación del ruido ambiental, conocido como CNOSSOS-EU [2]. Esto permite establecer políticas de mitigación.

Este reglamento es un buen ejemplo de la implementación de políticas para internalizar los costos externos del transporte, donde se discrimina el costo de la contaminación acústica, según las características del emisor, la población expuesta a diferentes niveles de contaminación, la sensibilidad al ruido de la zona afectada, la población afectada y la composición del tren, que en última instancia transmite ruidos acústicos por el uso de la infraestructura ferroviaria Este nuevo enfoque tiene como objetivo restringir, disuadir o desalentar el acceso de vehículos a ciertas áreas acústicamente sensibles en una ciudad.

La resolución 0627 de 2006 del ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo sostenible establece la norma colombiana de emisión de ruido y ruido ambiental [3]. Sin embargo, no





se estipulan niveles máximos de ruido emitido por vehículos de carretera. Estudiar los factores que contribuyen a la emisión de ruido vehicular en los diferentes escenarios del ámbito nacional, es necesario para diseñar políticas que permitan reducir las emisiones de ruido.

En el presente informe se expone el estado del arte sobre la caracterización vehicular. Esta información sirve como insumo para la toma de decisiones metodológicas en una posterior caracterización del parque automotor. El documento tiene una naturaleza técnica, por lo que busca, además de plasmar la información, un análisis que permita visualizar el contexto de la temática, con el objetivo de aportar criterios al estudio a realizarse desde el Área Metropolitana del Valle de Aburra.

La estructura del documento comprende un acercamiento a los factores influyen en la emisión de ruido vehicular, la caracterización en estado dinámico y estacionario, un contexto estadístico de los estudios del tema y por último el estado del arte sobre las prácticas y regulaciones referentes a la caracterización vehicular y el ruido de emisión. También se agregan algunas tecnologías nuevas y metodologías para la caracterización, así como mediciones de parámetros tales como la dosis de ruido. Para la realización del informe se realizó una revisión documental, la cual fue priorizada de la manera descrita en la Tabla 1.

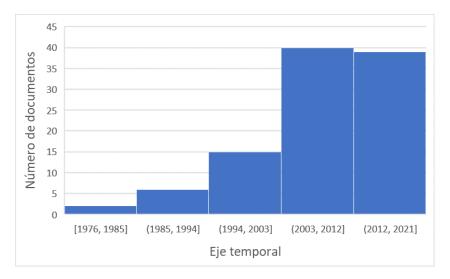
Tabla 1. Calidad y temporalidad de la información priorizada.

Tipo de documento	Cantidad	Proporción
University paper	8	8%
Conference paper	15	15%
Paper Q1	20	20%
Paper Q2	2	2%
Paper Q3	2	2%
Paper Q4	3	3%
Libro	4	4%
Normativa	28	27%
Otros	20	20%
Total	102	100%

(a) Criterio de impacto y tipo de publicación.







(b) Criterio de temporalidad en publicaciones.

1. <u>Factores que influyen en la emisión de ruido de vehículos de carretera y su</u> caracterización

1.1 Fuentes principales de ruido en un vehículo

Las principales fuentes de ruido en un vehículo de carretera se pueden dividir en dos categorías: las fuentes relacionadas con la velocidad del motor (motor, admisión y escape) y las fuentes relacionadas con la velocidad en carretera (llantas). El ruido de la transmisión se reparte entre ambas categorías, ya que parte de su ruido está relacionado con la velocidad del motor y el resto con la velocidad en carretera. A medida que se seleccionan las diferentes relaciones de transmisión, cambia el equilibrio entre estas dos categorías. De este modo, en las marchas bajas, el ruido emitido suele ser controlado por la unidad de potencia, mientras que en las marchas más altas el ruido de los neumáticos se vuelve más dominante. Adicionalmente, existen fuentes secundarias como: el ruido de la carcasa del sistema de admisión, el ruido de la carcasa del sistema de escape, el ruido aerodinámico y el ruido del motor transmitido por la estructura que es irradiado por la carrocería. Sin embargo, estas fuentes secundarias son poco significativas en condiciones de tráfico urbano y el ruido que producen es atenuado gracias a los sistemas pasivos de control de ruido disponibles en la actualidad [4].

1.1.1 Ruido del motor

El proceso de combustión y el funcionamiento del mecanismo del cigüeñal-pistón son las fuentes principales de excitación en el ruido del motor. El ruido generado por el proceso de combustión está controlado por el nivel máximo de presión del cilindro, la tasa de aumento





de la presión del cilindro durante la combustión y la tasa de cambio de la tasa de aumento de presión. Por otro lado, el ruido inducido por los componentes mecánicos del motor se debe principalmente al impacto generado por las partes mecánicas, entre ellas: los cojinetes principales, cojinetes del cabezal de la biela, pistones y sus respectivos revestimientos, que generan un ruido de naturaleza impulsiva aguda [4].

La velocidad y el tamaño del motor son parámetros dominantes que influyen en el ruido emitido por el motor. Con base en estos parámetros, se han desarrollado fórmulas empíricas para la predicción de ruido de diferentes tipos de motor en condiciones nominales [5, 6].

Motor diésel de aspiración normal e inyección directa (NA-DI diésel)

$$dB(A) = 30 \log N + 50 \log B - 108$$

Motor diésel turboalimentado de inyección directa (TC-DI diésel)

$$dB(A) = 40 \log N + 50 \log B - 137.5$$

Motor a gasolina

$$dB(A) = 50 \log N + 30 \log B + 40 \log S - 223.5$$

Donde, dB(A) es el nivel de presión acústica promedio con ponderación frecuencial A de un motor de cuatro cilindros medido a un metro, N es la velocidad del motor en revoluciones por minuto, B es el diámetro del cilindro donde se encuentra el pistón en milímetros (mm) y S es la distancia recorrida por el pistón durante cada ciclo en mm. Para motores con más o menos de cuatro cilindros, se debe agregar $10 \log(\#cilindros/4)$ a la predicción.

Estas fórmulas empíricas se obtuvieron mediante regresión en grandes conjuntos de datos. Por lo tanto, solo predicen el ruido del motor promedio. Para un análisis más detallado en la emisión de ruido producida por el motor, el enfoque casi universalmente aceptado es utilizar un modelo completo y detallado. La estructura, cubiertas y componentes móviles se modelan utilizando técnicas de elementos finitos. Las fuerzas involucradas se miden o predicen utilizando modelos dinámicos de los componentes móviles, y el ruido resultante se deriva de la vibración superficial promedio o mediante el uso de métodos de elementos de contorno [4].

En los últimos años se han hecho avances importantes en el desarrollo de vehículos impulsados por fuentes de energía alternativas que demuestran ser significativamente más silenciosos que los vehículos a combustión. Sin embargo, el tiempo de transición hacia estas nuevas tecnologías está condicionado al contexto particular de cada país. De este modo, el ruido generado por vehículos con motores de combustión sigue siendo un asunto importante que demanda soluciones en contextos específicos.





1.1.2 Ruido de la admisión y el escape

El ruido del gas de admisión se genera cuando la carga de aire entrante se detiene abruptamente por el cierre de las válvulas de entrada. El pulso de presión resultante se propaga en contra del flujo de aire promedio, regresando al orificio de entrada del sistema donde se irradia como ruido. De manera similar, el ruido de los gases de escape se genera cuando la válvula de escape se abre y libera rápidamente la presión residual del proceso de combustión. Aunque las características básicas del diseño del motor influyen en la generación de ruido del sistema de admisión y escape, casi todo el control de ruido de admisión y escape se logra mediante métodos de atenuación tradicionales tanto reactivos como disipativos [4].

1.1.3 Ruido de las llantas

El ruido de las llantas se genera principalmente por el bombeo de aire desde las estrías en la banda de rodadura de la llanta y por varios mecanismos que inducen vibraciones en la superficie de contacto. El ruido generado por estos mecanismos puede ser modificado por las características de resonancia de la llanta y el aire dentro y alrededor de esta. Cuando un segmento de la banda de rodadura entra en contacto con la superficie de la carretera, el peso del vehículo genera una deflexión en las estrías que expulsa el aire atrapado en las cavidades. Cuando el segmento de la banda abandona el área de contacto, las estrías vuelven a sus dimensiones iniciales y el aire regresa a las cavidades. Se ha demostrado que esta acción de bombeo de aire es un mecanismo de generación de ruido significativo y puede considerarse como una fuente monopolo simple [7]. La irregularidad en los patrones de las estrías en la banda de rodadura y la textura de la carretera crean impactos que excitan la llanta. La vibración resultante de estos impactos hace que la superficie de la llanta irradie ruido de amplitud proporcional a la velocidad del vehículo [8].

1.2 Factores que influyen en la emisión de ruido de vehículos

Un análisis de las condiciones de tráfico urbano que afectan mayormente a los habitantes se presenta en [9]. Este estudio demuestra que las principales molestias que genera el ruido vehicular en los habitantes ocurren a lo largo de las principales calles urbanas y durante los transientes de aceleración. El estándar internacional ISO 362-1:2015 [10] establece que, en condiciones de tráfico urbano el ruido generado por un vehículo depende principalmente de los siguientes factores:

- La velocidad;
- La aceleración (carga del motor) y;
- La velocidad rotacional del motor (solo para motores de combustión interna)





La velocidad y aceleración dependen de las decisiones del conductor, el desempeño del vehículo y el entorno de conducción. El ruido generado por las llantas en contacto con la carretera se incorpora a la velocidad y aceleración debido a su dependencia de estos dos parámetros. Por otro lado, la velocidad rotacional del motor (revoluciones del motor) está determinada por el conductor o el ordenador para el caso de transmisiones automáticas para conseguir la aceleración y la velocidad del vehículo. La velocidad de rotación del motor es un parámetro específico de cada vehículo. El estándar ISO 362 propone caracterizar la capacidad de aceleración como parámetro de reemplazo a la velocidad de rotación del motor. La capacidad de aceleración se específica como la aceleración con el acelerador completamente abierto en condiciones de conducción urbana. De este modo, la descripción del comportamiento de conducción es aplicable a diferentes tipos de motores (gasolina, diésel, wankel, híbridos, etc.) con transmisión manual. Los vehículos de transmisión automática se incluyen como un subconjunto de los vehículos de transmisión manual, ya que las transmisiones automáticas proporcionan emisiones de ruido iguales o inferiores a las de los vehículos de transmisión manual.

Según el estándar ISO 362-1:2015, el ruido vehicular que incide mayormente en las fachadas de los edificios depende de los siguientes factores:

- La forma en que se construyen las ciudades (principalmente la distancia entre las viviendas y las carreteras);
- El tráfico existente en las carreteras (número de vehículos);
- L superficie de la carretera como factor que contribuye al ruido llantas-carretera;
- La trayectoria del sonido (transmisión de ruido) y el control de ruido entre la fuente y el receptor (barreras acústicas, aislamiento acústico, etc.);
- El comportamiento de conducción que depende de:
 - o los límites de velocidad (leyes de tránsito);
 - la densidad del tráfico
 - o disposición de las carreteras (semáforos, esquinas, etc.),
 - o propósito de conducción (desplazamientos, placer, comercial, etc.),
 - o cumplimiento de las leves de tránsito, y
 - la forma en que el vehículo se comporta como fuente acústica en estas condiciones.

La estimación de las emisiones de ruido generadas por el tráfico rodado requiere tanto un modelo de emisión de ruido que capture el impacto de la cinemática del vehículo, es decir, la velocidad y la aceleración, en los niveles de potencia acústica, como una estimación precisa de las variables cinemáticas de interés en el área de estudio. La evaluación y revisión del ruido vehicular a través de procedimientos de medición y caracterización permiten obtener información importante para modelar los escenarios de conducción representativos teniendo en cuenta las variables del entorno. Dado que no todas las





condiciones de conducción tienen la misma influencia en el ruido del tráfico urbano, la elección de factores representativos es objeto de estudio.

1.2.1 Comportamiento de conducción

La velocidad y la aceleración del vehículo describen la cinemática del vehículo que dependen a su vez del comportamiento de conducción. Es por esto, que estudios de tráfico urbano apuntan generalmente a la caracterización de la velocidad y la aceleración del vehículo. El comportamiento de conducción tiene una gran influencia en condiciones de tráfico urbano. Para obtener información sobre las condiciones reales de conducción que permiten describir el comportamiento de conducción en el tráfico urbano, es necesario desarrollar actividades que involucren [10]:

- El registro de vehículos en tráfico urbano;
- El análisis de las fases de aceleración;
- La identificación de la condición más ruidosa teniendo en cuenta
 - La mayor aceleración en función de la velocidad del vehículo
 - La mayor aceleración en función de la velocidad promedio;
- La identificación de las revoluciones del motor y;
- El análisis de la relación potencia-masa en función de la mayor aceleración y las revoluciones del motor (la relación potencia-masa describe el desempeño del vehículo en condiciones de tráfico urbano).

1.2.2 Flujo y volumen del tráfico

Según el flujo vehicular se pueden establecer dos escenarios principales donde la emisión de ruido se debe a diferentes factores: condiciones de tráfico fluido y condiciones de tráfico no fluido. En condiciones de tráfico fluido los vehículos viajan generalmente a velocidades constantes donde el ruido está principalmente asociado a la interacción de las llantas con el tipo de superficie de rodadura (ruido llantas-carretera). Para este escenario el estándar ISO 11819-1:2001 presenta un método estadístico de paso de vehículos para medir la influencia del tipo de la superficie de rodadura en el ruido vehicular [11]. En condiciones de tráfico no fluido la velocidad de conducción varía, ya que se presenta en escenarios de tráfico urbano lento con presencia de intersecciones donde el ruido de las llantas-carretera genera menos influencia.

En estos casos, las principales fuentes están asociadas a la velocidad del motor, que a su vez está determinada por el comportamiento de conducción. El flujo de tráfico es una de las variables más importantes consideradas en el desarrollo de modelos de predicción para el estudio del ruido vehicular [12]. Los factores más significativos para el ruido del tráfico son flujo total del tráfico y el número de vehículos pesados [13]. Estudios demuestran que el ruido del tráfico rodado tiene mayor correlación con el flujo total de vehículos, seguido por el porcentaje de flujo de vehículos pesados y ligeros [14]. En vías donde la velocidad de los





vehículos es casi constante, es importante cuantificar el impacto del volumen del tráfico dada su emisión de ruido [15]. El aumento de este flujo, en términos de vehículos por hora, provoca un aumento en los niveles de ruido, dada la composición constante del tráfico, velocidad y patrones de conducción [16].

1.2.3 Parámetros geométricos de la carretera

Los niveles de emisión de ruido vehicular pueden variar según las características geométricas de las vías. La dinámica de las emisiones puede variar en escenarios, tales como: cruces viales, rotondas, pendientes (también llamadas gradiente), semáforos, etc. Por ejemplo, en las intersecciones los niveles de ruido aumentan a bajas velocidades, ya que se presentan fases de aceleración y desaceleración que se reflejan en el ruido generado por la unidad de potencia de los vehículos y las interacciones llanta-carretera dejan de ser relevantes [17, 18]. Otra geometría importante son las rotondas. Estas a diferencia de la conducción en línea recta puede presentar más fases de aceleración en especial en los vehículos que se dirigen a las salidas de estas [19]. Algunos estudios concluyen que "la implementación de rotondas ha reducido el nivel de ruido en promedio en 2,2 dB" [20]. Sin embargo, establecer este promedio para todas las rotondas no es posible debido a la cantidad de variables que influyen como lo son el tamaño de las mismas, el tipo de vehículos y la masa del tráfico vehicular e incluso el tipo de rodadura que presentan, ya que el asfalto no es el mismo después de la reconstrucción de la intersección y la rotonda.

Efectos del gradiente de la vía en la emisión de ruido

La pendiente es un parámetro geométrico de las vías que influye en los niveles de emisión de ruido de tráfico. La emisión de ruido vehicular en una pendiente es diferente a la emisión en un tramo de carretera horizontal, debido a la mayor carga del motor y las diferencias que se presentan en el comportamiento de conducción. La pendiente provoca un aumento del ruido de tráfico para los flujos ascendentes y una disminución del ruido para los flujos descendentes. Un vehículo en una sección de la carretera con pendiente experimenta una aceleración adicional debido a la gravedad. Esta aceleración adicional, es opuesta a la dirección de conducción cuando el vehículo conduce cuesta arriba. Por el contrario, cuando el vehículo conduce cuesta abajo, la aceleración adicional contribuye en la dirección de conducción [21].

La siguiente ecuación presenta un modelo básico de emisión de ruido vehicular en tramos horizontales de la vía donde se consideran la velocidad y aceleración de un vehículo [22]

$$L = c_0 + c_1 \log V + c_2 a$$

donde L es el nivel de presión sonora en dB, c_0 , c_1 y c_2 son constantes, V es la velocidad del vehículo en km/h y a es su aceleración en m/s².





La aceleración adicional producida por la gravedad y la potencia de salida adicional del vehículo están relacionadas con la pendiente de la vía. Por esta razón, estos factores se incluyen en el modelo de emisión de la siguiente forma:

$$L = c_0 + c_1 \log V + c_2(a \pm g \sin \theta) + c_3 \frac{V}{3.6} g \sin \theta$$

donde g es la aceleración de la gravedad (aproximadamente 9.8m/s^2), θ es el ángulo en radianes de la pendiente del segmento de la vía y c_3 es la constante del término asociado a la potencia de salida adicional.

Pocos estudios se han realizado sobre la emisión de ruido de tráfico en pendientes de carreteras. Peng et al. [23] presenta un modelo de emisión de ruido de vehículos pesados para estudiar la influencia de la dinámica de traslación en el nivel de potencia acústica emitida por camiones pesados. En este estudio se deriva una expresión para la emisión de ruido del motor en términos de velocidad del vehículo, peso, potencia del motor, propiedades aerodinámicas y pendiente de la carretera. También, se investiga la influencia de la pendiente de la carretera en la cinemática del vehículo y la emisión de ruido. Chen et modela el ruido de tráfico vehicular teniendo en cuanta la pendiente de las vías. En [24] se recopilaron características de los gradientes longitudinales de múltiples carreteras como datos en la ciudad montañosa del condado de Chongging, la cual se eligió como punto de partida, para estudiar las características del ruido para una amplia gama de gradientes de carreteras y construir un modelo de predicción del ruido del tráfico basado en redes neuronales artificiales (ANN). En [25] se desarrolla un modelo de predicción del ruido del tráfico para ciudades montañosas. Basados en el modelo chino HJ 2.4-2009, se propuso el coeficiente de corrección y se construyó un modelo de predicción de ruido por vehículo utilizando ANN.

El proyecto europeo Harmonoise [26], determinó experimentalmente que la pendiente de la carretera tiene poca importancia en la aceleración y desaceleración, que se usa comúnmente para el tráfico normal. El método de cálculo CNOSSOS-EU [27] divide la pendiente de la carretera en tres categorías. De este modo cada categoría está asociada a un factor de corrección. Este término está relacionado con la velocidad cuando el vehículo se desplaza cuesta arriba, y para algunos rangos de pendiente el factor de corrección es cero. Esto implica que la emisión de ruido no se diferencia entre una carretera con pendiente y una llana. En [28] se propone un modelo de predicción de ruido de tráfico vehicular en vías con diferentes pendientes bajo condiciones específicas. Los datos experimentales





obtenidos en este trabajo, demostraron que la emisión de ruido en condiciones de pendiente es afectada principalmente por tráfico pesado y vehículos con motores diésel.

1.2.4 Composición del tráfico

La composición y características del parque automotor son factores que afectan la emisión de ruido vehicular. El nivel de ruido puede variar según el modelo de los vehículos, los tipos de sistemas de transmisión, los tipos de sistemas de propulsión, la masa o tamaño de los vehículos, entre otros. Varios estudios sugieren que la masa del vehículo tiene una mayor incidencia en las emisiones de ruido [29, 30]. De este modo, el tráfico vehicular se categoriza comúnmente según la masa en vehículos livianos, medianos y pesados. En ocasiones estas categorías requieren mayor detalle para describir correctamente la composición del tráfico rodado. Algunos ejemplos de estándares internaciones que proponen diferentes clasificaciones según el tamaño del vehículo se presentan a continuación.

Categoría según la ISO 362

Con el fin de caracterizar el ruido emitido por los vehículos en aceleración bajo condiciones de tráfico urbano, la norma ISO 362 propone las siguientes categorías:

- L: vehículos con al menos 4 ruedas
 - o L1 y L2: Ciclomotores.
 - o L3: vehículos con 2 ruedas de cilindraje superiores a 50 CC.
 - L4: vehículos con 3 ruedas de cilindraje superiores a 50 CC con las ruedas unidas asimétricamente a lo largo del eje longitudinal del vehículo.
 - L5: vehículos con 3 ruedas de cilindraje superiores a 50 CC con una masa bruta del vehículo no superior a 1000 kg y ruedas instaladas simétricamente a lo largo del eje longitudinal del vehículo.
 - L6: vehículos de 4 ruedas de cilindraje hasta 50 CC o cuya potencia neta máxima no exceda de 4 kW en el caso de otros motores de combustión interna, o cuya potencia nominal continua máxima que no exceda 4 kW en el caso de motores eléctricos, con una masa en vacío no sea superior a 350 kg, sin incluir la masa de las baterías en el caso de los vehículos eléctricos.
 - L7: vehículos de cuatro ruedas, distintos de los clasificados en la categoría L6, cuya masa en vacío no sea superior a 400 kg (550 kg para vehículos destinados al transporte de mercancías), sin incluir la masa de las baterías en el caso de los vehículos eléctricos, y con una potencia máxima nominal continua que no supera los 15 kW.
- M: Vehículos con al menos 4 ruedas y su uso sea el transporte de pasajeros.
 - M1: vehículos de máximo de ocho asientos, además del asiento del conductor.
 - M2: vehículos con más de ocho asientos además del asiento del conductor y con una masa máxima no superior a 5000 kg.





- M3: vehículos con más de ocho asientos además del asiento del conductor y con una masa máxima superior a 5000 kg.
- N: Vehículos con al menos 4 ruedas y su uso sea el transporte de carga.
 - o N1: vehículos cuya masa máxima autorizada no supere los 3500 kg.
 - N2: vehículos cuya masa máxima autorizada sea superior a los 3500 kg e inferior a 12.000 kg
 - o **N3:** vehículos cuya masa máxima autorizada sea superior a los 12.000 kg.

Categoría según la ISO 11819-1:2021

En el estándar ISO 11819 clasifica los vehículos según el número de ejes y el tamaño del vehículo considerando las siguientes categorías:

- Categoría No. 1 carros: Vehículos de pasajeros excluyendo otros vehículos ligeros.
- Categoría No. 2 vehículos pesados: camiones, buses y vehículos con al menos 2 ejes y más de cuatro ruedas.
 - Categoría No. 2a vehículos pesados de doble eje: camiones, buses y coches de 2 ejes y más de 4 ruedas.
 - Categoría No. 2b vehículos pesados de varios ejes: camiones, buses y coches de más de 2 ejes.

1.2.5 Superficies de rodadura

El ruido generado por la fricción entre las llantas y carretera domina sobre las otras fuentes a velocidades superiores a los 50 km/h aproximadamente, según el tipo de vehículo y pavimento [31]. En áreas urbanas, la fricción y las características de ruido llantas-carretera son los factores más importantes en el diseño de las superficies de rodadura. Estas propiedades suelen entrar en conflicto, ya que materiales de llanta más suaves proporcionan una menor emisión de ruido, pero resultan en mayores tiempos de frenado.

Por otro lado, las superficies de pavimento lisas reducen el ruido generado por las vibraciones del neumático, pero en condiciones de suelo húmedo, producen mayores distancias de frenado [32]. La emisión de ruido vehicular de una vía también puede verse afectada por las condiciones climáticas que se presentan en la zona.

La influencia de la humedad de la superficie es un factor significativo para considerar en la predicción del ruido del tráfico, especialmente para los países con largas temporadas de lluvia. Esto se puede evidenciar, al tener un aumento en el nivel de ruido del tráfico generado por los vehículos en una carretera mojada, en comparación con los niveles en una carretera seca. Estudios demuestran la relación del ruido de las carreteras mojadas con el tipo de superficie y la velocidad [33]. Algunos métodos de evaluación del ruido proporcionan una corrección por humedad de la superficie de la carretera para vehículos ligeros, que tienen en cuenta los períodos de lluvia a lo largo del año [27].





La textura del pavimento es una de las características más importantes relacionadas con la emisión de ruido del pavimento. La textura está definida como la desviación de una superficie de pavimento de una superficie completamente plana dentro de un rango de longitud de onda especificado. En términos de longitud de onda, la textura de una superficie se clasifica entre los siguientes rangos [34]:

- Microtextura: corresponde a la desviación de la superficie de carretera de una superficie completamente lisa con dimensiones características a lo largo de la superficie de menos de 0.5 mm. Esto corresponde a longitudes de onda menores a 0.5 mm. La microtextura de un pavimento generalmente se logra mediante la agudeza y aspereza de los agregados individuales de la superficie del pavimento.
- Macrotextura: es la desviación de la superficie de una carretera de una superficie completamente plana con dimensiones características a lo largo de la superficie entre 0,5 y 50 mm. Esto corresponde a longitudes de onda entre 0,5 y 50 mm. La macrotextura se logra por el tamaño y cantidad de agregados en la mezcla y por la compactación del pavimento.
- Megatextura: es la desviación de la superficie de una carretera de una superficie completamente plana con dimensiones características a lo largo de la superficie entre 50 y 500 mm. Esto corresponde a longitudes de onda entre 50 y 500 mm. La megatextura puede estar formada por baches, otras discontinuidades más grandes de la superficie del pavimento o irregularidades de las capas del pavimento.

La macrotextura y la megatextura, tienen una influencia significativa sobre las propiedades acústicas de la superficie. El estudio de estas propiedades y de los diversos parámetros proporcionan la base para la identificación y el desarrollo de vías con menores niveles de emisión de ruido, sin comprometer la durabilidad y estabilidad estructural, la fricción y otras propiedades funcionales. En el análisis de las propiedades acústicas de la superficie de rodadura, se tienen en cuenta los siguientes parámetros [35]:

- Amplitud máxima del espectro de longitud de onda de la textura.
- Longitud de onda correspondiente a la amplitud máxima. La reducción de este parámetro aumenta la suavidad de la superficie del pavimento y reduce el ruido generado por las vibraciones de los neumáticos.
- Factor de forma de la superficie, el cual se determina a partir de una distribución de frecuencia acumulada de las profundidades del perfil de la superficie como una frecuencia acumulada que corresponde a la mitad de la profundidad máxima del perfil. El factor de forma es un indicador importante de las propiedades acústicas de la superficie del pavimento y de las formas de la textura. El aumento en el factor de forma reduce la emisión de ruido.
- La longitud de forma es el producto entre el factor de forma medio y la longitud de onda correspondiente a la amplitud máxima. Este parámetro refleja la dependencia del ruido de la forma del perfil de la superficie y de las irregularidades del perfil. El aumento de este parámetro aumenta la suavidad de la superficie del pavimento, reduciendo el ruido.





El estándar ISO/TS 13473-4:2008 [36] proporciona un procedimiento para el cálculo de la amplitud máxima del espectro de longitud de onda de la textura y la longitud de onda correspondiente a la amplitud máxima. Por otro, lado la ISO 11819 proporciona un método para medir la influencia de la superficie de rodadura en la emisión de ruido, teniendo en cuenta el tipo de vehículo.

2. Emisión de ruido en vehículos en estado estacionario y dinámico

La emisión de ruido exterior de un vehículo generalmente se cuantifica en dos escenarios: el ruido generado por el paso de un vehículo en la carretera y el ruido generado por el exosto y el motor del vehículo en estado estacionario. Los estándares internacionales ISO 362 e ISO 5130 proporcionan los procedimientos de medición para evaluar el ruido en estas condiciones respectivamente, según el tipo de vehículo bajo estudio. Sin embargo, la metodología para mediciones estipuladas en diferentes países son variaciones o reducciones de estos estándares de acuerdo con las necesidades o limitaciones que cada zona presenta. Uno de estos casos es el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI), el cual no tiene directamente asociado un procedimiento de medición de ruido en vehículos, sino que remite directamente a estos estándares internacionales.

2.1 Emisión de ruido vehicular en estado estacionario

La caracterización de ruido vehicular en estado estacionario inicialmente se diseña con el fin de obtener un método sencillo para uso en verificaciones de sistemas de escape, realizadas al lado de la carretera, por ejemplo, por la policía o por las autoridades viales. Actualmente, se emplean con el fin de proporcionar información para desarrollo tecnológico vehicular, incluida la reducción del ruido del escape y el diseño de sistemas de escape vehicular. También, se usa con el fin de verificar el estado de vehículos en uso y la identificación de fallas que se están presentando y que no son detectadas de forma visual. Estas fallas se pueden presentar por:

- El desgaste, ajuste defectuoso o modificación de componentes particulares, cuando el defecto no es evidente mediante inspección visual.
- La eliminación parcial o completa de dispositivos que reducen la emisión de algunos niveles de presión sonora.

Los protocolos de medición de ruido para vehículos en estado estacionario se enfocan en el ruido emitido por el escape. Sin embargo, también se puede presentar un método alternativo donde muestra el protocolo de medición para el ruido generado por el motor. Algunos estudios indican que los niveles de ruido generados por el motor varían de forma aleatoria en comparación al ruido generado por el escape y que con el aumento de la potencia, no necesariamente se presenta un aumento sistemático de los niveles de presión sonora. Por ende, el ruido del motor es independiente de la potencia del motor [37, 38].





En Colombia la norma técnica NTC 4194 especifica un procedimiento de ensayo, el ambiente y la instrumentación requeridos para medir el nivel de presión sonora exterior producido por un vehículo automotor en condiciones estacionarias. El método está diseñado de acuerdo con los protocolos de medición proporcionados por el estándar internacional ISO 5130. Se aplica solamente a vehículos automotores de las categorías L, M y N equipados con motores de combustión interna. Sin embargo, esta norma no especifica un método para verificar el nivel de presión sonora del escape cuando el motor es operado a cargas reales, ni tampoco especifica un método para verificar los niveles de presión sonora del escape contra un límite de ruido general para categorías de vehículos automotores. Tampoco establece límites de emisión.

2.1.1 <u>Medición de la emisión de ruido de un vehículo en estado estacionario según el estándar ISO 5130</u>

El estándar ISO 5130 [39] especifica un procedimiento e instrumentación para medir los niveles de presión acústica exterior de los vehículos de carretera en condiciones estacionarias. El procedimiento aplica para vehículos en las categorías L, M y N equipados con motores de combustión interna. El lugar de medición debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- Debe realizarse al aire libre;
- En una superficie nivelada, plana, densa y con bajo coeficiente de absorción. Libre de nieve, pasto, tierra suelta, cenizas u otro material absorbente;
- No deben presentarse objetos, paredes, árboles ni personas en la zona de medición en un radio 3 metros (m) desde los extremos del vehículo, a excepción de quien esté ejecutando la medición y el conductor del vehículo;
- El ruido de fondo debe estar al menos 10 dB por debajo del nivel de presión sonora ponderado A.

Para medir el ruido generado por el escape, el motor del vehículo debe ser estabilizado bajo las condiciones que asigna la normativa según su categoría. El micrófono de medición debe ubicarse a la altura de la de salida de los gases, formando un ángulo de 45±10° con el plano vertical contenido en la dirección del flujo de gas y una distancia mínima de 0.5 m. Para vehículos con escapes verticales (por ejemplo, vehículos comerciales), el micrófono debe posicionarse a la altura de la salida del escape, orientando hacia arriba y con el eje vertical, a una distancia de 0,5 m del lado del vehículo próximo al orificio de salida. Para los vehículos provistos de orificios de salida de escape separados más de 0,3 m entre sí, se realiza una medición para cada salida y se toma el nivel más alto. La Figura 1 muestra las pasiones del micrófono para realizar las mediciones en condiciones estacionarias. En el caso del ruido proveniente del motor, el micrófono debe ubicarse en el lado más lejano al conductor, a una altura sobre el suelo de 0,5 m y una distancia de 0,5 m medidos horizontalmente desde el borde inferior de la llanta. Independientemente de cuál sea el caso





de medición, se deben realizar mínimo 3 muestras por cada posición del micrófono. El resultado es la media aritmética de estas muestras. Se debe mostrar el nivel de presión acústica ponderado A, como se indica en la Ecuación:

$$L_{Arep} = (L_{A1} + L_{A2} + L_{A3})/3$$

donde L_{Arep} es el nivel de presión sonora a reportar y L_{Ai} es el nivel de presión sonora de la medición i, con i = 1,2,3.

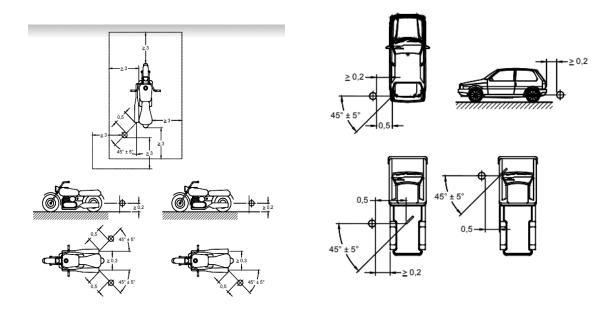


Figura 1. Posiciones de micrófono para las mediciones del vehículo en estado estacionario según la norma ISO 5130

2.2 Emisión de ruido vehicular en estado dinámico

La cuantificación del ruido de un vehículo en estado dinámico (ruido de paso) se usa generalmente para aproximar el ruido emitido en un comportamiento típico de conducción urbana. La medición del ruido de paso es importante en procesos de homologación donde se debe verificar que el nivel de ruido del vehículo se ajuste a la normativa vigente. De este modo, se debe garantizar condiciones controladas y repetibles que permitan la estimación de los parámetros que caracterizan el comportamiento de conducción en condiciones urbanas típicas.

El ruido de paso de un vehículo puede modelarse como una fuente de ruido acercándose al receptor. Esto resulta en un aumento casi lineal del nivel de presión acústica con la distancia. Dependiendo de la marcha seleccionada, el gradiente en el nivel de ruido puede





ser diferente. Esto se debe al aumento en velocidad de rotación del motor, al cambio abrupto en la carga del motor, a los pulsos de presión en el motor y a la mayor cantidad de aire que ingresa al sistema de admisión. El ruido del orificio de escape y los neumáticos contribuyen más al nivel máximo de ruido de paso cuando la fuente se aleja del receptor.

En este punto el nivel de presión sonora cae con la distancia. De acuerdo con la ley del inverso cuadrado para una fuente estacionaria, la presión del sonido es inversamente proporcional a la distancia entre la fuente y el receptor. Sin embargo, el ruido de paso no presenta esta característica ya que la fuente de sonido está en movimiento. El ruido de las llantas-carretera es un factor importante en el ruido de paso del vehículo. Sin embargo, su contribución se ve afectada por: el ángulo entre el eje longitudinal de la llanta y el receptor, y la atenuación con la distancia [40].

2.2.1 Influencia de las fuentes principales en el ruido de paso

La identificación y análisis de las principales fuentes que contribuyen al ruido de paso de un vehículo requiere de mediciones de la presión sonora en las proximidades de la fuente en condiciones operativas de paso y de la determinación de las características de la ruta de transferencia entre cada fuente de ruido y los micrófonos. Se ha logrado identificar que el ruido de paso de vehículos se compone de cuatro fuentes principales: el motor, el sistema de admisión, el sistema de escape y el sistema neumático-carretera [40].

Contribución del motor en el ruido de paso

El ruido irradiado del motor depende principalmente del proceso de combustión, el cual genera cambios de presión dentro del cilindro, induciendo ruido por el impacto de componentes mecánicos y por el flujo de los gases [41]. En general, el nivel de presión acústica se incrementa con el aumento de la velocidad del motor. Los motores diésel emiten niveles de ruido más altos que los motores a gasolina para las mismas velocidades del motor, lo que se debe a las mayores excitaciones de presión en los cilindros [41]. El ruido de la parte inferior del motor puede contribuir significativamente a la radiación de ruido general [42].

Contribución del sistema de admisión y escape en el ruido de paso

Los sistemas de admisión y escape tienen características similares que contribuyen significativamente al ruido exterior del vehículo. El ruido en conjunto del sistema de admisión y escape tiene un aporte similar al ruido del motor y de las llantas-carretera. Sin embargo, este sistema contribuye significativamente cuando el motor funciona con una carga elevada [43]. Las fuentes principales de ruido del sistema de admisión y escape corresponden a los pulsos de presión causados por los eventos de apertura y cierre de las válvulas del motor. Los pulsos se propagan a través del sistema hasta los orificios, donde irradian como ruido al ambiente [44]. Dado que el movimiento de las válvulas está





relacionado con la velocidad de combustión del motor, el ruido del sistema de admisión y escape se produce a la frecuencia de encendido del motor y sus múltiplos [43].

Contribución del sistema llantas-carretera en el ruido de paso

El ruido generado por interacción entre la llanta y la carretera contribuye significativamente al ruido de paso general. Los mecanismos de generación de ruido de llantas-carreteras están relacionados con la estructura de la llanta y los relacionados con el aire alrededor de la llanta. El impacto entre la superficie de la carretera y la superficie de la llanta generan ruido transmitido por la estructura. El desplazamiento de aire y el efecto de bombeo del aire generado por la interacción de las estrías de la llanta y la superficie de la carretera hacen parte de los mecanismos relacionados con el aire alrededor de la llanta. La contribución de cada mecanismo al ruido total de las llantas-carreteras varía según el tipo y tamaño de los neumáticos, la textura del pavimento y las condiciones de funcionamiento del vehículo. Los mecanismos de amplificación como el efecto de bocina, el efecto de diferentes impedancias acústicas y mecánicas y las resonancias estructurales y acústicas de las llantas influyen en la radiación del ruido de las llantas-carretera hacia un receptor [45].

2.2.2 Medición del ruido de paso según el estándar ISO 362

El estándar internacional ISO 362 representa un procedimiento para la medición y el cálculo del nivel de ruido de paso para motocicletas, vehículos ligeros y vehículos pesados. La parte 1 se refiere a vehículos de categoría M y N (vehículos de pasajeros, camiones o vehículos multipropósito y autobuses pequeños). La parte 2 se encarga de la categoría L (motocicletas), excluyendo las subcategorías L1 y L2 (ciclomotores), las cuales son cubiertas en la ISO 9645. Su intención es reflejar la emisión de ruido de un vehículo en un entorno de tráfico urbano. Con el fin de desarrollar un procedimiento que refleje el comportamiento actual de conducción urbana bajo condiciones estables y repetibles, el estándar ISO 362 propone un método de prueba que combina:

- Los niveles máximos de ruido de un vehículo acelerado (prueba de aceleración) y;
- Los niveles máximos de ruido de un vehículo a velocidad constante (prueba de velocidad constante).

Las pruebas de velocidad constante y aceleración se combinan en un promedio ponderado que representa la emisión de ruido de un vehículo parcialmente acelerado en condiciones de tráfico urbano. El método de prueba y las tasas de aceleración objetivo dependen de la relación de masa de potencia del vehículo. Para ciertas categorías de vehículos, la prueba se lleva a cabo en diferentes condiciones de relación de transmisión. Por otro lado, la prueba de velocidad constante se realiza para algunas categorías como muestra la siguiente tabla.





Tabla 2. Velocidades para la prueba de velocidad de la norma ISO 362 de las diferentes categorías de vehículo

Categoría	Velocidad
M1 y M2 con una masa máxima autorizada que no exceda los 3500 kg, y N1	50 km/h ± 1 km/h
M2 con una masa máxima autorizada superior a 3500 kg y M3, N2 y N3	35 km/h ± 5 km/h
L3 con PMR > 25	40 km/h ± 1 km/h para PMR ≤ 50 50 km/h ± 1 km/h para PMR > 50

La ISO 362 requiere que se realicen al menos cuatro mediciones para todas las condiciones de prueba en cada lado del vehículo y para cada relación de transmisión hasta que se obtengan cuatro mediciones del nivel máximo de presión acústica ponderado A consecutivas que estén dentro de 2 dB de diferencia entre sí.

Para realizar las mediciones propuestas en la norma ISO 362 es necesario disponer de un sitio de pruebas con las dimensiones especificadas en la Figura 2. La pista de pruebas consta de un área de aceleración de 20 m por 20 m (ABB'A') con una línea de referencia a lo largo de su centro que representa la dirección de conducción del vehículo (línea CC'). Para garantizar instalaciones de prueba igualmente equipadas, el área de aceleración y el carril de conducción (incluyendo 10 m antes y después del área de aceleración) están cubiertos con un asfalto según lo establecido en norma ISO 10844. Dentro de un radio de 50 m alrededor del centro de la pista, el espacio deberá estar libre de objetos reflectantes. La pista de prueba y la superficie del lugar deberán estar secas y libres de materiales absorbentes. La superficie debe representar carreteras de asfalto bien construidas y mantenidas con tamaños de agregados pequeños. Para establecer las condiciones acústicas de la pista, el estándar ISO 13472-2 establece un método de medición del coeficiente de absorción acústica de las superficies de las carreteras en función de la frecuencia en condiciones de incidencia normal.

El nivel de presión sonora debe medirse con un sonómetro clase 1 debidamente calibrado que permita registrar el nivel máximo de ruido de paso con ponderación en frecuencia "A" y ponderación temporal "F". La prueba debe contar con dos micrófonos ubicados a mitad del camino en el área de aceleración (sobre la línea PP') a una distancia de 7,5 m de la línea de referencia CC', y a una altura de 1,2 m. En las proximidades del micrófono, no debe haber ningún obstáculo que pueda influir en el campo acústico y no debe quedar ninguna persona entre el micrófono y la fuente de ruido. El observador del medidor debe colocarse de manera que no influya en la lectura del medidor.





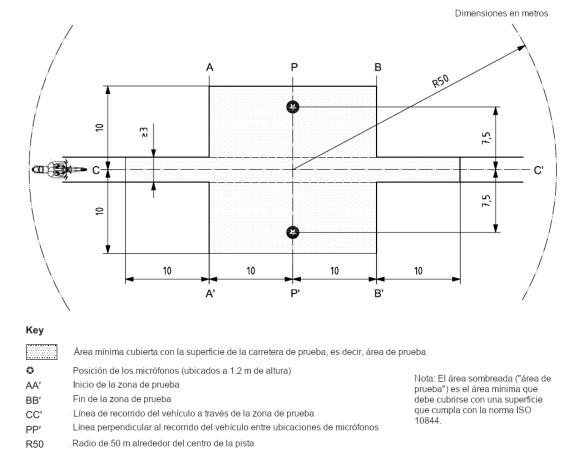


Figura 2. Dimensiones de la pista de pruebas para las mediciones de ruido de paso

La velocidad de rotación del motor y la velocidad en carretera del vehículo debe medirse con instrumentos que cumplan los límites de especificación en la normativa. Durante las pruebas, los datos meteorológicos del sitio deben ser monitoreados (temperatura, velocidad y dirección del viento, humedad relativa y presión barométrica). La temperatura ambiente debe estar entre los 5 y 40 grados centígrados. La prueba no deberá llevarse a cabo si la velocidad del viento supera los 5 m/s o en presencia de lluvia.

Cualquier pico de sonido que parezca no tener relación con las características del nivel de sonido general del vehículo debe ignorarse. El ruido de fondo se mide durante 10 s inmediatamente antes y después de una serie de ensayos del vehículo. Las mediciones se realizan con los mismos micrófonos y ubicaciones de micrófonos de la prueba. Se notificará el nivel máximo de presión acústica ponderado A. El ruido de fondo (incluido cualquier ruido





del viento) debe estar al menos 10 dB por debajo del nivel de presión acústica ponderado A producido por el vehículo sometido a ensayo.

En la prueba de aceleración, cuando la parte delantera del vehículo alcanza la línea AA', el control del acelerador se debe acoplar completamente tan rápido como sea posible. El acelerador debe mantenerse completamente acoplado hasta que la parte trasera del vehículo alcanza la línea BB'. Posteriormente, se suelta el mando del acelerador. La activación del control del acelerador se producirá lo más cerca posible de la línea AA'. En esta prueba se debe alcanzar una velocidad de 50 km/h cuando la parte delantera del vehículo alcanza la línea PP', para el caso de un automóvil de pasajeros. Las marchas se seleccionan de acuerdo con la capacidad de aceleración del vehículo. En la prueba de velocidad constante, el control de aceleración se ubica para mantener una velocidad constante entre AA 'y BB'.

2.2.3 <u>Medición de la influencia de la carretera en el ruido del tráfico según el estándar</u> ISO 11819

La emisión y propagación del ruido producido por el tráfico rodado es dependiente de las características de la superficie de rodadura. Especialmente la textura y porosidad. Estos factores influyen significativamente en el ruido llanta-carretera. El estándar internacional ISO 11819 describe un método estadístico de paso para medir la emisión de ruido vehicular para diferentes superficies y diferentes categorías de vehículos. Este método está diseñado para tráfico vehicular a velocidad constante y donde no influye el comportamiento de conducción ni la geografía de las vías. El método requiere de la medición del ruido y la velocidad de los vehículos que individualmente pasan por un punto fijo en una calzada para determinar el comportamiento acústico de la superficie de la carretera. También requiere la medición del nivel máximo de presión acústica ponderado A producido por un vehículo individual, utilizando ponderación temporal "F". Se miden al menos 180 pasos de vehículos para cumplir con los requisitos de la prueba, que consisten en 100 automóviles y 80 vehículos pesados. La norma exige que las pruebas se lleven a cabo en una sección de carretera relativamente recta y plana, que cubra una longitud de 30 a 50 m. El micrófono se ubica a 7.5 m horizontalmente desde el centro del carril de recorrido a una altura de 1.2 m. La prueba requiere condiciones aproximadas de campo libre, teniendo en cuenta las limitaciones que imponen algunos elementos de la carretera. De acuerdo con el rango de velocidades que presenta la norma, se da una velocidad de referencia. Cada nivel de paso como cada velocidad del vehículo, se registra. Posteriormente, mediante regresión lineal se ajusta el nivel de presión sonora máximo con respecto al logaritmo de la velocidad para cada categoría de vehículos. Finalmente, se calcula un índice que incluye todas las categorías en función de la potencia y permite la comparación entre superficies.

3. Metodología estadística para la toma de muestras





El muestreo permite inferir información sobre una población en función de los resultados de un subconjunto de la población, sin tener que investigar a cada individuo. Reducir el número de individuos en un estudio reduce el costo y la carga de trabajo, y puede facilitar la obtención de información de alta calidad. Para esto es importante que los individuos seleccionados sean representativos de toda la población. Existen varias técnicas de muestreo que se pueden subdividir en: muestreo probabilístico y muestreo no probabilístico. En el muestreo probabilístico (aleatorio), se comienza con un marco muestral completo de todos los individuos elegibles de los que selecciona su muestra. De este modo, todos los individuos elegibles tienen la posibilidad de ser elegidos para la muestra. En el muestreo no probabilístico (no aleatorio), no se comienza con un marco muestral completo, por lo que algunos individuos no tienen posibilidad de ser seleccionados. En consecuencia, no se puede estimar el error del muestreo y existe un riesgo significativo de terminar con una muestra no representativa que produce resultados no generalizables.

Para determinar el tamaño de una muestra se debe tener en cuenta varios aspectos, como el parámetro y estimador, el sesgo, el error muestral, el nivel de confianza y la varianza poblacional. El parámetro hace referencia a la población que es objeto de estudio y el estimador es la función de la muestra que se usa para medirlo. Al elegir los elementos de muestra se presenta una pérdida de la representatividad conocida como error muestral. La naturaleza de la investigación indica cuál es el grado de aceptación de este error. Por otra parte, el nivel de confianza es la probabilidad de que la estimación que indica que cuanto se acerca a la realidad del parámetro a medir [46].

La fórmula para calcular el tamaño de muestra cuando se conoce el tamaño de la población es la siguiente:

$$n = \frac{Z^2 NPQ}{(N-1)E^2 + Z^2 PQ}$$

Donde, n es el tamaño de muestra, N el tamaño de población, Z el nivel de confianza, P la probabilidad de éxito, Q la probabilidad de fracaso y E es el error muestral. En caso de desconocer el tamaño de la población se utiliza la siguiente ecuación para calcular el tamaño de la muestra:

$$n = \frac{Z^2 PQ}{E^2}$$

Algunos estudios relacionados con la caracterización de emisión de ruido vehicular utilizan la ecuación para calcular el tamaño de una muestra para poblaciones conocidas. López Trujillo et al. [47] con el fin de analizar la contaminación acústica generada por el parque automotor en la zona urbana de la ciudad de Ibarra, utilizó la información emitida por el INEC; que corresponde a vehículos matriculados en la provincia de Imbabura. El valor de





éstos fue de 51,308 automotores clasificados de acuerdo con su tipo como: automóvil, todoterreno, autobús, camión, camioneta, furgoneta, motocicleta, tanquero, tráiler y volqueta. Al total de los automotores se le aplicó un muestreo con un nivel de confianza del 95%, el mismo que arrojó a 381 vehículos a monitorear en estado estacionario de acuerdo con los protocolos de medición propuestos por la ISO 5130. Por otra parte, para la caracterización de la contaminación acústica por vehículos motorizados en la ciudad de Huacho [48] al selecciona la muestra con un nivel de confianza del 95%, obtuvo una muestra con un total de 383 vehículos, la evaluación de la variable en estudio se realiza a través de entrevistas. Pozo Huertas requiere 350 vehículos aproximadamente, que permiten medir el porcentaje de opacidad en fuentes móviles con motor a diésel según la norma NTE INEN 2 207:2002. Pozo Huertas [49] requiere 350 vehículos aproximadamente, que permiten medir el porcentaje de opacidad en fuentes móviles con motor a diésel según la norma NTE INEN 2 207:2002.

3.1 Tamaño de la muestra en algunos estudios

La siguiente tabla presenta una lista de varios tamaños de muestra en estudios de ruido vehicular. La Tabla 3 presenta la cantidad de vehículos por categoría y proporciona una breve descripción el estudio.

Tabla 3. Tamaños de muestra en algunos estudios de ruido vehicular

Referencia	Núm. de vehículos según su tipo	Total	Descripción
ISO 362	No se especifica el número de vehículos según su tipo. Se usaron vehículos europeos y japoneses tipo M1, N1, N2 y N3 de menos de 19 toneladas (52 manual, 9 automáticos)	61	Estudios de comportamiento de conducción de vehículos en uso
ISO 362	No se especifica el número de vehículos según su tipo	127	Análisis estadístico de la aceleración con el acelerador completamente abierto (Regresión)
JASIC, ACEA, SAE	No se especifica el número de vehículos según su tipo. Prueba para vehículos de las categorías M y N	+ 180	Precisión técnica y consideraciones prácticas por programas de prueba.
FHWA	La base de datos incluye automóviles (2 ejes y 4 llantas), camiones medianos (2 ejes y 6 llantas), camiones pesados (3 o más ejes y 6 o más llantas), autobuses (2 o 3 ejes y 6 o más	6000	Establecer un manual técnico sobre el modelo de predicción y análisis del ruido del tráfico en las carreteras TNM. Tiene en cuenta diferentes características de vehículos y carreteras.





Referencia	Núm. de vehículos según su tipo	Total	Descripción
	llantas) y motocicletas (2 o 3 llantas).		
Hamet et al. [50]	Vehículos ligeros clasificados de acuerdo con el comportamiento de conducción (velocidad, aceleración y desaceleración) como también su tipo de combustión (diésel o gasolina)	259	Modelo de predicción francés que considera las contribuciones de un componente de unidad de potencia, función de la velocidad del tráfico, tipo de flujo del tráfico y declive de la carretera, y de un componente de ruido de rodadura, función de la velocidad del tráfico y el pavimento de la carretera.
Cai et al. [51]	235 livianos, 58 medianos, 137 pesados	430	Establecen un modelo de emisión de intensidad de fuente de ruido de tráfico para una carretera de asfalto mojado basado en mediciones de ruido de tráfico, en el que la velocidad, el nivel de presión sonora y el espectro de frecuencia se registraron para el paso de un vehículo
Duffner et al. [52]	El sistema tiene la capacidad de detectar vehículos que pasan, estimar la velocidad, determinar ejes de vehículos individuales y el potencial para clasificar el tipo de vehículo. Pero no se especifica la clasificación.	+1000	Monitoreo del tráfico rodado mediante un array de dos micrófonos
Yang et al. [53]	1049 livianos, 210 medianos, 261 pesados, 88 buses	1608	Calcular el espectro de ruido del tráfico rodado basado en las características espectrales de ruido de diferentes tipos de vehículos
Abo-Qudais et al. [29]	El volumen y la composición del tráfico se grabaron con una cámara de vídeo, pero no se especifica el número de vehículos según su tipo	4745	Evaluación de la contaminación acústica del tráfico en las carreteras en las intersecciones señalizadas de Ammán. Se realiza un análisis estadístico y la evaluación de variables significativas.
Abo-Qudais et al. [30]	El volumen y la composición del tráfico se grabaron con una cámara de vídeo, pero no se especifica el número de vehículos según su tipo	14235	Modelar el ruido del tráfico en las intersecciones donde los parámetros que afectan el ruido y la interacción entre ellos son complejos.
Covaciu et al. [19]	Rotonda de 4 entradas idénticas y 3 carriles, con un volumen de tráfico de 1800 vehículos ligeros /	N/A	Estimación del nivel de ruido producido por el tráfico rodado en rotondas





Referencia	Núm. de vehículos según su tipo	Total	Descripción
	h, 1000 vehículos / h hacia adelante, 500 vehículos / h hacia la derecha y 300 vehículos / h hacia la izquierda.		

La selección y el tamaño de la muestra dependen del propósito de la investigación: sean estudios de comportamiento de conducción, homologación de vehículos, diseño de modelos de predicción de ruido o estimación de niveles de ruido producido por el tráfico rodado. Como se observa en la tabla anterior cuando las muestras son pequeñas los estudios están enfocados a mediciones de forma individual de los vehículos. Sin embargo, estos estudios no especifican las estimaciones para la selección de su muestra. Por el contrario, si las muestras son de tamaño considerable, se realizan mediciones a niveles de presión sonora en diferentes vías sin tener control de la cantidad de vehículos a medir ni las características de la muestra.

3.2 <u>Distribución del parque automotor del modelo LEAP en el valle de Aburrá</u>

En la selección de muestras representativas del parque automotor es de gran utilidad estudiar la distribución de los diferentes tipos de vehículos y características relevantes para el estudio. La aplicación del Modelo de Emisiones Atmosféricas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (MODEAM) desarrollada por el grupo de Investigaciones Ambientales de la Universidad Pontificia Bolivariana, en convenio con el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, presenta la siguiente distribución del parque automotor del valle de Aburrá para el año 2018 (ver Figura 3). En la distribución se diferencian 11 categorías de vehículos que componen el parque automotor. En este estudio se identifica la predominancia de motos y autos que representan el 53.3% y 38.3% del parque automotor respectivamente. Otras categorías de vehículos destacadas son los taxis (2%), los camiones (2%), las motos de 2 tiempos (1.3%) y los autos de servicio especial (1.2%).





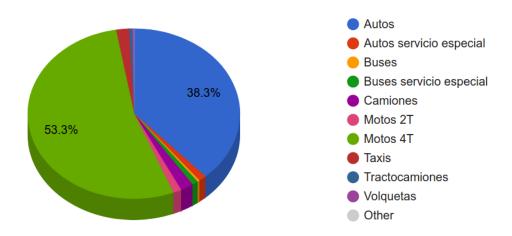


Figura 3. Distribución del parque automotor Valle de Aburrá, año 2018

Según el estudio, las motos de cuatro tiempos están distribuidas según su cilindraje en: livianas (24.8%), medianas (72.3%) y pesadas (2.9%). Para el caso de los autos, el cilindraje se distribuye en: livianos (41.3%), medianos (53.1%) y pesados (5.6%). En esta categoría, el 95.6% funcionan con gasolina, el 3.4% con Diesel y el 1% con gas natural. La distribución de los taxis según su combustible corresponde al: 92.4% con gasolina, el 7% con Diesel y el 0.6% con gas natural. En el caso de los camiones, el 59.3% funcionan con Diesel, el 34.1% con gasolina y el 6.6% con gas natural.

3.3 <u>Distribución del parque automotor según base de datos de fuentes móviles del</u> AMVA

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) proporcionó una base de datos de fuentes móviles correspondiente a una muestra del parque automotor en el valle de Aburrá con vigencia del día 10 de julio del 2021. La muestra cuenta con 10018 vehículos diésel, 11580 vehículos a gasolina y 1161 motos. La distribución de los vehículos diésel según sus categorías se presenta en la Figura 4. En este caso se observa que las categorías más representativas del grupo de vehículos a diésel son: camiones (54%), camionetas (26%), buses (8%), microbuses (5%), busetas (3%) y volquetas (3%).



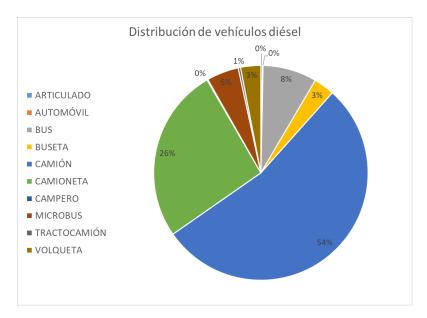


Figura 4. Distribución de los vehículos diésel de la muestra proporcionada por el AMVA

La distribución de los vehículos a gasolina según sus categorías se presenta en la Figura 5. De los vehículos a gasolina se observan que: el 76% corresponden a automóviles, el 20% son camionetas y el 3% camperos.

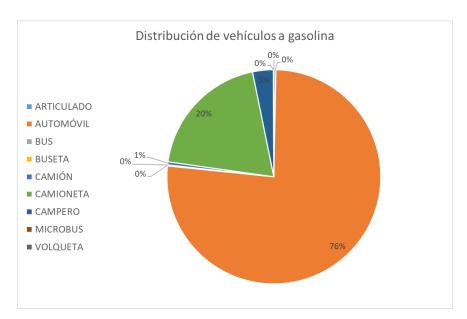


Figura 5. Distribución de los vehículos a gasolina de la muestra proporcionada por el AMVA





Un histograma para motocicletas según su cilindraje se presenta en la Figura 6. Podemos observar que la mayor cantidad de motocicletas registradas para esta muestra cuentan con un cilindraje entre 94 y 184 centímetros cúbicos.

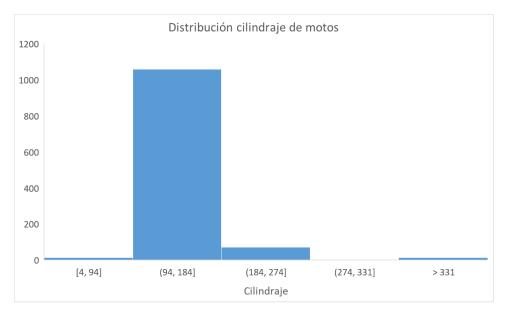


Figura 6. Distribución de las motocicletas según su cilindraje (muestra proporcionada por el AMVA)

4. Estado del arte

4.1 Legislación en torno a la emisión de ruido de vehículos de carretera

4.1.1 Unión Europea y Reino Unido

Los niveles de ruido aceptados en procesos de homologación de vehículos se establecen en el Reglamento (UE) 540/2014 [54] para vehículos de categorías M y N, y el Reglamento (UE) 168/2013 [55] para vehículos de la categoría L. Estos reglamentos describen los límites de los niveles de sonido de los vehículos de carretera y proporcionan un procedimiento para medir los niveles de sonido de vehículos en movimiento (ruido de paso) y de los sistemas de escape y silenciadores en estado estacionario. La Comisión Europea ha propuesto reducir los niveles de ruido en alrededor de un 25% por lo que establecen niveles más restrictivos para el futuro. Según el reglamento 540, el nivel sonoro para vehículos de categoría M (Vehículos utilizados para el transporte de pasa-jeros) y N (Vehículos utilizados para el transporte de mercan-cías) no deberá superar los límites para vehículos en movimiento que encuentran en la siguiente tabla





Tabla 4. Niveles límite estipulados en el reglamento 540/2014

Categoría Vehículo	Descripción de la categoría	Valores límite en dB(A)		
		Fase 1 aplicable a los nuevos tipos de vehículos a partir del 1 de julio de 2016	Fase 2 aplicable a los nuevos tipos de vehículos a partir del 1 de julio de 2020 y a la primera matriculación a partir del 1 de julio de 2022	Fase 3 aplicable a nuevos tipos de vehículos a partir del 1 de julio de 2024 y a la primera matriculación a partir del 1 de julio de 2026
	relación potencia/masa ≤ 120 kW/1000 kg	72	70	68
	120 kW/1000 kg < relación potencia/masa ≤ 160 kW/1000 kg	73	71	69
M1	160 kW/1000 kg < relación potencia/masa	75	73	71
	relación potencia/masa > 200 kW/1000 kg número de asientos ≤ 4 punto R del asiento del conductor ≤ 450 mm desde el suelo	75	74	72
	masa ≤ 2500 kg	72	70	69
M2	2500 kg < masa ≤ 3500 kg	74	72	71
	3500 kg < masa ≤ 5000 kg potencia nominal del motor ≤ 135 kW	75	73	72





Categoría Vehículo	Descripción de la categoría		Valores límite en d	B(A)
	3500 kg < masa ≤ 5000 kg potencia nominal del motor > 135 kW	75	74	72
	potencia nominal del motor ≤ 150 kW	76	74	73
М3	150 kW < potencia nominal del motor ≤ 250 kW	78	77	76
	potencia nominal del motor > 250 kW	80	78	77
	masa ≤ 2500 kg	72	71	69
N1	2500 kg < masa ≤ 3500 kg	74	73	71
N2	potencia nominal del motor ≤ 135 kW	77	75	74
INZ	potencia nominal del motor > 135 kW	78	76	75
	potencia nominal del motor ≤ 150 kW	79	77	76
N3	150 kW < potencia nominal del motor ≤ 250 kW	81	79	77
	potencia nominal del motor > 250 kW	82	81	79





El Reglamento 51 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE/ONU) [56] describe los procedimientos que deben adoptarse para la evaluación del ruido durante la homologación de los vehículos de motor que tienen al menos cuatro ruedas. Durante el proceso de homologación de tipo, se sigue un método de medición basado en la norma ISO 362. Disposiciones adicionales sobre emisiones sonoras (ASEP) introduce una prueba que es más representativa de la conducción en la vida real, especialmente en entornos urbanos. El procedimiento de las ASEP requiere cuatro ejecuciones de prueba adicionales para medir el ruido del vehículo que pasa a cuatro velocidades diferentes para cada marcha. En la homologación de tipo también se lleva a cabo una prueba estacionaria que se basa en la norma ISO 5130 para verificar los niveles de ruido. La regulación 41 de la CEPE/ONU [57] presenta las disposiciones uniformes relativas a la homologación de motocicletas en materia de ruido. Similar al Reglamento 51, las emisiones de ruido se miden utilizando los métodos definidos por las normas ISO 362 e ISO 5130. Solo el resultado de la prueba de aceleración se utiliza a efectos de homologación. Los reglamentos 9 y 63 de la CEPE/ONU [58, 59] establecen los límites de emisión de ruido para vehículos de tres ruedas y ciclomotores respectivamente. Los límites de ruido están alineados con los descritos en el Reglamento (UE) 168/2013.

4.1.2 Estados Unidos

Estados unidos cuenta con la norma de emisión de ruido de vehículos a bajas velocidades [60] la cual se encuentra en el Código de Regulaciones Federales. Esta norma aplica para vehículos medianos y pesados, la cual establece que vehículos que se fabriquen después de las siguientes fechas de vigencia se diseñarán, construirán y equiparán de manera que no produzcan emisiones sonoras superiores a los niveles indicados en la Tabla 5. El procedimiento de medición esta descrito en la sección 40 CFR 205.54-1 [61] del mismo código.

Tabla 5. Norma de emisión para vehículos medianos y pesados en EU

Fecha efectiva	Nivel dB(A)
Enero 1, 1979	83
Enero 1, 1988	80

El sitio de medición debe cumplir con las dimensiones que muestra la Figura 7. La superficie de la carretera dentro del sitio de prueba sobre el que viaja el vehículo y, como mínimo, el área de medición (BCD) debe ser de hormigón liso o asfalto sellado liso, libre de materiales extraños como grava.





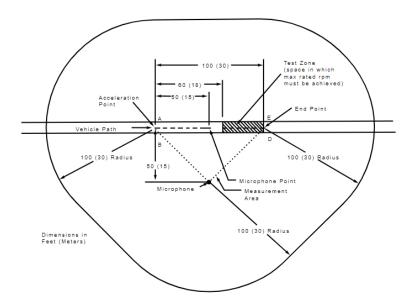


Figura 7. Dimensiones de la pista de pruebas para la norma de emisión de ruido de vehículos en EU

El Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI) no tiene directamente asociado un procedimiento de medición de ruido en vehículos. El ANSI relaciona las normas ISO 10844, 362 y 5130 en su sitio web.

4.1.3 Latinoamérica

El decreto 7 de 2015 del Ministerio del Medio Ambiente de Chile establece la norma de emisión de ruido para vehículos nuevos, clasificados como: livianos, medianos y motocicletas [62]. Esta norma forma parte del proceso de homologación de vehículos. La norma contempla, adicionalmente, el ensayo de vehículos en estado estacionario para medir el ruido al momento del ingreso de los vehículos, con fines de registro. El decreto menciona que los datos obtenidos mediante medición permitirán analizar la pertinencia de extender la normativa a los vehículos en uso. Los niveles límite de emisión de ruido para vehículos livianos, medianos y motocicletas para ensayos dinámicos se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 6. Niveles máximos estipulados en el decreto 7 de Chile, para vehículos livianos y medianos

Vehículo Para transporte de		Características (número de asientos, peso bruto vehicular PBV (t) y potencia del motor (KW))			SPL máximo dB
		Asientos	PBV (t)	Potencia del motor	(A) "F"
Liviano	Pasajeros	≤ 9	-	-	74





		> 9	≤2	-	76
		> >	> 2 y < 2.7	-	77
	Comercial		≤ 2	-	76
	Comercial	-	> 2 y < 2.7	-	77
	≤ 9	-	-	74	
	Pasajeros	> 9	≤ 3.5	-	77
			0.5	< 150	78
Mediano			> 3.5	> 150	80
iviediano		≥ 2.7 y < 3.5	-	77	
Carra	Corgo	-	≥ 3.5	< 75	77
	Carga			≥ 75 y < 150	78
				≥ 150	80

Tabla 7. Niveles máximos estipulados en el decreto 7 de Chile, para motocicletas

Cilindraje (centímetros cúbicos)	SPL máximo dB (A) "F"
≤ 80	75
80 > < 175	77
≥ 175	80

El Ministerio de Medio Ambiente del gobierno de Chile establece el protocolo técnico sobre procedimientos de medición de ruido de vehículos livianos, medianos y motocicletas para ensayos dinámico y estacionario [63]. Para el caso del ensayo dinámico se proponen metodologías de la Unión Europea, China, Estados Unidos y Brasil. Adicionalmente, se incorpora un método alternativo de ensayo, el cual se basa en el estándar ISO 362 (partes 1 y 2). Para el caso del ensayo estacionario, se establece la utilización del procedimiento presente en la norma ISO 5130:2007.

A través del Decreto Supremo 129 del año 2002 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones de Chile [64], se establece la norma de emisión de ruido para buses de locomoción colectiva urbana y rural. Las mediciones respectivas siguen el protocolo técnico sobre los procedimientos de medición de ruido de buses de Locomoción colectiva urbana y rural aplicables a los ensayos dinámico y estacionario [65]. Para ambos ensayos, se especifican las condiciones del lugar de ensayo (físicas y ambientales), características y configuración del equipamiento, así como las condiciones de operación del bus a certificar.





La norma oficial mexicana NOM-079-ECOL-1994 [66], establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de los vehículos automotores nuevos en planta y el respectivo método de medición. Esta norma establece los procedimientos de medición de vehículos en estado dinámico para una prueba de aceleración y otra de desaceleración. Los límites máximos permisibles de emisión de ruido se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 8. Niveles máximos de emisión para vehículos automotores según la norma NOM-079-ECOL-1994 (estado dinámico)

Peso bruto vehicular	Límites máximos permisibles dB(A)
Hasta 3000 kg	79
Más de 3000 kg y hasta 10000 kg	81
Más de 10000 kg	84

La norma oficial mexicana NOM-082-ECOL-1994 [67], establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las motocicletas y triciclos motorizados nuevos en planta y su método de medición. En el procedimiento de medición, el vehículo se aproxima al punto de aceleración a una velocidad de 40 km/h para motocicletas con transmisión automática y a las X/2, partes de las revoluciones por minuto (r.p.m.) de máxima potencia del motor para motocicletas de transmisión estándar, se acelera al máximo cuando el frente de la rueda delantera se encuentre sobre el punto de aceleración definido. Los límites máximos permisibles de emisión de ruido para este tipo de vehículos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 9. Niveles máximos de emisión para motocicletas según la norma NOM-082-ECOL-1994 (estado dinámico)

Desplazamiento del motor en centímetros cúbicos	Límites máximos permisibles dB(A)
Hasta 449	86
de 450 en adelante	89

La norma oficial mexicana NOM-080-ECOL-1994 [68] establece 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. El proceso de medición consiste en varias pruebas con el vehículo en estado estacionario. Los niveles máximos de emisión para automóviles, camionetas, camiones y tractocamiones se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 10. Niveles máximos de emisión para vehículos automotores según la norma NOM-080-ECOL-1994 (estado estacionario)

Peso bruto vehicular	Límites máximos permisibles dB(A)	
Hasta 3000 kg	86	





Más de 3000 kg y hasta 10000 kg	92
Más de 10000 kg	99

Los niveles máximos permisibles de motocicletas y triciclos motorizados se listan en la siguiente tabla:

Tabla 11. Niveles máximos de emisión para motocicletas según la norma NOM-082-ECOL-1994 (estado estacionario)

Desplazamiento del motor en centímetros cúbicos	Límites máximos permisibles dB(A)
Hasta 449	96
de 450 en adelante	99

La emisión de ruido de automóviles, motocicletas, camiones, autobuses y maquinaria vial en Brasil es manejada por el Programa Nacional de Control de Ruido de Vehículos. Dicho programa, establece los límites máximos de ruido para vehículos de motor nuevos que son vendidos en Brasil. También prevé criterios a ser utilizados en futuros programas de inspección e inspección de vehículos en circulación. El control de vehículos nuevos se realiza de acuerdo con la norma ABNT NBR 15145: 2004 [69]. Los resultados se analizan durante el proceso de homologación del vehículo, junto con el análisis de los resultados de las emisiones de escape. Para el caso de las mediciones de vehículos en estado estacionario, la legislación brasileña presenta la norma técnica NBR 9714 [70], la cual está basada en el protocolo de medición propuesto en la ISO 5130.

La norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2665 del 2013 [71] proporciona un método de medición de la emisión de ruido de vehículos en aceleración. Esta norma se aplica solamente a vehículos automotores de las categorías L, M y N equipados con motores de combustión interna. La NTE 2665 se basa en el estándar ISO 362 para reproducir los niveles de ruido en el flujo de tráfico urbano de carácter irregular, que requiere el uso de velocidades intermedias con utilización total de la potencia disponible del motor. La superficie de la pista de pruebas debe cumplir los requisitos que indica la norma ISO 10844.

4.2 Estudios en Colombia sobre emisión de ruido vehicular

La investigación acerca de la emisión de ruido vehicular en Colombia se encuentra enfocada a las mediciones de ruido ambiental y la modelación de mapas de ruido. Una de las estrategias de utilidad ha sido la caracterización de los niveles de ruido emitidos en diferentes zonas y en diferentes horarios como lo son horas pico o mediciones nocturnas. En este proceso se obtienen varias muestras de niveles de presión sonora y a su vez un aforo vehicular del tipo de vehículos que transita durante la medición, teniendo en cuenta clasificación de estos vehículos en una sección de carretera.





Con el fin de realizar un modelo para caracterizar el ruido vehicular emitido en las intersecciones de la ciudad de Cartagena, Bolaños et al. [72] utiliza el modelo CORTN. Dadas las características del tráfico rodado de esta ciudad fue necesario adicionar una categoría para las motocicletas, ya que estas representan el 30% de los vehículos. Se realizaron mediciones de nivel de presión sonora en 3 horarios diferentes durante 8 días para diferentes intersecciones. Estas mediciones se presentaron en intervalos de 15 minutos, a su vez se monitoreó el tráfico rodado clasificándose en 3 categorías: automóviles (automóviles, minivans y autocaravanas), motocicletas, vehículos pesados (camiones, ambulancias y cualquier otro vehículo con más de cuatro ruedas). Durante las mediciones se observó velocidades por debajo de los 40 km/h. Los límites de emisión se dan de acuerdo con la Resolución nacional 0627 de 2006. Se encontró que en la mayoría de los puntos de medición, no se cumple con los niveles máximos permitidos de acuerdo con los usos del suelo.

Quintero et al. [73] presenta resultados de la caracterización del ruido producido por el tráfico vehicular en el centro de la ciudad de Tunja, Colombia. Se realizaron mediciones durante 2 semanas en diferentes horarios entre las 7:00 a.m. y las 7:00 p.m. Se encontró que los picos en los niveles de presión sonora no están directamente relacionados con el alto flujo vehicular. Estos se deben al aumento de volumen de vehículos con características específicas como lo son los vehículos de transporte público, particulares y taxis.

En su tesis doctoral, Ramírez [74] realiza un estudio sobre la caracterización y modelación micro y macroscópica del ruido vehicular en la ciudad de Bogotá. Se realizaron mediciones de presión sonora en días laborales, sin lluvia y con el pavimento seco al largo de en diferentes vías de la ciudad. Dentro de los resultados encontrados se evidencia que los niveles de ruido generados por el sistema de transporte masivo convencional con respecto al sistema de transporte Transmilenio, generan niveles de ruido similares. Esto se puede presentar ya que este último, recorre las vías a mayor velocidad y con mayor número de llantas por vehículo.

Murillo et al. [75], evaluaron el método de cálculo alemán para la predicción del ruido de la carretera y de los estacionamientos RLS 90 y predecir el ruido automotor en condiciones colombianas por medio de la modelación de mapas de ruido. Con el fin de realizar una validación de los resultados obtenidos, las simulaciones se compararon con la energía reflejada en los edificios contiguos a la carretera asumiendo una velocidad de 100 km/h para automóviles y 80 km/h para camiones, una superficie de la carretera compuesta de asfalto no techado, una pendiente menos de 5% y propagación en campo libre. Se realizó un aforo vehicular durante las mediciones de acuerdo con la norma nacional de ruido ambiental (Resolución 0627 del 2006). Como condición de validez, se determinó una diferencia máxima de 3 dB entre el valor simulado y el medido. Cada medición de ruido se





referencia geográficamente, con el fin de crear una superficie continua mediante un método de interpolación. Esta comparación muestra que la técnica de interpolación proporciona una estimación global de los niveles de ruido, pero no permite que las fuentes generadoras sean determinadas con precisión. La principal razón es porque esta metodología utiliza como insumo el nivel de ruido en las posiciones del receptor sin considerar el tipo de fuente y su emisión.

4.3 Otros estudios en emisión de ruido vehicular

Asensio et al. [76] presentan un método de cálculo de la emisión de ruido que permite separar la contribución de un vehículo específico a la contaminación acústica general en un entorno urbano. El coste del ruido puede asignarse a un vehículo en función de factores como el número de personas a las que afecta, la distancia recorrida y el tiempo de viaje, la forma de conducción, el tipo de vehículo y neumáticos. La metodología propuesta se puede adaptar a diferentes modelos de emisión y propagación de ruido. Se seleccionó como base el marco CNOSSOS-EU para su compatibilidad con la estrategia europea para el modelado del ruido. El método permite un análisis de emisión en función del tiempo, donde se define una ventana de tiempo en la que se toman las coordenadas espaciales del vehículo. Durante esta ventana de tiempo, el vehículo, según su velocidad, recorre un segmento de longitud L, lo que permite discretizar la ruta del vehículo. En cada uno de estos segmentos, se determina la potencia sonora emitida en función de la velocidad de conducción, según el modelo de emisión definido. El segmento se modela utilizando una fuente puntual ubicada en el punto medio del segmento. La validez del método fue probada en un área pequeña y controlada, lo que permitió obtener mapas dinámicos de ruido generados por un vehículo, tanto instantáneos como acumulados.

Can et al. [77] comparan varios modelos de emisión de ruido para la estimación de la potencia acústica de los vehículos ligeros y los niveles de presión acústica resultantes. Se realiza un análisis de la sensibilidad de los modelos Imagine, ASJ-RTN, FHWA y NMPB a las variables cinemáticas del vehículo. El análisis se basa en la recopilación de datos de tráfico real de la trayectoria del vehículo en el Lankershim Boulevard, en Los Ángeles, durante 32 min. También se estudian las diferencias entre modelos que incluyen la aceleración de los vehículos y los que no. En la comparación se encuentran los modelos: Co-RTN, SonRoad, RLS-90, NMPB, Harmonoise, Nord 2000, Imagine, CNOSSOS, FHWA, ASJ-RTN. La revisión realizada encuentra que los modelos deben ser más sensibles a la cinemática del vehículo para estimar con las emisiones. Esto requiere de datos del tráfico que pueden aumentar el riesgo de errores en caso de no ser registrados con precisión. El estudio encontró que los modelos de emisión de ruido podrían estimar incorrectamente los niveles de ruido en situaciones de congestión. Este sesgo podría reducirse introduciendo variables de tráfico adicionales en el modelo. Los modelos que se basan en una





representación binaria de los regímenes de aceleración (un vehículo o un tramo de carretera está acelerando o no) pueden conducir a errores en la práctica. Los modelos que se utilizan en Europa tienen una sensibilidad muy baja a los valores de aceleración. Estos resultados ayudan a fundamentar mejoras necesarias para modelos de ruido del tráfico rodado.

Un caso de estudio que analiza la relación entre el peso de camiones pesados y el ruido del tráfico para establecer la viabilidad de las multas por exceso de ruido se presenta en [78]. Se realizaron simultáneamente mediciones del ruido, volumen del tráfico y peso en movimiento. La sección de la carretera era recta, sin obstáculos, sin inclinación y los vehículos circulaban a velocidad constante. Mediante sensores se logró clasificar los vehículos en: Bicicleta, Motocicleta, Coche compacto, Vehículo de pasajeros, Furgoneta de reparto (hasta 3.5 toneladas), Coche con remolque, Camión (más de 3.5 toneladas), Camión con remolque, Tractor remolque y Autobús. Se incorporaron los datos de peso medidos en los datos de los vehículos para hacer un análisis según el tipo de vehículo y según la carga. El caso de estudio determinó que los vehículos pesados tienden a generar más ruido si están sobrecargados, siendo los camiones con remolques sobrecargados, los vehículos más ruidosos. Las multas podrían estar directamente relacionadas con los vehículos sobrecargados, ya que generan en promedio 1,5 dB más de ruido que los cargados legalmente.

Yang et al. [53] proponen un método de cálculo del espectro de ruido del tráfico basado en las características espectrales de vehículos individuales. Los vehículos en la muestra se clasificaron en 4 categorías según su peso bruto. La velocidad de conducción es se divide en intervalos de 2km/h. Se recopilaron datos de emisión de ruido de un gran número de vehículos a diferentes velocidades. Posteriormente, se calculó la tasa de contribución de energía espectral de cada tipo de vehículo en cada intervalo de velocidad. Aplicando el modelo de emisión de ruido del vehículo, se calculó el espectro de ruido de un solo vehículo. Finalmente, con los volúmenes de tráfico y la distribución de velocidad del flujo de tráfico en la sección de la carretera, se calculó el espectro de ruido del flujo de tráfico. Los resultados indican que cuando se concentra la velocidad del flujo de tráfico, se puede adoptar la velocidad promedio debido a la mejora de la eficiencia del cálculo. Pero si la velocidad del flujo de tráfico fluctúa mucho, es una mejor opción calcular el espectro de ruido por la distribución de velocidad. Sin embargo, algunas de las limitaciones que presenta esta investigación se debe a que se no tuvieron en consideración las características de la superficie de la carretera (índice de rugosidad), el tipo de pavimento y el estado de desgaste.

Skrucany et al. [79] realizan mediciones de la intensidad del ruido exterior de un vehículo en movimiento con el objetivo de verificar las especificaciones técnicas de vehículos de una





muestra. Se seleccionan 10 tipos de vehículos diferentes los cuales se midieron bajo el protocolo que sugiere la Directiva del Consejo 71/157 / CEE. Los resultados de esta investigación muestran que los niveles de ruido obtenidos en las mediciones son superiores a los declarados en las especificaciones técnicas de los vehículos, esto se puede dar a variables como las llantas utilizadas o el tipo de rodadura donde se realiza dicha prueba. Las superficies hechas de paneles de hormigón más antiguos tienden a ser más ruidosas que las capas de asfalto.

4.4 Emisión de ruido de vehículos de combustible alternativo

La creciente demanda de vehículos de combustible alternativo, tales como, los vehículos híbridos y eléctricos ha incrementado en los últimos años. La emisión de ruido de vehículos de combustible alternativo es significativamente menor a comparación de los vehículos a combustión. En condiciones de baja velocidad, los vehículos híbridos y eléctricos no emiten niveles significativos de ruido y pueden representar un riesgo para la seguridad de personas ciegas o con discapacidad visual, peatones o ciclistas [80]. El problema de los vehículos silenciosos se aborda en un nuevo reglamento adoptado por el Foro Mundial de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE) para la armonización de las reglamentaciones de vehículos (WP.29). El reglamento requiere la implementación de dispositivos de alerta acústica en vehículos híbridos y eléctricos con el objetivo de minimizar el riesgo que plantean los vehículos silenciosos. Según el reglamento, el sistema de alerta debe generar ruido artificial para velocidades entre los 0 y 20 km/h, ya que el ruido de las llantas-carretera es audible a velocidades superiores a los 20 km/h.

Ibarra et al. [81] presentan un caso de estudio para caracterizar y cuantificar el nivel de ruido emitido por vehículos de combustibles alternativos, como híbridos y eléctricos, tanto en campo cercano y lejano. Se realizaron pruebas en un circuito suburbano y urbano con diferentes conductores y con diferentes modos de conducción. Para cada prueba se registra la evolución temporal del nivel de presión sonora equivalente de un segundo (Leq, 1s), el nivel equivalente (Leq), los histogramas de nivel y los niveles de ruido estimados en el campo lejano de los recorridos suburbanos y urbanos. En el estudio se usó un Toyota Prius híbrido y un Nissan Leaf eléctrico. Para las mediciones de campo cercano se usaron dos micrófonos, uno cerca al motor y otro cerca de una de las llantas. Las mediciones de campo lejano se realizaron siguiendo el estándar ISO 11819-4. Los resultados experimentales de este trabajo demuestran que los motores híbridos y eléctricos han hecho importantes contribuciones a la reducción del ruido del motor en el tráfico suburbano y urbano en comparación con vehículos diésel o gasolina. Sin embargo, el ruido de la interacción llantas-carreteras sigue siendo la fuente principal de ruido, especialmente en carreteras suburbanas de alta velocidad.

4.5 <u>Tecnologías para la medición de ruido de vehículos</u>





4.5.1 Arreglos de micrófonos

El método de diferencia de tiempo de llegada es extensivamente empleado para la localización de fuentes acústicas. Los arreglos de dos o más micrófonos permiten obtener la dirección de la fuente utilizando la función de correlación cruzada entre la señal de cada micrófono. Un arreglo de micrófonos está compuesto generalmente por micrófonos omnidireccionales y/o direccionales conectados a un dispositivo de procesamiento de señales que permite la interpretación en coherencia de la información. En el ámbito del ruido vehicular, los arreglos de micrófonos tienen aplicación principalmente en la localización acústica de fuentes y el monitoreo del ruido ambiental.

Duffner et al. [52] presentan una técnica de monitoreo para tráfico rodado, basada en dos micrófonos omnidireccionales para detectar y localizar patrones. Este método utiliza la fase de espectro de potencia cruzado del algoritmo de correlación cruzada generalizado para la estimación del retardo de tiempo para enfatizar el paso de fuentes de sonido de banda ancha. Datos del flujo de tráfico, tales como, ubicación, velocidad y densidad de los vehículos, se extraen mediante el reconocimiento de patrones creativos. Se realizaron experimentos con señales acústicas de tráfico de más de 1000 vehículos registrados a partir de datos de tráfico real para validar el método. El paso del 81% de los vehículos fue detectado correctamente, y la dirección de los vehículos tuvo una precisión del 84,3%.

Blake et al. [82] presentan un método para la caracterización del ruido de paso en vehículos pesados, basado en un arreglo de micrófonos bidimensionales. El enfoque proporciona mapas cuantitativos bidimensionales de la distribución transversal y de elevación en la vista lateral del vehículo. El método se presenta como una extensión de los arreglos de micrófonos utilizados originalmente en la caracterización de fuentes aeroacústicas estáticas en túneles de viento. El estudio se enfoca en la identificación de las principales fuentes de ruido que contribuyen al ruido de paso de vehículos pesados. El seguimiento de vehículos se realizó con fotoceldas colocadas a lo largo de la pista de pruebas. Las señales de paso y los niveles de ruido se registraron simultáneamente para trazar un mapa de la posición del camión y la dinámica de los niveles del ruido de paso. Los mapas de fuentes acústicas obtenidos del procesamiento de las señales del arreglo se superpusieron en fotografías de las vistas laterales del camión tomadas durante el paso. El sistema de medición fue validado utilizando fuentes estacionarias y móviles en una pista de pruebas. Posteriormente se realizaron mediciones en dos sitios de carreteras del estado de California. Este estudio demostró que la tecnología basada en arreglos de micrófonos es factible, tanto en la pista de pruebas de vehículos como en la carretera.

Ballesteros et al. [83] consideran la aplicación de Beamforming para mediciones del ruido de paso en vehículos de carretera. Esta técnica permite localizar las principales fuentes de ruido durante el paso de un automóvil y la caracterización en términos de fuerza de la





fuente. Se utilizó un arreglo plano de 56 micrófonos con 28 micrófonos adicionales, ubicados en 8 brazos externos unidos a una matriz central. En la medición se utilizó un sistema Brüel y Kjaer con barreras de luz que emite una señal de activación para iniciar y detener la medición. Para validar la precisión del método, se realizaron mediciones de paso, en dos vehículos de tamaño medio, comparando los resultados obtenidos con otros en la literatura que usan diferentes técnicas de medición. Se realizó un análisis de las principales fuentes, obteniendo sus espectros, nivel de presión sonora, dependencia de la marcha, la velocidad y el número de Strouhal. Los resultados muestran una buena concordancia y alta precisión para analizar el ruido de paso de un automóvil. Sin embargo, se debe tener en cuenta la mala resolución a baja frecuencia y la influencia de los lóbulos laterales a alta frecuencia del sistema de Beamforming. De este modo, el rango de frecuencia de interés se restringió desde la banda de un tercio de octava de 800 Hz a la banda de un tercio de octava de 6300 Hz.

4.5.2 Sonda de velocidad de partícula p-u

Esta tecnología permite la identificación de fuentes, la medición de intensidad acústica y la medición de potencia acústica en condiciones operativas. Debido a que las mediciones se realizan en campo cercano, la sonda p-u es poco sensible al ruido de fondo y a las reflexiones. Las pruebas in situ de intensidad sonora no requieren condiciones de campo libre. De este modo son posibles donde las condiciones anecoicas no son aplicables, tales como el interior de un automóvil o el compartimiento del motor. La sonda de intensidad Microflown p-u combina un micrófono de presión y un transductor de velocidad de partículas que miden directamente cerca de la superficie de la fuente el valor escalar de 'presión sonora' y el valor vectorial 'velocidad de partículas acústicas' simultáneamente.

La sonda p-u es utilizada en problemas de identificación de fuentes de ruido de vehículos, permitiendo el análisis de diferentes fuentes en el vehículo, tales como, el compartimiento del motor adoptando el método Scan & Paint. Este tipo de tecnología también se puede utilizar para el análisis de contribución de ruido de panel, el análisis de la ruta de transferencia del sonido en el interior del automóvil, o la medición de la absorción in situ para el análisis de las propiedades acústicas de los materiales que permiten mejorar la calidad acústica y el confort en un vehículo de carretera.

Las señales acústicas del campo sonoro se adquieren escaneando manualmente la superficie emisora con la sonda, mientras se coloca una cámara de video hacia la superficie para registrar espacialmente el escaneo. La posición del sensor en la imagen se extrae aplicando seguimiento de color automático a cada cuadro del video grabado. Esta técnica permite la visualización directa de las variaciones de sonido en el espacio, en términos de presión sonora, velocidad de partículas o intensidad acústica. El estándar ISO 9614





presenta varios métodos de medición de la potencia acústica a través de la intensidad acústica utilizando una sonda de intensidad.

Fernandez et al. [84] propone dos técnicas basadas en la velocidad de partícula para caracterizar el sonido irradiado por un motor instalado de un automóvil. Se utilizaron una serie de sondas especiales de velocidad de partículas de alta temperatura para medir la radiación simultáneamente en muchas posiciones cerca del motor. Este estudio presenta una descripción de las sondas, el montaje utilizado y las acciones tomadas para hacer frente a perturbaciones como los flujos de aire. La presión de sonido efectiva se calculó analizando la ruta de transferencia del sonido, usando la velocidad de partícula y la potencia acústica. Los datos obtenidos se compararon con mediciones obtenidas en cámara anecoica con el motor desmontado. Se demostró que se pueden obtener resultados similares con ambos métodos. La metodología basada en la potencia del sonido demostró mayor practicidad.

4.6 Dosimetría

La dosis de Ruido se define como la cantidad de energía sonora que un oído normal puede recibir durante la jornada laboral para que el riesgo de pérdida auditiva al cabo de un día laboral esté por debajo de su valor establecido. Mediante un análisis de dosimetría busca determinar la dosis de ruido acumulado al que expuesto trabajador, independientemente de donde haya estado y el tiempo que allí haya permanecido. El estándar internacional ISO 9612 [85] especifica un método de ingeniería para medir la exposición de los trabajadores al ruido en un entorno de trabajo y calcular el nivel de exposición al ruido. Se debe seleccionar una estrategia de medición basada en tareas, en el trabajo o medición de la jornada. Cualquiera que sea la elección, se requiere un análisis completo del trabajo. Se puede usar más de una estrategia de medición, si es relevante.

En el método de medición de jornada completa el trabajador objeto de estudio dispone de un dosímetro durante toda su jornada laboral. Si es el único en ser medido esta medición deberá realizarse nuevamente en otros dos días para obtener las tres muestras que constituyen un mínimo para la evaluación de la incertidumbre de la medición; alternativamente, se puede medir en otros dos trabajadores que realizan el mismo trabajo. El método de medición de día completo fue diseñado como uno de los favoritos por los miembros norteamericanos del grupo de trabajo. El método de medición basado en tareas requiere que el medidor divida el trabajo de cada tipo de trabajador en tareas. De acuerdo con la norma ISO 9612 [85], se requiere un mínimo de 3 mediciones para cada tarea (aunque eventualmente se puede requerir un número mayor de acuerdo con la desviación estándar de las mediciones). El método de medición basado en el trabajo está destinado a evitar la complicación de evaluar la duración de las tareas. Un trabajo realizado por un individuo se compone de varias tareas; Una de las seguridades inherentes a este método





es que en caso de que el medidor o el trabajador olviden pequeños eventos ruidosos, se tendrán en cuenta siempre que el tiempo de medición sea lo suficientemente largo. De acuerdo con la norma ISO 9612 [85], se requiere un mínimo de 5 mediciones para cada trabajo (aunque eventualmente se puede requerir un número mayor de acuerdo con la desviación estándar de las mediciones). Posteriormente, la cantidad de medición básica será Lp, A, eqT. Además, se medirá Lp, Cpeak, si procede. Las mediciones deberán seguir la estrategia elegida como se especifica en el estándar. Se calcula LEX, 8h como se especifica para la estrategia seleccionada y la incertidumbre. Los resultados y las incertidumbres pueden calcularse utilizando la hoja de cálculo proporcionada con esta Norma Internacional.

En el ámbito nacional si bien no se cuenta con una regulación que establezca el protocolo de medición, el Artículo primero de la Resolución 1792 [86] regula límites permisibles para la exposición ocupacional al ruido.

- Exposición durante ocho (8) horas: 85 dBA.
- Exposición durante cuatro (4) horas: 90 dBA.
- Exposición durante dos (2) horas: 95 dBA.
- Exposición durante una (1) hora: 100 dBA.
- Exposición durante media (1/2) hora: 105 dBA.
- Exposición durante un cuarto (1/4) de hora: 110 dBA.
- Exposición durante un octavo (1/8) de hora: 115 dBA.

Además de esto, la Resolución 2400 de 1979 Artículo 88 y 89 [87], emitidas por el ministerio de trabajo y seguridad social, indican que en todos los establecimientos de trabajo en donde se produzcan ruidos, se deberán realizar estudios de carácter técnico para ampliar sistemas que puedan reducirlos o amortiguarlos. El nivel máximo admisible para ruidos de carácter continuo en los lugares de trabajo será de 85 dB de presión sonora, medidos en la zona en la que el trabajador habitualmente trabaja. En donde la intensidad del ruido sobrepase el nivel máximo permisible, será necesario efectuar un estudio ambiental promedio con instrumentos que determinen el nivel de presión sonora y la frecuencia.

4.7 Modelación del ruido vehicular

Los modelos de predicción de ruido tienen como objetivo resaltar la influencia de las variables cinemáticas en los niveles de potencia acústica. Las principales diferencias entre los modelos se encuentran en el parque de los vehículos medidos, que pueden diferir de un país a otro (proporción de vehículos diésel, cargas medias del motor, etc.), y las variables cinemáticas tenidas en cuenta, es decir, la velocidad y aceleración. La clasificación de este parque automotor se realiza de acuerdo con las características de la zona o la clasificación que sugiere el modelo. Por ejemplo, el modelo Harmonoise considera 5 categorías de vehículos (vehículos livianos, vehículos medianos pesados, vehículos pesados, otros





vehículos pesados y vehículos de dos ruedas) y luego se dividen en 18 subcategorías [88]. Para cada categoría de vehículo, se realiza un protocolo de medición, en la que el nivel sonoro máximo ponderado A-LAmax se mide a una distancia de referencia dada de la carretera como sucede en el modelo de predicción RLS-90 [89]. Estos niveles máximos pueden convertirse en el nivel de potencia acústica Lw emitida por el vehículo, asumiendo una fuente omnidireccional y una supuesta duplicación de energía del suelo [77].

Reino Unido, Hong Kong, Australia, Nueva Zelanda e India utilizan como referencia el modelo CoRTN [90]. Este modelo presenta los vehículos en 2 categorías: vehículos ligeros y pesados. Calcula los valores de LA10 (nivel de presión sonora ponderado A que se supera durante el 10% del período de medición) a una distancia de referencia de 10 m. Además, está enfocado en tramos de carretera donde los vehículos se encuentran a velocidades constantes y no tiene en cuenta las fases de aceleración y de emisión para las condiciones urbanas al vincular LA10 a los índices de flujo de la desaceleración, aunque la primera versión del modelo mencionó diferentes coeficientes vehículo [91]. También, recomienda el uso de velocidades ligeramente por debajo de los límites de velocidad, lo que resulta en el uso de valores de velocidad en el rango de 50 a 108 km /h [77].

El modelo SonRoad es el modelo suizo de ruido por tráfico rodado [92]. Posee dos categorías de vehículos: ligeros y pesados. Calcula el nivel de paso máximo ponderado A de un solo vehículo a una distancia de 7,5 m, para 3500 mediciones de paso. La potencia acústica ponderada A se da para los vehículos que se usan para el transporte de pasajeros. También, considera una corrección para la superficie de la carretera y pendiente ascendente y una corrección para cada banda de frecuencia. Este modelo no tiene en cuenta los valores de aceleración del vehículo.

El modelo RLS 90 es el modelo de predicción de ruido de referencia para Alemania [77]. Consta de 3 categorías de vehículos: motocicletas, vehículos pesados y ligeros. Calcula el nivel medio de emisión de ruido LmE medible a una distancia de 25 m del centro del carril de la carretera. Este modelo considera un rango de límite de velocidad e incluye un término adicional que representa el efecto del semáforo en intersecciones controladas y otras intersecciones.

El NMPB es el modelo de referencia del ruido. Divide los vehículos en dos categorías: vehículos ligeros (menos de 3,5 t) y vehículos pesados. Los resultados de la medición son niveles máximos de paso en dB (A), LAmax, medidos a una distancia horizontal de 7,5 m de la ruta del tráfico. El modelo descompone el nivel de potencia acústica Lw en la suma energética de un componente de ruido de rodadura Lr y un componente de ruido de unidad de potencia Lp [93]. Sin embargo, no depende de la velocidad. El ruido de rodadura para vehículos ligeros se da para tres categorías diferentes de superficies de carreteras. Este modelo incluye correcciones por desgaste de la superficie de la carretera, componentes de





ruido del motor para condiciones de flujo constante y el cambio de la velocidad del ruido de la unidad de potencia de un vehículo, considerando el comportamiento de conducción, como la suma del ruido de la unidad de potencia del vehículo en las diferentes relaciones de transmisión ponderado por el porcentaje en el que se utiliza cada relación de transmisión. La NMPB recomienda que no se considere una velocidad inferior a 20 km / h para condiciones de flujo constante. El modelo también tiene en cuenta las condiciones de flujo inestable. El ruido de la unidad de potencia del vehículo en fases aceleradas se determina siguiendo un protocolo de medición en el que la aceleración oscila hasta 2,5 m / s2. El ruido de propulsión durante las fases de aceleración Lp puede variar de acuerdo con los rangos de aceleración en los cuales se trabaje. [50].

El modelo de predicción de ruido Harmonoise fue desarrollado para ser utilizado por los estados miembros de la Unión Europea para el mapeo de ruido [88]. Divide los vehículos en cinco categorías: vehículos ligeros (automóviles, furgonetas y camionetas), vehículos pesados medianos, vehículos pesados, otros vehículos pesados y vehículos de dos ruedas. Está basado en mediciones de paso a paso a una distancia de referencia de 7,5 m. Descompone el nivel de potencia acústica Lw como la suma energética de un ruido de rodadura y un ruido de propulsión. Este modelo tiene en cuenta el valor de aceleración del ruido de propulsión, mediante un término de corrección. Esta corrección se basa en mediciones principalmente a velocidades alrededor de 30 km / h, asumiendo que esta corrección es invariable con la velocidad. Además, recomienda el uso del valor sin signo de la desaceleración, haciendo así que la aceleración sea equivalente a la desaceleración, en casos específicos como cuando el ruido del motor es al menos tan alto como el ruido de la aceleración correspondiente, por ejemplo, para vehículos pesados conduciendo cuesta abajo [94]

El modelo de emisión de ruido Imagine se construyó en la continuidad del modelo Harmonoise. En consecuencia, la forma de las principales ecuaciones para el ruido de rodadura y de propulsión son las mismas, aunque la contribución del ruido de propulsión ha disminuido significativamente para todas las categorías de vehículos en el modelo Harmonoise, ya que se basa en modelos de vehículos más nuevos. El modelo Imagine identifica cuatro categorías de vehículos: vehículos de motor ligeros, vehículos de peso medio, vehículos pesados y vehículos de dos ruedas motorizados. Además, el término de corrección de aceleración del ruido de propulsión depende de la banda de 1/3 de octava y la categoría a la que pertenece el vehículo. Además, este término no cambia linealmente sino que se establece un valor de -1 si la aceleración es <-1 m / s2. Sin embargo, el término de corrección sigue siendo invariable con la velocidad. [95]

El modelo Nord 2000 es el modelo de predicción de ruido de referencia para los países de Europa nórdica [96]. Inicialmente proporciona niveles de banda de 1/3 de octava del nivel





de exposición al ruido ponderado A, basadas en mediciones a 10 m de la fuente [97]. Considera tres categorías de vehículos: vehículos ligeros, medianos y pesados [98] [99]. Los vehículos ligeros están representados por tres fuentes a 0,01 m, 0,3 m y 0,75 m. La potencia sonora del ruido de llanta / carretera y el ruido de propulsión se calcula por separado. El 80% del ruido llanta / carreteras está asociado con la fuente más baja y el 20% con la fuente más alta. También propone correcciones para la pendiente de la carretera, la superficie de la carretera y la temperatura del aire. Se ha adaptado de acuerdo con el proyecto Harmonoise, y los métodos nórdicos de predicción del ruido ambiental donde se recomienda utilizar el modelo Harmonoise, con coeficientes adaptados a los datos nórdicos [100]. Este recomienda que en condiciones urbanas y situaciones de arranque / parada, el ruido de propulsión debe corregirse con +3 dB. Además, incluye un procedimiento especial para la estimación de los niveles máximos de ruido [99].

El modelo de Cnossos es el marco metodológico común para la cartografía estratégica del ruido en virtud de la Directiva sobre ruido ambiental (2002/49 / CE). Se basa en las mismas cuatro categorías definidas en el modelo Imagine. La forma de las ecuaciones principales para el ruido de rodadura y propulsión es la misma, aunque los coeficientes no son los mismos, y se dan en bandas de octava en lugar de bandas de 1/3 de octava. El modelo de Cnossos establece que, en la mayoría de las situaciones, el efecto de la aceleración y desaceleración puede pasarse por alto en los efectos del desarrollo de mapas estratégicos de ruido. Sin embargo, si es necesario, se atribuye un término de corrección a todas las bandas de octava por igual tanto al ruido de rodadura y al ruido de propulsión, según la distancia a la intersección más cercana. Para distancias de 100 m, debe tener en cuenta las variaciones de velocidad. Se hace diferenciación entre cruces y rotondas. El término de corrección se atribuye a todas las bandas de octava por igual dependiendo de la clasificación del vehículo [101].

El modelo FHWA es el modelo de predicción de ruido desarrollado por la Administración Federal de Carreteras de EE. UU. [89]. El cual clasifica los vehículos en 5 clases: automóviles (incluidos turismos y furgonetas, con un peso del vehículo inferior a 4500 kg), camiones medianos, camiones pesados, autobuses y motocicletas. El nivel de emisión de ruido del vehículo, que se refiere al nivel máximo de ruido emitido por el paso de un vehículo a una distancia de referencia de 15 m y se estima en términos de velocidad. Este modelo considera un término que representa el flujo del tráfico, tomando dos valores diferentes para esta constante: cuando los vehículos están en su velocidad máxima, que se define como "cuando los vehículos aceleran lejos de los dispositivos de control de tráfico" y cuando los vehículos cambian en condiciones estables [101].

El modelo ASJ-RTN es el modelo de referencia del ruido del tráfico rodado para Japón. Clasifica los vehículos en tres (vehículos livianos y pesados y motocicletas) o cuatro





categorías (automóviles de pasajeros, vehículos pequeños, vehículos medianos y vehículos de tamaño grande y motocicletas). Los vehículos ligeros son vehículos cuya longitud es inferior a 4,7 m. Para cada categoría, el nivel de potencia acústica ponderado A de un vehículo de carretera depende de una corrección dada por la superficie de la carretera, la pendiente de la carretera, la directividad de la radiación sonora y coeficientes de regresión proporcionados por separado para las fases de aceleración y desaceleración para secciones de flujo de tráfico constante y no constante, que pueden estar cerca de los ingresos o salidas de autopistas, cerca de un cruce y cerca de una intersección señalizada, considerando que estas fases de conducción generan mayores valores de aceleración. Para el caso de una intersección señalizada, la condición de marcha en aceleración se define como un estado de transición desde la condición de parada en la intersección señalizada a la condición de marcha constante, para un rango de velocidad de 1 a 60 km/h. Las aceleraciones a velocidades superiores a 60 km/ h se tratan como condiciones de velocidad constante. La condición de marcha de desaceleración se define como un estado de transición desde la condición de marcha constante a la condición de parada en la intersección señalizada. El rango de velocidad es de más de 10 km/h. El nivel de potencia acústica a 10 km / h se aplica a velocidades inferiores a 10 km/h. El modelo también incluye relaciones para deducir el espectro de potencia sonora, para condiciones de tráfico estables o no estables (para cada banda de 1/3 de octava entre 50 Hz y 5 kHz [102].

5. Conclusiones

Las principales fuentes de ruido en un vehículo de carretera corresponden a la unidad de potencia (motor y transmisión, admisión y escape) y los neumáticos en contacto con una superficie de rodadura. Sin embargo, la influencia de estas fuentes en la emisión de ruido depende de las condiciones de conducción. Por ejemplo, el ruido emitido por un vehículo que transita en vías de alta velocidad está dominado por el ruido de las llantas-carretera, sin embargo, en condiciones de velocidad variable el ruido de vehículo se ve mayormente influenciado por la unidad de potencia. Según las condiciones de conducción es necesario diferenciar las mediciones relacionadas con el comportamiento de conducción o las relacionadas con la emisión de ruido llanta-carretera.

Para caracterizar el ruido emitido por un vehículo en condiciones de velocidad variable y cuantificar su impacto en los habitantes, es necesario estudiar el comportamiento de conducción debido a su relación con los principales factores que influyen en la emisión de ruido, tales como, factores geométricos de la carretera, límites de velocidad, normas de tránsito, etc. Las variables que influyen en la emisión de ruido vehicular aún son objeto de estudio. Por esto, el estándar internacional ISO 362 propone un método de medición replicable, teniendo en consideración las múltiples variables que inciden en la emisión de ruido del vehículo, a partir de diferentes cálculos y mediciones de velocidad y aceleración.





En condiciones donde el ruido este asociado a las llantas-carretera el estándar ISO 11819 establece un procedimiento de medición que permite caracterizar el nivel de ruido dependiente de los tipos de superficies y llantas.

Las mediciones de emisión de ruido en estado estacionario están asociadas principalmente al ruido emitido por el escape y el motor. Estas mediciones permiten verificar el estado de vehículos en uso y la identificación de fallas que se están presentando que no son detectadas de forma visual o proporciona información tecnológica como la reducción del ruido del escape y el diseño de sistemas de escape vehicular.

Los estándares ISO 362 e ISO 5130 especifican las metodologías de medición mayormente usadas para la caracterización de ruido de emisión vehicular en estado dinámico y estacionario respectivamente. Estos métodos son usualmente simplificados o modificados por cada país a favor de sus contextos físicos y normativos. Sin embargo, se garantiza la fiabilidad de los datos al mantener condiciones imprescindibles para el cálculo de los indicadores.

Existen pocos estudios que indica la metodología estadística para la selección de muestras del parque automotor en una zona de estudio. Sin embargo, el análisis de algunos estudios indica que, para el estudio de variables relacionadas con el comportamiento de conducción u homologación, se analizan muestras relativamente pequeñas en comparación con los estudios de predicción de ruido o medición del ruido del tráfico rodado, donde el tamaño de las muestras es significativamente grande.

Las características del parque automotor inciden significativamente en la emisión, de este modo las características que pueden presentar los vehículos de acuerdo con su tamaño, tipo de motor o uso son importantes. Por esta razón, es necesario clasificar los vehículos, de tal forma que estos factores sean cubiertos en el modelo de medición y teniendo en cuenta las particularidades de zona de estudio. La información proporcionada por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá permite estudiar las características principales del parque automotor de la Región, la cual es de gran utilidad para establecer un punto de partida en la toma de muestras para la caracterización del ruido vehicular.

La revisión de la legislación en torno a la emisión de ruido de vehículos indica que algunos países establecen niveles límites de emisión para procesos de homologación generalmente aplicados a vehículos nuevos. Las mediciones generalmente corresponden a mediciones en estado estacionario y dinámico basadas en las normas ISO 5130 e ISO 362 respectivamente. La metodología para mediciones estipuladas en EU para estado dinámico presenta algunas diferencias respecto a otros países en cuanto a las dimensiones de la pista de pruebas. En la Unión Europea se han establecido metas de reducción de las emisiones, gracias a diferentes estudios que indican reducciones debido a las nuevas tecnologías instaladas en vehículos.





Los estudios de emisión de ruido vehicular en Colombia se encuentran enfocados a las mediciones de ruido ambiental y la modelación de mapas de ruido. Estás mediciones están enmarcadas de acuerdo con la legislación colombiana para la emisión de ruido ambiental Resolución 0627 del 2006. La norma técnica NTC 4194 especifica un procedimiento de medición del exosto para vehículos en estado estacionario. Esta norma se basa en el estándar internacional ISO 5130 y está enfocada en el diagnostico automotriz.

La caracterización de emisión de ruido vehicular se puede realizar a través de modelos predictivos que tienen principalmente en cuenta la velocidad, aceleración, tipos de vehículos, flujo vehicular y algunos parámetros geométricos de la carretera. Estos presentan variaciones y adaptaciones con respecto a las características del entorno y el lugar en el que se desarrolla. En el caso de vías con pendientes, algunos de estos modelos presentan un factor de corrección en vehículos pesados que permite tener en cuenta la carga del motor adicional en estos escenarios. Sin embargo, existen pocos estudios que modelen la dependencia de la emisión de ruido con el ángulo de la pendiente.

1.2 Metodología toma de muestras

Este producto describe la gestión documental relacionada con la caracterización de ruido vehicular en estado estacionario y en movimiento. Así mismo, especifica las metodologías para la obtención del coeficiente de absorción de superficies de rodadura. El producto consta de procedimientos de medición, formatos de campo y repositorios para análisis de la información para la caracterización de la emisión acústica de 114 vehículos que se movilizan en el Valle de Aburrá.

El protocolo de medición contempló la presencia de cuatro ingenieros de campo, los cuales fueron los encargados del montaje de la pista, organización de la medición, captura de datos y procesamiento de estos.

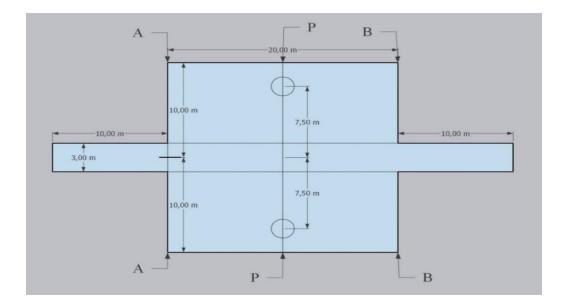
Los materiales e instrumentación necesarios fueron son los siguientes:

- 2 sonómetros tipo 1.
- Conos deportivos para marcación de pista.
- Lienza, cinta reflejante, y carpa para estación de trabajo provisional.
- Computadores portátiles.
- Dosímetro.
- Grabadora de audio portátil.

En primera instancia se procede al montaje de la pista, la cual se presenta a continuación con sus dimensiones y puntos clave.







La pista y los puntos clave de la medición se marcan con conos deportivos y los sensores puestos en sus respectivos lugares. Paralelo a esto una parte del equipo monta una estación de trabajo fuera de la pista con una carpa pequeña del Área Metropolitana.

Una vez marcada la pista se realiza la calibración de la instrumentación para iniciar las mediciones.

6. . Mediciones

Para cada vehículo se contempla una hora de medición en la cual se realizará la prueba estacionaria y dinámica. A continuación se describen los procedimientos en cada medición.

6.1 Estado estacionario

Para esta prueba se realizan tres mediciones consecutivas al vehículo estacionado a un costado de la pista, cada una de alrededor de unos 5 segundos de duración mientras el conductor mantiene una aceleración constante. Se contempla que la prueba dura un máximo de 15 minutos entre el montaje del equipamiento, contextualización del conductor y repetición de las mediciones en caso de darse.

6.2 Estado dinámico

La prueba en estado dinámico implica el desplazamiento del vehículo en la pista marcada, acelerando a través de ella. Para esta prueba se deben realizar 4 mediciones y se





estiman 45 minutos de duración entre el montaje del equipamiento, contextualización del conductor y repetición de las mediciones en caso de darse.

En la sección de anexos se dispone en C643_Anexos_Procedimientos_Caracterizacion_Vehicular:

Formatos de medición:

- C643_F_V_ Recepción de vehículos_R0
- C643 FM V Estado dinámico R0
- C643_FM_V_Estado Estacionario_R0

Procedimientos de medición:

- C643 PM V estacionarios R0
- C643_PM_V_dosimetría_R0
- C643_PM_V_Estado dinámico_R0

Protocolos de Medición:

- C643_PRM_V_dosimetría_R0 C643_PRM_V_estacionarios_R0 C643_PRM_V_estado dinámico_R0
- 2. Caracterizar la emisión acústica de vehículos que se movilizan en el Valle de Aburrá
 - 2.1 Informe técnico de emisión de ruido de vehículos por categorías de acuerdo con su clasificación. El documento incluye la evaluación bajo métodos estandarizados, resultados de la sonda tipo PU y dosimetrías en conductores

A continuación, se presenta el análisis de las mediciones de caracterización del ruido vehicular para una muestra del parque automotor del Valle de Aburrá. En el proyecto se había establecido la medición de 65 vehículos, sin embargo, fue posible realizar mediciones a 114 vehículos. Las mediciones se realizaron en estado estacionario para caracterizar el nivel de ruido emitido por los vehículos alrededor del sistema de escape y en estado dinámico para evaluar la emisión de ruido bajo condiciones urbanas de aceleración. Las mediciones se realizaron para diferentes tipos de vehículos categorizados según su masa en: livianos, medianos, pesados y motos; también se realizó el estudio teniendo en cuenta el tipo de combustible. La diferencia en cuanto a la emisión de ruido de las categorías evaluadas se valida a través del análisis de varianza ANOVA. De este modo, la sección 1 presenta una descripción de la muestra de vehículos, la sección 2 presenta los resultados





de las mediciones en estado estacionario y dinámico y la sección 2.5 presenta una comparación del procedimiento de medición descrito en el estándar internacional ISO 362 con el procedimiento definido para las mediciones en estado dinámico.

1. Descripción de la muestra

El análisis de caracterización de ruido vehicular cuenta con una muestra de 114 vehículos representativos del Valle de Aburrá. Los vehículos son categorizados según su masa y tipo de combustible, siendo estas, características importantes del vehículo que inciden en su emisión de ruido. Adicionalmente se analiza la distribución de la muestra según las subcategorías establecidas y el año del modelo.

1.1 Categorías según la masa de los vehículos

Con base en las categorías descritas en el método de cálculo CNOSSOS, las normativas internacionales ISO 362 e ISO 5130, el modelo LEAP usado por el grupo de Investigaciones Ambientales de la Universidad Pontificia Bolivariana para el inventario de emisiones atmosféricas, y a datos proporcionados por el AMVA sobre la distribución del parque automotor en el Valle de Aburrá, se establecen las categorías de livianos, medianos, pesados y motos para analizar los niveles de ruido obtenidos mediante mediciones en estado estacionario y en estado dinámico. La distribución de los vehículos según las categorías establecidas se presenta en la Figura 8. De este modo, la muestra cuenta con 28 vehículos livianos, 29 medianos, 31 pesados y 26 motos. Las siguientes subsecciones presentan una descripción de las categorías establecidas.

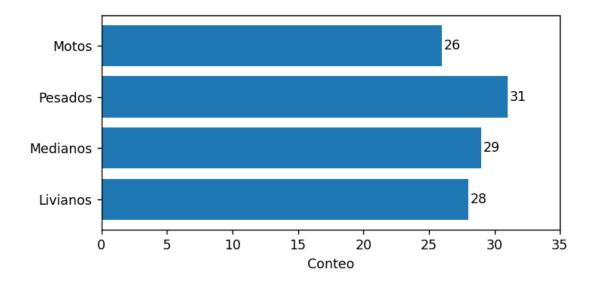


Figura 8. Distribución de la muestra de vehículos por categorías.





1.1.1 Vehículos livianos

Esta categoría incluye: automóviles, camionetas, vehículos todoterreno, furgonetas, minivans y caravanas. Según el cilindraje en centímetros cúbicos (cc), los vehículos livianos están comprendidos por autos livianos (de cilindraje menor a 1500 cc), autos medianos (de cilindraje entre 1500 y 3000 cc) y pesados (de cilindraje mayor a 3000 cc).

1.1.2 Vehículos medianos

Esta categoría incluye: furgonetas de carga, microbuses, buses y camiones pequeños y medianos. Según el cilindraje, los vehículos medianos están comprendidos por buses y camiones livianos (de cilindraje menor a 3000 cc), medianos (de cilindraje entre 3000 y 6000 cc).

1.1.3 <u>Vehículos pesados</u>

Esta categoría incluye: buses y camiones de gran tamaño, buses articulados, tractocamiones y volquetas. Según el cilindraje esta categoría incluye vehículos de más de 6000 cc.

1.1.4 Motos

Esta categoría está compuesta por vehículos motorizados de menos de 4 ruedas con motor cuatro tiempos (4T). Según el cilindraje, esta categoría incluye motos livianas (de cilindraje menor a 100 cc), medianas (de cilindraje entre 100 y 300 cc) y pesadas (de cilindraje mayor a 300 cc).

1.2 Subcategorías

Con base en el modelo LEAP usado por el grupo de Investigaciones Ambientales de la Universidad Pontificia Bolivariana para el inventario de emisiones atmosféricas, se establecen las subcategorías que muestra la Figura 9. De este modo las barras de las subcategorías en color azul, naranja, verde y morado pertenecen a la categoría de livianos, medianos y pesados respectivamente. Esta clasificación tiene como objetivo analizar las diferencias en cuanto a la emisión de ruido de estos grupos.



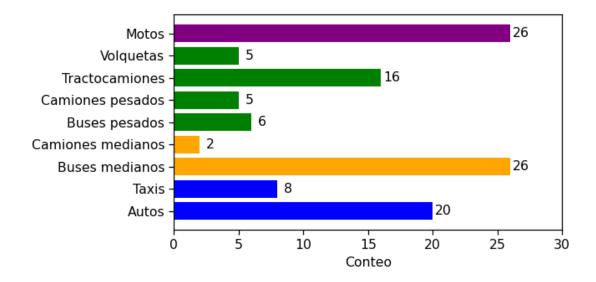


Figura 9. Distribución de la muestra de vehículos por subcategorías.

1.3 Categorías según el tipo de combustible

El ruido generado por el proceso de combustión está controlado principalmente por el nivel de presión en el cilindro, la tasa de aumento de la presión del cilindro durante la combustión y la tasa de cambio de la tasa de aumento de presión. El tipo de combustible tiene una incidencia directa en el proceso de combustión. Por ejemplo, las presiones de combustión del ACPM (diésel) son mucho más altas que las presiones en los motores de gasolina. Ya que el tipo de combustible afecta la dinámica de los gases en el motor, el sistema de admisión y escape es importante analizar esta variable para considerar la influencia que tiene sobre el nivel de ruido emitido por los vehículos. Por otro lado, los vehículos eléctricos e híbrido presentan características significativamente diferentes en cuanto a la emisión de ruido, por lo que requiere de un análisis por separado. La Tabla 12 presenta el número de vehículos medidos según el tipo de combustible que usan.

Tabla 12. Número de vehículos según el tipo de combustible que usan.

Tipo de combustible	Número de vehículos
Corriente	39
Extra	12
АСРМ	58





Gas	2
Híbrido	2
Eléctrico	1
Total	114

El tipo de combustible es un factor que depende de las categorías de vehículos. Por ejemplo, en vehículos medianos y pesados predomina el tipo de combustible ACPM, por otro lado, en livianos y motos predomina la gasolina corriente. La distribución del tipo de combustible en las diferentes categorías se presenta en la Figura 10.

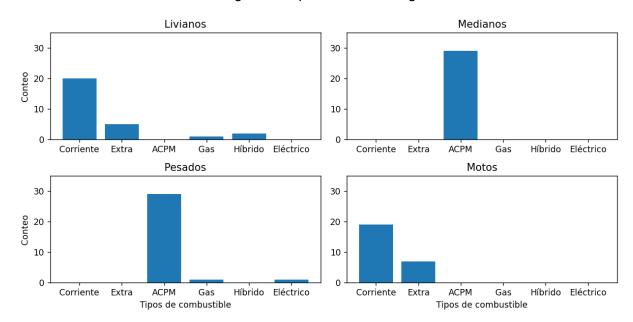


Figura 10. Distribución del tipo de combustible según las categorías establecidas.





Tabla 13. Cantidad de vehículos por tipología y categoría evaluada.

Categoría	Subcategoria	Cantidad	Corriente	Extra	ACPM	Gas	Híbrido	Eléctrico	Hasta 2010	2011-2020	Desde 2021	Resultado estacionaria	Resultado dinámica	
Liviano	Automóvil	20	13	4	0	1	2	0	1	15	4	79.3dB _{71.1}	71.1dBA	
LIVIATIO	Taxi	8	7	1	0	0	0	0	2	6	0	Α	A / T. TOBA	
		26	0	0	26	0	0	0	5	21	0	83.3dB		
Mediano	Camiones medianos	2	0	0	2	0	0	0	0	0	2	A	79.5dBA	
	Buses pesados	6	0	0	5	0	0	1	1	5	0			
Pesado	Camiones Pesados	5	0	0	5	0	0	0	0	5	0	89.8dB A	82.9dBA	
	Tractocamiones	16	0	0	15	1	0	0	0	16	0			
	Volquetas	5	0	0	5	0	0	0	1	4	0			
Motos	Motos 4T	26	19	7	0	0	0	0	1	17	8	83.1dB A	77.5dBA	

1.4 <u>Distribución según el año del modelo</u>

El año del modelo es un factor importante para el análisis de los niveles de ruido emitidos por los vehículos. El desarrollo de nuevas tecnologías para el control de ruido ha permitido una reducción en los niveles de emisión a través de los últimos años. De esta forma, los vehículos de mayor antigüedad están relacionados con mayores niveles de emisión mientras que modelos más nuevos están asociados a menores niveles de ruido. La Figura 11 presenta los histogramas para el año del modelo en las categorías establecidas. El histograma (conteo) presenta una aproximación a la distribución de los casos correspondientes a cada año.





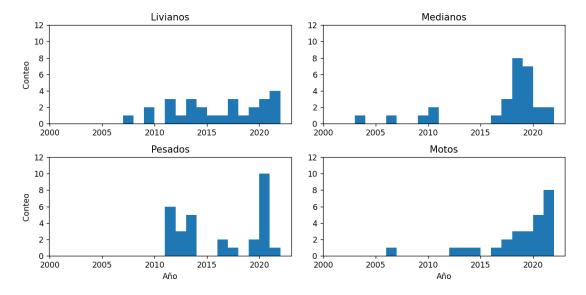


Figura 11. Distribución de los vehículos según el año del modelo.

En la Tabla 14 se presenta la distribución de los vehículos teniendo en cuenta la década de su modelo.

Tabla 14. Distribución de los vehículos medidos según año del modelo.

Agrupación por décadas o antigüedad	Número de vehículos
Hasta el 2010	11
2011-2020	88
Desde 2021	15

2. Mediciones de emisión de ruido

2.1 ANOVA para mediciones por categorías

La prueba de análisis de varianza (ANOVA) se utiliza en el análisis de experimentos comparativos, aquellos en los que interesa comparar la diferencia entre medias muestréales. De este modo, la prueba ANOVA permite comparar las medias de una condición entre más de dos grupos o categorías. La idea básica detrás de una prueba ANOVA consiste en tomar muestras aleatorias independientes de cada grupo y calcular un





estadístico de prueba que relaciona la variación entre los grupos (variación de las medias muestrales) con la variación entre las muestras dentro de cada grupo. Esta relación de varianzas se compara con un valor de referencia para determinar la significancia estadística del experimento. La cantidad total de variabilidad en una prueba ANOVA proviene de las siguientes fuentes:

- 1. Diferencia **entre** los grupos, denominada tratamiento (TR)
- 2. Diferencia **dentro** de los grupos, llamada error €

El ANOVA prueba la hipótesis nula, que establece que las muestras de todos los grupos se extraen de poblaciones con los mismos valores medios. De esta forma, la prueba ANOVA considera las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula H_0 : no hay diferencia significativa entre los grupos
- Hipótesis alternativa H_1 : hay una diferencia significativa entre los grupos

Para ello, se realizan estimaciones de la varianza de la población. Estas estimaciones se basan en los siguientes supuestos:

- Aleatoriedad e independencia: los datos de la muestra se seleccionan al azar de las poblaciones y se asignan al azar a cada uno de los grupos de tratamiento. Por tanto, cada observación es independiente de cualquier otra observación.
- **Normalidad:** se supone que los valores de cada grupo muestreado proceden de poblaciones con distribución normal.
- Homogeneidad de varianza: todas las c varianzas de los grupos son iguales, es decir $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \cdots = \sigma_c^2$.

El siguiente análisis presenta una prueba ANOVA de una vía, es decir, una sola variable independiente, en este caso, nivel de ruido emitido por los vehículos durante las mediciones. De este modo, se comparan las medias del nivel de ruido de 4 grupos de vehículos: livianos, medianos, pesados y motos. En la prueba ANOVA de un factor o de una sola vía, la significancia estadística se analiza comparando el estadístico de prueba F también llamado índice F. Este permite comparar más de 3 grupos de datos para determinar la variabilidad entre muestras y dentro de las mismas. El estadístico F presenta la siguiente relación:





$$F = \frac{\text{varianza entre los tratamientos}}{\text{varianza dentro de los tratamientos}}$$

Dado el resumen estadístico de los datos, los cálculos de la prueba de hipótesis ANOVA se muestran en forma de tabla como se describe a continuación:

Tabla 15. Resumen ANOVA

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F
Tratamiento	$SSTR = \sum_{j=1}^{k} n_j (\bar{y}_j - \bar{y})^2$	$df_{\mathrm{TR}} = k - 1$	$MSTR = \frac{SSTR}{df_{TR}}$	$F = \frac{\text{MSTR}}{\text{MSE}}$
Error	SSE = $\sum_{j=1}^{k} \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ij} - \bar{y}_j)^2$	$df_{\rm E}=n-k$	$MSE = \frac{SSE}{df_E}$	
Total	SST = SSTR + SSE	$df_{\rm T}=n-1$		

Donde:

- k es el número de grupos o categorías
- n_i es el número de observaciones en el grupo j-ésimo
- \overline{y}_i es la media muestral del grupo j-ésimo
- y_{ij} es la observación i-ésima del j-ésimo grupo
- n es el número total de observaciones

así:

- SSTR es la suma de cuadrados entre grupos
- SSE es la suma de cuadrados dentro de los grupos
- SST es la suma de cuadrados total
- df_{TR} son los grados de libertad entre grupos
- df_E son los grados de libertad dentro de los grupos





- $df_{\rm T}$ son los grados de libertad de los datos
- MSTR son los cuadrados medios entre los grupos
- MSE son los cuadrados medios dentro de los grupos
- F es el estadístico de prueba

Antes de realizar la prueba de hipótesis ANOVA solo es necesario verificar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza ya que se asume que la muestra fue seleccionada aleatoriamente, cumpliendo con el supuesto de independencia.

2.1.1 Supuesto de normalidad

Los gráficos de probabilidad y cuantil-cuantil (Q-Q) se utilizan para probar de forma gráfica si un conjunto de datos sigue una distribución determinada. Estos gráficos comparan los cuantiles de una distribución de datos con los cuantiles de una distribución teórica específica. De este modo, si los puntos de dispersión están cerca de la línea de referencia, podemos decir que el conjunto de datos sigue la distribución dada, en este caso una distribución normal.

Los gráficos de probabilidad de la Figura 12 y Figura 12 muestran que las mediciones por categoría en estado estacionario y dinámico siguen aproximadamente un patrón en línea recta, lo que sugiere que los datos están normalmente distribuidos.





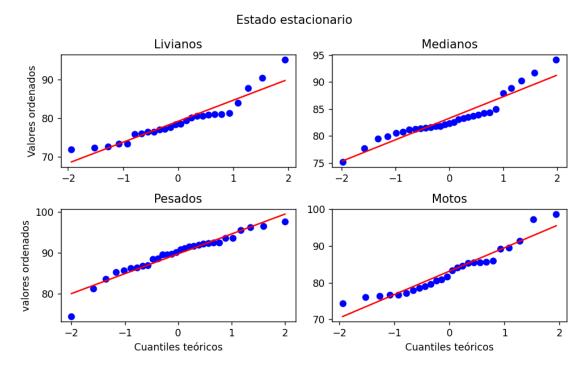


Figura 12. Gráficos de probabilidad para las categorías en estado estacionario.



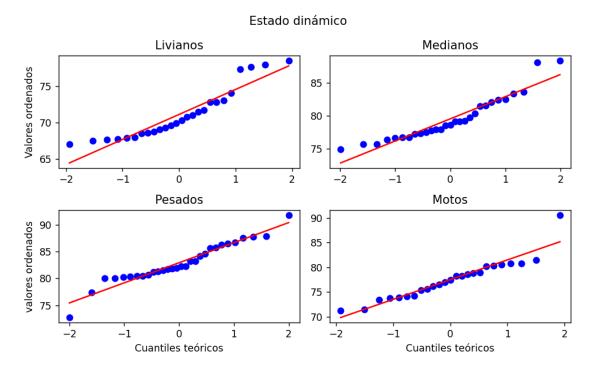


Figura 13. Gráficos de probabilidad para las categorías en estado dinámico.

2.1.2 Supuesto de homogeneidad de varianza

Como regla general, si la relación r entre la desviación estándar de la muestra más grande y la más pequeña es menor que 2, se considera que se cumple este supuesto. La Tabla 16 presenta esta relación para mediciones en estado estacionario y dinámico.

Tabla 16. Relación r para estacionario y dinámico

r_{est}	1.57
r_{din}	1.18

2.1.3 Prueba de hipótesis

La Tabla 17 y la Tabla 18 Presentan el resumen ANOVA para las mediciones en estado estacionario y estado dinámico respectivamente.





Tabla 17. Resumen ANOVA para mediciones en estado estacionario.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor P	F _{crit}
Tratamiento	1617.53	3	539.17	19.86	2.63e-10	3.24
Error	2905.30	107	27.15			
Total	4522.83	110		-		

Tabla 18. Resumen ANOVA para mediciones en estado dinámico.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Valor P	F _{crit}
Tratamiento	2029.71	3	676.57	50.47	1.11e-16	3.24
Error	1421.09	106	13.41			
Total	3450.81	109				

Siguiendo el enfoque de valor crítico F_{crit} , si $F>F_{crit}$ se puede rechazar la hipótesis nula. De este modo, se puede concluir que existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, lo que confirma la validez de los diferentes grupos o categorías de vehículos para explicar las diferencias en los niveles de ruido emitidos, tanto para estado estacionario como para estado dinámico. Esto indica que las categorías establecidas para las mediciones presentan diferencias significativas, dicho de otro modo, los vehículos en sus respectivas categorías presentan características similares en cuanto a la emisión de ruido. Este ANOVA proporciona las bases para el análisis por categoría de la emisión de ruido de los vehículos medidos.

2.2 Mediciones en estado estacionario

Las mediciones de vehículos en estado estacionario están destinadas para una evaluación ingenieril del nivel de presión acústica de los vehículos de carretera en las proximidades de los sistemas de escape. Las mediciones de vehículos en estado estacionario se realizan según la norma ISO 5130, la cual proporciona un método para la medición del nivel de





presión sonora para un rango de velocidades del motor asociadas a condiciones normales de operación. El método está diseñado para cumplir los requisitos de simplicidad en la medida en que sean compatibles con la reproducibilidad de los resultados en las condiciones de funcionamiento del vehículo. Los informes individuales y datos de los procedimientos se encuentran en el anexo C643 Anexo informe vehículos.







Para medir el ruido generado por el escape, el motor del vehículo debe ser estabilizado bajo las condiciones que asigna la norma ISO 5130, según su categoría. Se realizan 3 mediciones de nivel máximo de presión acústica ponderad"o""A" a cada vehículo, manteniendo una diferencia menor a 2dB entre mediciones consecutivas. El resultado que se reporta para cada vehículo corresponde al promedio aritmético de las tres mediciones válidas, como indica la siguiente expresión:

$$L_E = \frac{L_{max E,1} + L_{max E,2} + L_{max E,3}}{3}$$

donde L_E es el nivel de ruido promedio del vehículo en estado estacionario en las proximidades del sistema de escape, y $L_{max\,E,j}$ con j=1,2,3 corresponde a las 3 mediciones consecutivas realizadas.

Es importante aclarar que, un análisis de media logarítmica de los niveles de ruido se hace cuando se monitorean puntos espaciales específicos en un intervalo de tiempo continuo, en este caso la media representa la física del problema teniendo en cuenta métodos de conservación de energía. No obstante, en este trabajo los datos están dispersos y no son





continuos temporales. En este sentido la media estadística para la dispersión espacial y atemporal de los datos se debe interpretar en términos de limites probabilísticos mas no es un indicador fenomenológico representativo del ruido de la ciudad.

2.2.1 Análisis por categorías

La Figura 14 presenta el diagrama de cajas y bigotes de los niveles obtenidos en las mediciones en estado estacionario por categoría de vehículo. El diagrama de cajas y bigotes proporciona una descripción estadística de las mediciones a través de los valores mínimo y máximo (extremo inferior y superior de los bigotes respectivamente), la mediana y media de la muestra (barra horizontal roja y punto verde al interior de la caja respectivamente), el primer y tercer cuartil (límite inferior y superior de la caja respectivamente) y valores atípicos (puntos por debajo y por encima de los valores mínimos y máximos). El espaciado entre las diferentes partes del diagrama de cajas y bigotes indica el grado de dispersión y asimetría de los datos, ilustrando la variación en las muestras sin hacer suposiciones de la distribución estadística subyacente.

Las medidas de tendencia central (mediana y media) en la Figura 14 indican que los vehículos pesados emiten los mayores niveles de ruido en estado estacionario, contrario a los vehículos livianos que emiten los menores niveles. Por otro lado, los vehículos medianos y las motos emiten un nivel de ruido similar. La figura muestra que los niveles medidos en vehículos medianos se distribuyen en un menor rango de valores en comparación con las otras categorías. La poca variabilidad en estos niveles puede estar asociada a la homogeneidad de la muestra, ya que está compuesta mayormente por buses medianos. En vehículos livianos, pesados y motos existe una mayor variabilidad en los niveles medidos. La dispersión de estos datos puede estar relacionada con la variedad de modelos y la diferencia en cuanto a diseño de componentes, tales como sistema de escape y motor. Los vehículos medianos también presentan la mayor cantidad de valores atípicos entre los cuales se encuentran las mediciones realizadas para camiones livianos. Otros valores atípicos pueden estar asociados al modo de operación del vehículo durante la prueba, o a condiciones específicas de los vehículos. Por ejemplo, en el caso de las motos, los valores atípicos corresponden a vehículos de mayor cilindrada (Kawasaki EX300 y Bajaj Dominar 400).





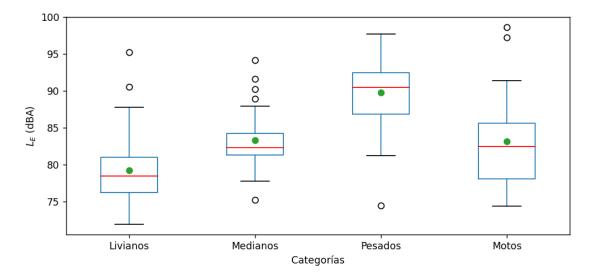


Figura 14. Comportamiento estadístico de los niveles obtenidos en mediciones en estado estacionario.

De acuerdo con los valores p calculados (ver Tabla 19), se rechaza la hipótesis nula con un nivel de significancia $\alpha=0.05$, para vehículos livianos y medianos medidos en estado estacionario. Es decir, que los datos de estas categorías no provienen de una población normalmente distribuida. Para vehículos pesados y motos no se puede rechazar la hipótesis nula.

Tabla 19. Prueba Shapiro-Wilk para mediciones en estado estacionario.

Categoría	W	Valor <i>p</i>
Livianos	0.9002334475517273	0.015845289453864098
Medianos	0.9267830848693848	0.04543749615550041
Pesados	0.9393269419670105	0.08724144101142883
Motos	0.9251492619514465	0.05944475531578064

La Figura 15 presenta los histogramas de por categorías para mediciones en estado estacionario.



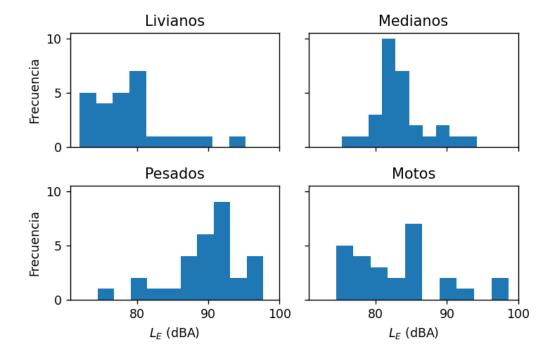


Figura 15. Histograma por categoría para mediciones en estado estacionario.

El gráfico de barras de la Figura 16 presenta los niveles promedio calculados aritméticamente para las mediciones en estado estacionario con su respectivo intervalo de confianza del 95% (barras color negro). La estimación del intervalo da una indicación de cuánta incertidumbre hay en nuestra estimación de la media verdadera. Cuanto más estrecho sea el intervalo, más precisa será nuestra estimación. En lugar de una única estimación de la media, el intervalo de confianza genera un límite inferior y superior para la media. Los límites de confianza se definen como:

$$\bar{x} \pm t_{1-\alpha/2,N-1} \frac{s}{\sqrt{N}},$$

donde s es la desviación estándar de la muestra, N es el tamaño de la muestra, α es el nivel de significancia deseado y $t_{1-\alpha/2,N-1}$ es el percentil $100(1-\alpha/2)$ de la distribución t con – -1 grados de libertad. Considerando el tamaño de la muestra para las mediciones, es aconsejable asumir límite de confianza superior como una medida conservadora para describir el nivel de ruido generado por las categorías de vehículos. El límite de confianza superior para livianos, medianos, pesados y motos corresponde a 81.5, 85.0, 91.5 y 85.7dBA, respectivamente. Como se observa, los vehículos pesados generan en promedio un nivel de ruido mayor cerca al sistema de escape, seguido de los vehículos medianos, las motos y vehículos livianos. Los valores indican que el mayor tamaño del motor en los





vehículos pesados respecto a las otras categorías, y el tipo de combustible que usan son factores importantes en la emisión de ruido de esta categoría. Por otra parte, el nivel de ruido generado por las motos sobrepasa los vehículos livianos, a pesar de contar con motores más pequeños. Esto indica que el tren de potencia, que se encuentra expuesto, puede estar incidiendo significativamente en los niveles medidos.

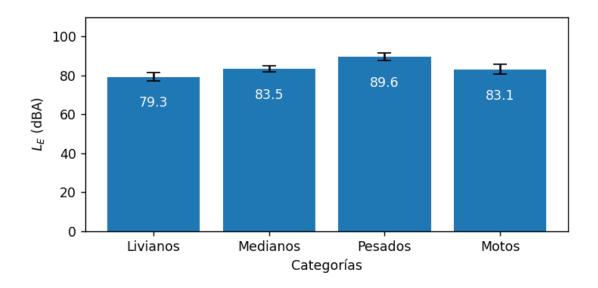


Figura 16. Promedio aritmético por categorías para mediciones en estado estacionario.

2.2.2 Análisis por subcategorías

La Figura 17 presenta el diagrama de cajas y bigotes por subcategorías con los respectivos niveles en estado estacionario en el eje horizontal. En los vehículos livianos (autos y taxis), se observa una menor dispersión en los niveles medidos para los taxis. La mayor variabilidad en los autos indica que existe una mayor variedad de modelos en esta subcategoría, a diferencia de los taxis que presentan características más homogéneas. En el caso de camiones medianos, la muestra solo cuenta con dos observaciones que corresponden a vehículos de la misma marca con características similares. Sin embargo, se observa que los camiones medianos presentan mayores niveles de ruido en comparación con los buses medianos. Estos últimos presentan niveles más dispersos con más valores atípicos dada la variedad de modelos. Las mediciones en vehículos pesados presentan valores dispersos con niveles promedio similares entre subcategorías. Los





camiones pesados y tractocamiones muestran un mayor rango de valores debido a las diferencias entre modelos, mientras buses pesados y volquetas presentan menor variabilidad y mayor sesgo. Entre todas las subcategorías las mediciones realizadas en motos presentan la mayor dispersión, la cual puede estar asociada a la variedad de características de los motores y sistemas de escape.

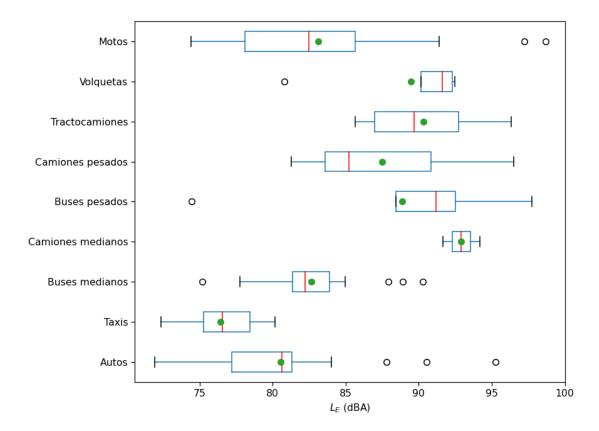


Figura 17. Comportamiento estadístico de los niveles obtenidos en mediciones en estado estacionario por subcategorías.

2.2.3 Análisis por tipo de combustible

La Figura 18 presenta el diagrama de cajas y bigotes para vehículos livianos y motos de combustible corriente y extra. Las medidas de tendencia central indican que los livianos de combustible extra generan menor nivel de ruido. Esto puede deberse a que la mayoría de los vehículos de alta gama funcionan con gasolina extra. En general este tipo de vehículos





tiene mejor tecnología para el control de la emisión de ruido en comparación con los vehículos de baja gama. Por otro lado, las motos de gasolina extra emiten un mayor nivel de ruido que las motos de gasolina corriente. Esto puede estar relacionado con la mayor potencia y cilindrada de las motos que usan gasolina extra.

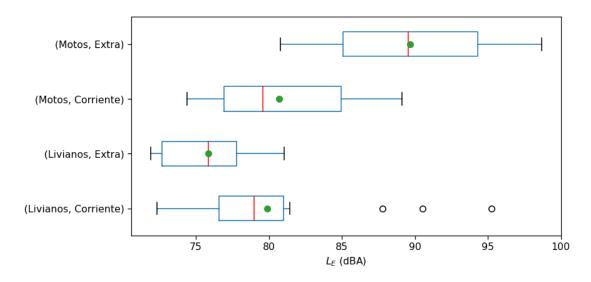


Figura 18. Comportamiento estadístico de los niveles por categorías (livianos y motos) y tipo de combustible para mediciones en estado estacionario.

2.2.4 Análisis por bandas de octava

Las mediciones por bandas de frecuencias permiten analizar las características espectrales de la emisión de ruido de los vehículos. La Figura 19 presenta el nivel continuo equivalente promedio ($L_{\rm eq}$) por bandas de octava de las diferentes categorías para las mediciones en estado estacionario. Se puede observar que los vehículos pesados generan mayores niveles para bandas entre los 63Hz y 8kHz respecto a las otras categorías. Los vehículos pesados presentan características importantes en bajas frecuencias, con una contribución significativa a la emisión de ruido en las bandas de 125Hz y 250Hz. Las gráficas indican que los vehículos medianos y las motos registran características similares en las bandas de 125Hz, 500Hz, 2kHz, 4kHz y 8kHz. Por otro lado, el espectro de los vehículos livianos muestra niveles promedio menores para todas las bandas. Sin embargo, presenta un realce en la banda de 125Hz que aproxima los niveles medidos para motos y medianos.



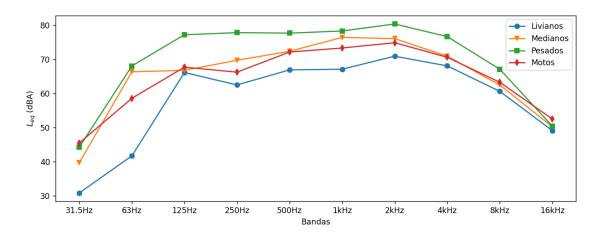


Figura 19. Niveles promedio por banda de octava por categoría para las mediciones en estado estacionario.

La Figura 20 presenta el diagrama de cajas y bigotes por bandas de octava de los niveles emitidos por los vehículos livianos. Los niveles muestran una mayor dispersión en las bandas de 63Hz y 125Hz. La variabilidad en estas bandas demuestra las diferencias en las características espectrales de los vehículos dada la variedad de modelos y componentes. Los valores atípicos en las bandas de 250Hz y 1kHz corresponden al modelo más antiguo de esta categoría (Chevrolet Grand Vitara 2007). Por otro lado, los valores atípicos en las bandas de 8kHz y 16kHz corresponden al Kia Picanto EkoTaxi y al Volvo S60T4.

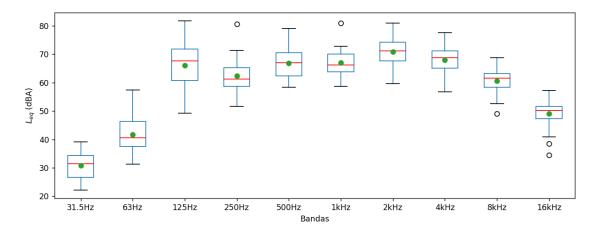


Figura 20. Mediciones por bandas de octava para vehículos livianos en estado estacionario.





La Figura 21 presenta el diagrama de cajas y bigotes de los niveles medidos en estado estacionario por bandas de octava para los vehículos medianos. El diagrama muestra una mayor dispersión en los datos de las bandas de 31.5Hz, 63Hz, 8kHz y 16kHz. La variabilidad en estas bandas puede estar relacionada con características espectrales específicas de los vehículos en esta categoría. Los valores atípicos en las bandas de 250Hz, 1kHz, 2kHz, 4kHz y 8kHz corresponden a vehículos de la marca Foton.

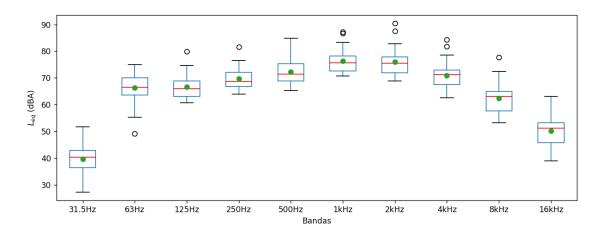


Figura 21. Mediciones por bandas de octava para vehículos medianos en estado estacionario.

La Figura 22 presenta los niveles medidos en estado estacionario por bandas de octava para vehículos pesados. El diagrama de cajas y bigotes muestra una mayor dispersión de los datos en la banda de 31.5Hz y en altas frecuencias (2kHz a 16kHz). Además, se observa menor dispersión en frecuencias medias-bajas, lo que indica que la mayoría de los vehículos pesados presentan características en frecuencia similares en este rango de frecuencias. La figura muestra valores atípicos muy por debajo de los niveles centrales, de los cuales la mayoría corresponden al vehículo marca Kenworth T880 y Chevrolet 1440.



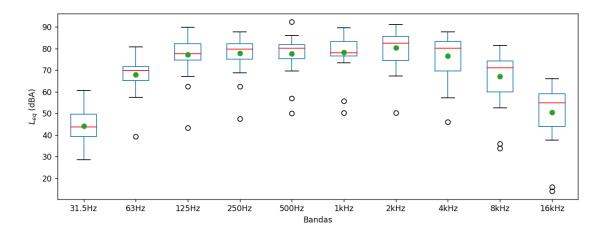


Figura 22. Mediciones por bandas de octava para vehículos pesados en estado estacionario.

La Figura 23 presenta los niveles medidos en estado estacionario por bandas de octava para motos. Se puede observar que los niveles medidos para esta categoría presentan mayor dispersión en bajas frecuencias (bandas de 31.5Hz y 63Hz). La menor variabilidad en frecuencias medias-altas indica que las motos presentan características espectrales similares en estas frecuencias. En este caso, los valores atípicos que se observan muy por debajo de los valores centrales pertenecen a la moto BMW F850 GS. Por otro lado, se identifica que los valores atípicos por encima de los niveles centrales corresponden a las motos de alta cilindrada Kawasaki EX300 y Bajaj Dominar 400.

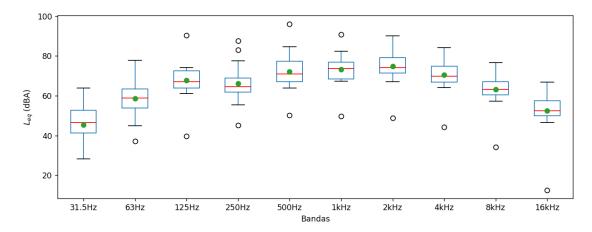


Figura 23. Mediciones por bandas de octava para motos en estado estacionario.





2.3 Mediciones en estado dinámico

Las mediciones de vehículos en estado dinámico se basan en la norma ISO 362, siguiendo las respectivas simplificaciones del procedimiento descrito en los decretos 7 y 129 de la norma chilena. El procedimiento de medición consiste en una prueba con vehículos en movimiento, bajo unas condiciones de funcionamiento que proporcionan el nivel de ruido más alto que pueda producirse durante la conducción urbana. Las pruebas están destinadas a reproducir el nivel de ruido generado por el motor y sistemas de escape y admisión, durante la conducción en tráfico urbano. Los informes individuales y datos de los procedimientos se encuentran en el anexo C643 Anexo informe vehículos.





Las pruebas en estado dinámico requieren de 4 mediciones para cada vehículo usando dos micrófonos ubicados, cada uno a un costado del vehículo, como lo indica la norma ISO 362. En cada medición se registra nivel máximo de presión acústica ponderado A, manteniendo una diferencia menor a 2dB entre mediciones consecutivas. El resultado que se reporta para cada vehículo corresponde al valor máximo entre los dos promedios aritméticos obtenidos para cada micrófono como se indica en la siguiente expresión:

$$L_D = \max\{L_{\max D,S_1}, L_{\max D,S_2}\}\$$

donde L_D es el nivel de ruido promedio del vehículo en estado dinámico. Los niveles $L_{max\,D,s1}$ y $L_{max\,D,s2}$ corresponden al promedio aritmético de las cuatro mediciones válidas para el micrófono s1 y s2 respectivamente. Los niveles promedio $L_{max\,D}$ para cada micrófono se calculan de la siguiente forma:

$$L_{max D} = \frac{L_{max D,1} + L_{max D,2} + L_{max D,3} + L_{max D,4}}{4}$$





donde $L_{max D,j}$ con j=1,2,3,4 corresponde a las 4 mediciones consecutivas realizadas.

2.3.1 Análisis por categorías

La Figura 24 muestra el diagrama de cajas y bigotes de las diferentes categorías correspondientes a las mediciones en estado dinámico. Las medidas de tendencia central indican que los vehículos pesados emiten los mayores niveles de ruido en estado dinámico, a diferencia de los vehículos livianos que emiten los menores niveles. Por otro lado, los vehículos medianos y motos emiten un nivel de ruido promedio similar. Sin embargo, los niveles medidos para las motos presentan mayor dispersión. Similar a los resultados obtenidos en las mediciones en estado estacionario, los vehículos livianos, pesados y motos muestran una mayor variabilidad en los niveles medidos, la cual puede estar relacionada con la variedad de modelos y la diferencia en cuanto a diseño de componentes. Los valores atípicos pueden estar asociados al modo de operación del vehículo durante la prueba, o a condiciones específicas de los vehículos. En el caso de las motos, El valor atípico corresponde al modelo Kawasaki EX300.

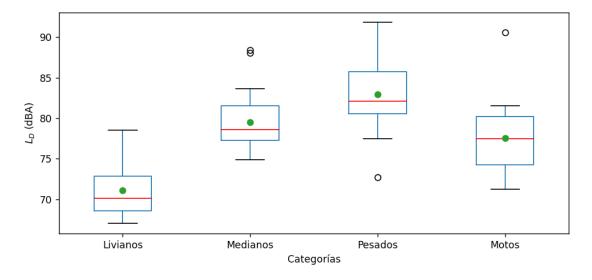


Figura 24. Comportamiento estadístico de los niveles obtenidos en las mediciones en estado dinámico.

Usando la prueba de Shapiro-Wilk se evalúa la hipótesis nula H_0 : la población se distribuye normalmente. De acuerdo con los valores p calculados (ver *Tabla 20*), se rechaza la





hipótesis nula con un nivel $\alpha=0.05$, para vehículos livianos, medianos y motos, medidos en estado dinámico. Es decir, que los datos de estas categorías no provienen de una población normalmente distribuida. Para vehículos pesados no se puede rechazar la hipótesis nula.

Tabla 20. Prueba Shapiro-Wilk para mediciones en estado dinámico.

Categoría	Estadístico de prueba	Valor <i>p</i>
Livianos	0.8740109205245972	0.004313116893172264
Medianos	0.9015021324157715	0.010644775815308094
Pesados	0.9516935348510742	0.18763746321201324
Motos	0.9089846611022949	0.028932495042681694

La Figura 25 presenta los histogramas de por categorías para mediciones en estado estacionario.

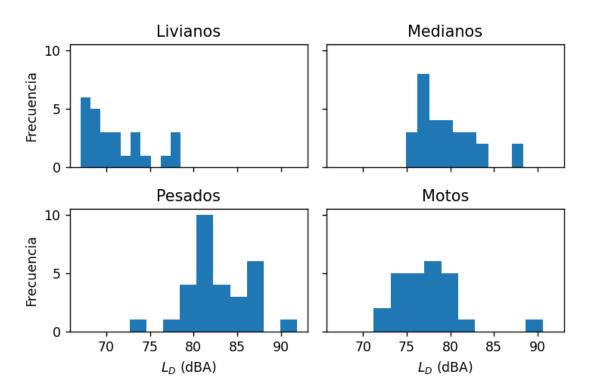


Figura 25. Histograma por categoría para mediciones en estado dinámico.





El gráfico de barras de la Figura 26 presenta los niveles promedio calculados aritméticamente para las mediciones en estado dinámico con su respectivo intervalo de confianza del 95% (barras color negro). El límite de confianza superior para livianos, medianos, pesados y motos corresponde a 72.5, 80.9, 84.3 y 79.2dBA, respectivamente. Las barras azules indican que los vehículos pesados generan en promedio un nivel de ruido mayor, seguido de los vehículos medianos, las motos y livianos. Las mediciones realizadas para vehículos pesados indican que el mayor tamaño del motor respecto a las otras categorías y el tipo de combustible que usan son factores importantes en la emisión de ruido en estado dinámico. Al igual que en la prueba en estado estacionario, el nivel de ruido generado por las motos sobrepasa el de los vehículos livianos, lo que puede estar relacionado con el tren de potencia expuesto de las motos.

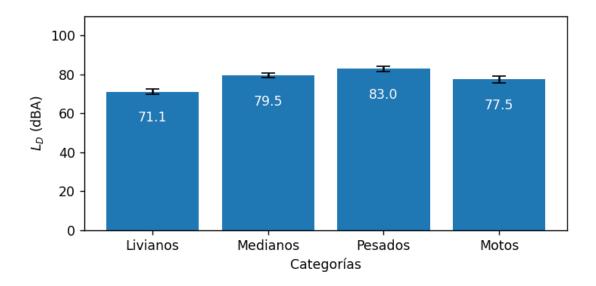


Figura 26. Promedio aritmético por categorías para mediciones en estado dinámico.

2.3.2 Análisis por subcategorías

La Figura 27 presenta el diagrama de cajas y bigotes por subcategorías con los respectivos niveles en estado dinámico. Los autos y los taxis presentan una diferncia significativa en esta prueba. Se observa que los auto emiten mayores niveles de ruido en comparación con los taxis, los cuales presentan una menor variabilidad por sus características más homogéneas. Los buses medianos presentan valores dispersos con valores centrales por debajo de los valores correspondientes a camiones medianos. En las subcategorías de pesados, los tractocamiones y camiones pesados presentan la mayor dispersión en





comparación con buses pesados y volquetas que presentan niveles similares. En este caso, los tractocamiones presentan los mayores niveles de emisión de ruido respecto a las demas subcategorías. Similar al caso estacionario, motos presentan niveles dispersos debido a la variedad de características en motores y sistemas de escape.

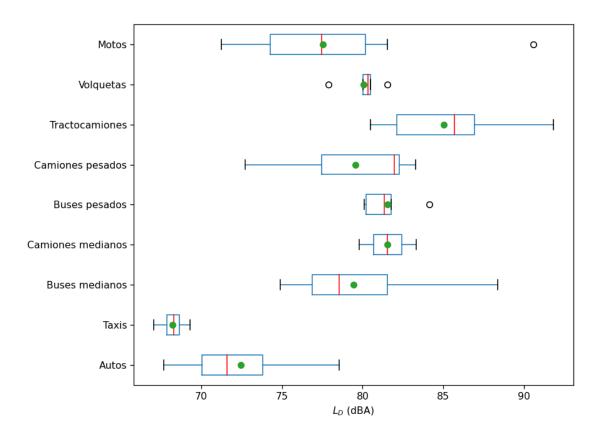


Figura 27. Comportamiento estadístico de los niveles obtenidos en mediciones en estado dinámico por subcategorías.

2.3.3 Análisis por tipo de combustible

La Figura 28 presenta el diagrama de cajas y bigotes para vehículos livianos y motos de combustible corriente y extra. Similar a las mediciones en estado estacionario, la distribución de los datos indica que los vehículos livianos de combustible extra, generan un menor nivel de ruido en comparación con los otros grupos. En general este tipo de vehículos tiene mejor tecnología para el control de la emisión de ruido en comparación con los vehículos de baja gama asociados a combustible corriente. Las motos de gasolina extra emiten un mayor nivel de ruido en promedio. Esto puede estar relacionado con las





características de diseño de estos vehículos como se mencionó anteriormente en la misma sección para vehículos en estado estacionario.

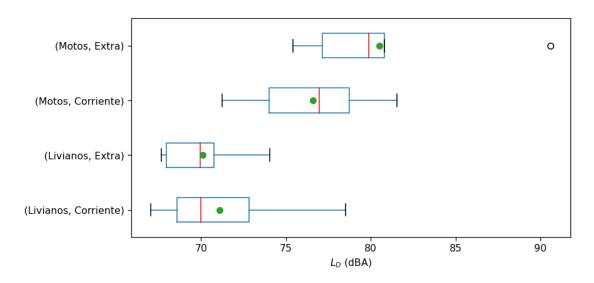


Figura 28. Comportamiento estadístico de los niveles por categorías (livianos y motos) y tipo de combustible para mediciones en estado dinámico.

2.3.4 Análisis por bandas de octava

La Figura 29 presenta los niveles por bandas de octava promediados aritméticamente por categoría para las mediciones en estado dinámico. Se puede observar que los vehículos pesados presentan la mayor contribución en todas las bandas del espectro seguido de los vehículos medianos, motos y livianos. En las bandas de 125Hz y 16kHz se observa que las motos y vehículos medianos presentan niveles similares.



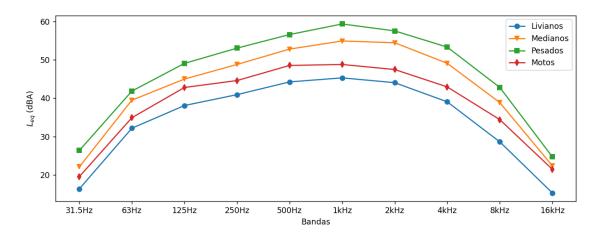


Figura 29. Niveles promedio por banda de octava por categoría para las mediciones en estado dinámico.

La Figura 30 presenta el diagrama de cajas y bigotes por bandas de octava de los niveles emitidos por los vehículos livianos. Los niveles muestran una mayor dispersión en las bandas de 63Hz, 8kHz y 16kHz. La variabilidad en estas bandas puede estar asociada a las diferentes características espectrales de los vehículos dada la variedad de modelos y componentes. Los valores atípicos que se observan en las bandas de 125Hz, 250Hz y 500Hz corresponden al modelo más antiguo de esta categoría (Chevrolet Grand Vitara 2007).

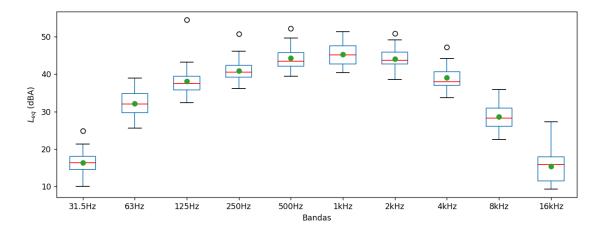


Figura 30. Mediciones por bandas de octava para vehículos livianos en estado dinámico.





La Figura 31 presenta el diagrama de cajas y bigotes de los niveles medidos en estado dinámico por bandas de octava para los vehículos medianos. Esta categoría presenta una mayor dispersión de los niveles en altas frecuencias, la cual puede estar relacionada con características espectrales específicas de algunos vehículos. La mayoría de los valores atípicos corresponden a un par de modelos Chevrolet NQR.

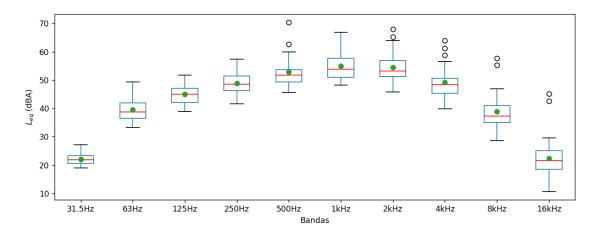


Figura 31. Mediciones por bandas de octava para vehículos medianos en estado dinámico.

La Figura 32 presenta los niveles medidos en estado dinámico por bandas de octava para vehículos pesados. El diagrama de cajas y bigotes muestra una mayor dispersión de los datos en todas las bandas en comparación con las otras categorías. La variabilidad en las bandas indica que los vehículos pesados presentan diferencias en las características espectrales dada la variedad de modelos.





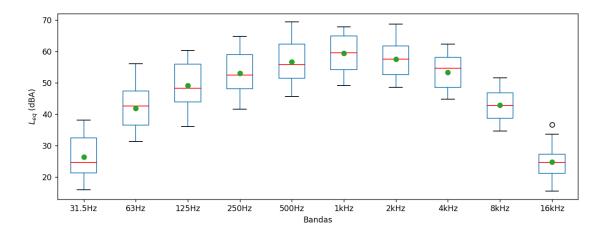


Figura 32. Mediciones por bandas de octava para vehículos pesados en estado dinámico.

La Figura 33 presenta los niveles medidos en estado dinámico por bandas de octava para motos. Se puede observar que los niveles de esta categoría presentan mayor dispersión en las bandas de 63Hz, 500Hz, 1kHz y 2kHz, lo que puede estar asociado a diferencias en las características espectrales de los modelos. Se logra identificar que algunos valores atípicos por encima de los niveles centrales corresponden a las motos de alta cilindrada Kawasaki EX300 y Bajaj Dominar 400.

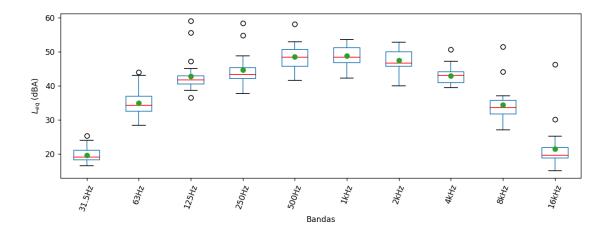


Figura 33. Mediciones por bandas de octava para motos en estado dinámico.

2.4 Mediciones para vehículos híbridos y eléctricos





Debido a las características sonoras de los vehículos híbridos y eléctricos, los niveles medidos se presentan por separado en esta sección. Se realizaron mediciones a 2 automóviles híbridos y a un bus eléctrico categorizado como bus pesado. Ya que los vehículos eléctricos no tienen sistema de escape y en los híbridos, este sistema está condicionado al tipo de motor que se usa para la propulsión, solo se realizaron mediciones en estado dinámico. La Tabla 21 muestra que este tipo de vehículos emiten niveles de ruido por debajo de los 70 dBA. Particularmente el bus eléctrico demuestra bajos niveles de emisión considerando que para esta categoría (pesados) se obtuvo un nivel promedio de 82.9 dBA. Por otro lado, los vehículos híbridos presentan niveles por debajo de la media (71.1 dBA) obtenida para los vehículos livianos.

Tabla 21. Niveles medidos en dBA en estado dinámico para híbridos y eléctricos.

Híbrido 1	Híbrido 2	Eléctrico
68.4	67.1	68.0

3. Medición de la emisión de ruido según el estándar ISO 362

El estándar internacional ISO 362 nace a partir de una revisión exhaustiva de la forma de operación de diferentes vehículos en uso en situaciones reales. El estudio fue conducido por la TÜV Automotive y otros miembros del comité entre los años 1990 y 2000. Se recolectaron datos de vehículos operando en una variedad de condiciones en carreteras urbanas de Europa y Asia y se validaron en condiciones de tráfico de Estados Unidos. Por lo tanto, las especificaciones de prueba resultantes son válidas para todas las condiciones de uso urbano globales.

Las pruebas estipuladas en la norma ISO 362 fueron diseñadas para ser independientes del diseño del vehículo y para ser adaptables a tecnologías futuras. La prueba garantiza una excitación de todas las fuentes de ruido relevantes, y el resultado final de la prueba refleja una combinación de estas fuentes como un compromiso entre el uso urbano normal y "I "peor de los ca"os".

El"estándar internac" onal ISO 362 consiste en una prueba con vehículos en movimiento. Las mediciones se relacionarán con las condiciones de funcionamiento del vehículo que





proporcionen el nivel de ruido más alto que pueda producirse durante la conducción urbana. El estándar especifica un indicador acústico denominado L_{urban} que combina:

- 1. Niveles máximos de ruido de un vehículo acelerado (prueba de aceleración).
- 2. Niveles máximos de ruido de un vehículo a velocidad constante (prueba de velocidad constante).

El estándar presenta un método de ingeniería para la medición del ruido emitido por vehículos de carretera de las siguientes categorías:

- **M** vehículos de motor que tengan al menos cuatro ruedas y se utilicen para el transporte de pasajeros.
- N vehículos de motor que tengan al menos cuatro ruedas y se utilicen para el transporte de mercancías
- L vehículos de motor con menos de cuatro ruedas
- 3.1 Procedimiento de medición para categoría M1

A continuación, se describe el procedimiento técnico de medición para automóviles de categoría M1. La categoría M1 se define para vehículos utilizados para el transporte de pasajeros y que comprendan no más de ocho asientos además del asiento del conductor.

La prueba de aceleración y velocidad constante se lleva a cabo en las relaciones de transmisión seleccionadas como especifica la norma. El vehículo debe estar en las condiciones de operación especificadas por el fabricante. Si el índice de relación potenciamasa (PMR) es mayor a 25, se realiza la prueba a velocidad constante usando los mismos cambios de la prueba de aceleración, de otro modo no se realiza prueba a velocidad constante. Los sonómetros se deben ajustar con una ponderación temporal rápida (F) y ponderación frecuencial (A) y deben ser ubicados a 7.5 m \pm 0.05 m perpendiculares al centro de la pista CC' y a 1.2 m \pm 0.02 m sobre el piso.

En la prueba de aceleración se conduce el vehículo a lo largo de la línea'CC' de la pista, manteniendo la trayectoria con la línea central del vehículo lo más cerca posible durante todo el ensayo. Se debe alcanzar una velocidad de 50 km/h cuando el punto de referencia del vehículo esté en la línea'PP'. Cuando la parte delantera del vehículo llegue al punto'AA', se debe acelerar a fondo, manteniendo la posición del acelerador hasta que la parte trasera del vehículo alcance el punto BB', donde se suelta el acelerador. En las mediciones de presión sonora se deben seguir los siguientes pasos:





- Realizar al menos cuatro mediciones en cada lado del vehículo y para cada relación de transmisión.
- 2. Anotar el nivel máximo de presión acústica ponderado A indicado durante cada paso del vehículo entre'AA' y'BB'.
- 3. Obtener cuatro mediciones consecutivas con una diferencia menor a 2,0 dBA
- 4. Medir la velocidad en'AA' $(v_{AA'})$,'BB' $(v_{BB'})$ redondeando a una cifra decimal.
- 5. Calcular $a_{wot \ test}$ y reportar el valor con una precisión de dos cifras decimales (ver normativa para fórmula de cálculo).

En las pruebas de velocidad constante se conduce el vehículo a lo largo de la línea'CC' a una velocidad constante de 50 km/h. En esta prueba se debe seguir el protocolo de medición para la prueba de aceleración desde el paso 1 al 3.

Los resultados de cada lado del vehículo se promediarán por separado tanto para la prueba de aceleración, como de velocidad constante. El resultado intermedio será el valor más alto de los dos promedios redondeados matemáticamente al primer decimal.

Todos los cálculos para derivar el nivel de presión sonora L_{urban} se realizarán por separado para el lado izquierdo y derecho del vehículo. El valor final para reportar será el valor más alto de los dos lados. Se consideran los siguientes pasos para el cálculo de L_{urban} :

1. Calcular $a_{wot \ test}$ mediante la siguiente expresión:

$$a_{wot\;test} = \frac{a_{wot\;test,1} + a_{wot\;test,2} + a_{wot\;test,3} + a_{wot\;test,4}}{4}$$

2. Calcular $L_{wot\ rep}$, el cual corresponde al nivel de presión acústica del vehículo con el acelerador completamente abierto (prueba de aceleración) que se obtiene mediante la siguiente expresión:

•
$$L_{wot \, rep} = L_{wot \, (i+1)} + k (L_{wot \, i} - L_{wot \, (i+1)}).$$

3. Calcular $L_{crs\,rep}$, el cual corresponde al nivel de presión acústica del vehículo a velocidad constante (prueba de velocidad constante) que se obtiene mediante la siguiente expresión:

•
$$L_{crs rep} = L_{crs (i+1)} + k(L_{crs i} - L_{crs (i+1)}).$$

- 4. En el caso de que se haya realizado una prueba con una única relación de transmisión, los valores $L_{wot\ rep}$ y $L_{crs\ rep}$ se derivan directamente del resultado de la prueba en sí.
- 5. Calcular el factor de potencia parcial k_P como:





- a. $k_P = 1 (a_{urban}/a_{wot \, ref})$, en casos distintos a la prueba de una sola marcha.
- b. $k_P = 1 (a_{urban}/a_{wot test})$, si solo se especificó una marcha para la prueba.
- c. $k_p = 0$, en casos donde $a_{wot \ test}$ es menor a a_{urban} .
- (ver normativa para fórmula de cálculo de a_{urban} y $a_{wot ref}$).
- 6. Calcular L_{urban} como:

•
$$L_{urban} = L_{wot \, rep} - k_P (L_{wot \, rep} - L_{crs \, rep}),$$

3.2 Caso de estudio para un Nissan Versa modelo 2013

Se realizaron mediciones siguiendo el procedimiento descrito en el estándar ISO 362 para un vehículo liviano marca Nissan Versa modelo 2013. Esto, con el fin de establecer la diferencia del nivel L_{urban} con el nivel medido mediante la metodología propuesta en la sección 2. En las pruebas previas a la medición seleccionó una sola relación de transmisión (2° marcha) cumpliendo lo estipulado en la normativa. De este modo los valores a reportar se presentan en la Tabla 22 .

Tabla 22. Valores para reportar en dBA según ISO 362.

L _{wot rep}	L _{crs rep}	k_P	Lurban	
72.47	68.17	0.25	71.37	

Considerando las mediciones del mismo vehículo bajo las condiciones de simplificación de las mediciones presentadas en sección 2 se tiene la siguiente diferencia de niveles de presión:

L_D	L _{wot rep}	Diferencia
69.65	72.47	2.82

3.3 Conclusiones

 El análisis de varianza indica que existen diferencias significativas en cuanto a la emisión de ruido por categorías, tanto para mediciones en estado estacionario, como dinámico. En el caso de las categorías: livianos, medianos y pesados, se





confirma que existe una relación proporcional de la masa de los vehículos con el nivel de emisión de ruido tanto en estado estacionario como dinámico.

- En las mediciones en estado estacionario los vehículos pesados generan en promedio un nivel de ruido mayor cerca al sistema de escape, seguido de los vehículos medianos, las motos y vehículos livianos. Particularmente, el nivel de ruido generado por las motos sobrepasa los vehículos livianos, a pesar de contar con motores más pequeños. Esto indica que el tren de potencia expuesto puede estar influyendo significativamente en los niveles medidos.
- Las mediciones en estado dinámico indican que los vehículos pesados generan en promedio un nivel de ruido mayor que las otras categorías, seguido de los vehículos medianos, las motos y vehículos livianos. En el caso de los vehículos pesados, el mayor tamaño del motor y el tipo de combustible que usan son factores importantes que pueden establecer diferencias significativas respecto a otras categorías en cuanto a la emisión de ruido.
- Los niveles medidos para las motos muestran particular relevancia considerando las características del motor y sistema de escape. Esta categoría presenta una contribución significativa al ruido vehicular en el Valle de Aburrá, dada su representación en el volumen del parque automotor.
- Algunos valores atípicos obtenidos en las mediciones pueden estar relacionados con condiciones específicas del funcionamiento del vehículo. En el caso de las motos, algunos modelos deportivos emiten mayor ruido, ya que la velocidad rotacional del motor y la potencia es mayor que en otros modelos bajo condiciones típicas de funcionamiento.
- El análisis por bandas de octava permite identificar diferencias en el espectro de frecuencias en las diferentes categorías establecidas. Este análisis muestra características específicas en la emisión de ruido de los vehículos, así como, las bandas de frecuencias de mayor contribución en la emisión de ruido.
- Las mediciones en vehículos híbridos y eléctricos muestran niveles significativamente menores a los vehículos a combustión. Para el caso del bus eléctrico se registraron niveles muy por debajo del promedio de los vehículos pesados. Cabe agregar que es necesario realizar estudios que permitan una mejor caracterización de este tipo de vehículos dadas las características de estas tecnologías.
- El procedimiento de medición que establece el estándar ISO 362 permiten reducir la variabilidad del modo de conducción del vehículo. Sin embargo, dada la especificidad del método, las mediciones se hacen dispendiosas. El caso de estudio demuestra la valides de las simplificaciones realizadas al método dada la similitud entre los niveles medidos bajo el estándar ISO 362 y los niveles obtenidos con el procedimiento propuesto.
- Los resultados de este estudio resultan relevantes ya que corresponden a un insumo importante para la calibración del modelo acústico del tráfico vehicular, disminuyendo la incertidumbre en los resultados y ayudando a la autoridad ambiental a generar planes de acción cada vez más efectivos.





4. Medición de dosimetría

4.1.1 Propósito de la medición:

Le medición de dosimetría se lleva a cabo con el objetivo de estimar la cantidad de energía sonora a la cual se encuentran expuestos trabajadores afines a tareas de tráfico rodado durante una jornada laboral.

4.1.2 Características de la medición

La medición de dosimetría se llevó a cabo como parte de las mediciones de ruido estacionario y dinámico. Los registros se tomaron en la pista de pruebas ubicada en el parqueadero de la Universidad de San Buenaventura ubicado en el municipio de Bello – Antioquia, barrio Salento (Calle 45 # 61-40), como se muestra en la Figura 34.



Figura 34. Visualización del parqueadero de la Universidad de San Buenaventura sede Bello

4.1.3 Definiciones

Dosis





Cantidad de energía sonora a la que se expone un trabajador durante una jornada laboral referenciada a 85dB, durante 8 horas.

$$D = \frac{100}{T_c} \int_{0}^{T} 10^{\frac{LA - L_c}{q}} dt$$

 T_c : Duración legal de una jornada laboral (8 horas).

 L_c : Nivel de referencia.

Q: Índice de bisección.

q:
$$\frac{Q}{\log 2}$$

LA: Nivel ponderado A con o sin constante de tiempo.

Dosis proyectada

Dosis proyectada, referenciada a 85dB, durante 8 horas considerando que el nivel de ruido, medido durante el tiempo que se hizo la medición (T), permanece constante.

4.1.4 Procedimiento de medición

El procedimiento de medición de dosimetría consiste en ubicar el dosímetro lo más cerca al oído del conductor quien debe acelerar el vehículo en posición neutra a las revoluciones que se indican en la Tabla 23. Se hacen tres capturas de información de diez (10) segundos cada una y se toma el dato de "Dosis proyectada" y "Nivel continuo equivalente (Leq)" de cada medición.

Tabla 23. Velocidad rotacional objetivo del motor para las diferentes categorías de vehículos.

Vehículos categoría L ¹	
Velocidad rotacional nominal del motor (S)	Velocidad rotacional de prueba del motor
$S \le 5000 rpm$	75% de S
S > 5000 rpm	50% de S
Vehículos categoría M y N ²	

1,10100101010

¹ Motocicletas

² Vehículos de transporte de pasajeros (M) y de bienes (N).





$S \le 5000 rpm$	75% de S
5000 < S < 7500 rpm	3750 rpm
$S \ge 7500 rpm$	50% de S

A los tres datos de exposición se les calcula el promedio y se obtiene el valor de dosis de exposición proyectada al que está sometido el conductor.

4.1.5 Resultados

Se realizó la dosimetría para los conductores de 65 vehículos, de los cuales 44 corresponden a vehículos destinados a carga de pasajeros o de bienes, entre los que destacan buses, camiones livianos y cabezotes de tractomulas. En la Tabla 24 se muestra una lista detallando la marca, el modelo y la categoría a la cual pertenecen.

Tabla 24. Vehículos medidos

Vehículo	Marca	Modelo	Categoría	Dosis proyectada promedio	$L_{A_{eq}}$ Promedio
1	Renault	Logan	М	7,7	63,9
2	Chevrolet	NKR	N	13,5	76,2
3	Chevrolet	NPR	N	9,7	74,8
4	Chevrolet	NKR	N	9,7	74,6
5	Chevrolet	NPR	N	0,7	63,6
6	Chevrolet	NPR	N	2,8	69,5
7	Kenworth	T800	N	3,3	70
8	Chevrolet	NQR	N	6,3	72,6
9	Chevrolet	NQR	N	11,7	75,6
10	Kenworth	T800	N	4,2	71,2
11	Sinotruck	CTH430	N	7,2	73,6
12	BYD	K9GA	N	11,5	75,6
13	Kenworth	T880	N	10	75
14	Kenworth	T880	N	0,6	62,4
15	Hino	FC9JKUZ	N	0,8	64,2
16	Hino	FC9JKUZ	N	5,5	72,3
17	Chevrolet	NQR	N	12,3	75,9
18	Chevrolet	NQR	N	16,2	76,9
19	Hino	FC9JKUZ	N	17,9	77,4
20	Chevrolet	NQR	N	11,6	75,4
21	Hino	SG1AF7B	N	7	73,4
22	Kenworth	T370 4X2	N	25,3	78,9





Vehículo	Marca	Modelo	Categoría	Dosis proyectada promedio	L _{Aeq} Promedio
23	Chevrolet	NQR	N	13,1	74,5
24	Chevrolet	NQR	N	1,5	66,8
25	Hino	FC9JKUZ	N	10	75,3
26	Hino	FC9JKUZ	N	7	72,4
27	Chevrolet	NQR	N	9,7	74,8
28	Chevrolet	NQR	N	2,8	69,6
29	Kenworth	T800	N	6,3	73
30	International	9400	N	0,2	58,7
31	Kenworth	T880	N	0,4	62,8
32	International	7600 SBA	N	0,2	60,6
33	International	4300	N	8,1	74
34	International	7600	N	7,6	73,8
35	Hino	FC9JBUS	N	1,5	66,9
36	International	4700	N	8,0	74,0
37	Hyundai	Grand i10	М	1,0	64,7
38	Chevrolet	LV452	N	3,4	70,3
39	Hyundai	I 10GL	N	0,7	63,8
40	Kenworth	T800	N	2,1	68,2
41	Kenworth	T800	N	0,3	60,5
42	Kenworth	T800	N	1,1	62,3
43	Chevrolet	LV452	N	0,5	61,9
44	Kenworth	T370	N	0,7	63,5
45	Chevrolet	B70	N	0,6	62,9
46	Nissan	Versa	L	0,4	61,3
47	Hiundai	Accent	L	1,0	64,5
48	Renault	Twingo	L	0,6	62,5
49	Renault	Sandero	L	0,4	61,1
50	Nissan	Versa	L	0,4	61,7
51	Chevrolet	Onix	L	4,4	71,4
52	Renault	Logan	L	1,1	65,2
53	Chevrolet	Aveo	L	0,6	63,2
54	Chevrolet	GrandVitara	L	4,2	70,9





Vehículo	Marca	Modelo	Categoría	Dosis proyectada promedio	L _{A_{eq}} Promedio
55	Ford	Escape	L	0,5	62,5
56	Chevrolet	Tracker LT	L	1,6	63,4
57	Ford	Explorer	L	0,5	61,3
58	Renault	Duster	L	1,2	69,2
59	Nissan	March	L	1,4	70,2
60	Chevrolet	Aveo	L	0,3	61,1
61	Chevrolet	Spark	L	1,4	65,5
62	Renault	Twingo	L	0,8	62,3
63	Renault	Twingo	L	1,6	68,3
64	Renault	Sandero	L	1,8	69,1
65	Renault	Twingo	L	0,6	60,4

Conclusiones

En los datos se observa que el nivel de presión sonora equivalente (LAeq) promedio oscila entre 58,7 dB(A) y 78,9dB(A) que corresponden a un bus liviano (Chevrolet LV452) y a un camión pesado (Kenworth T800), respectivamente. Estas diferencias de nivel pueden deberse a estado físico de los vehículos ya que, en la muestra estudiada, existen otros vehículos de la misma marca y modelo, cuyos niveles distan un poco de estos casos límite. En ese orden de ideas, la dosis proyectada va a variar en función, no sólo del tipo de vehículo y modo de manejo, sino del estado del vehículo como tal.





Tabla 25. Registro fotográfico

















5. Caracterización Vehicular mediante Holografías acústicas con Sonda PU

5.1 Propósito de la medición:

Con el fin de robustecer el proceso de caracterización acústica del parque automotor se realizaron mediciones basadas en holografía acústica. Estas tienen como fin describir los mecanismos de mayor generación de ruido en los vehículos evaluados. Esto permitirá argumentar en primera instancia las fuentes generadoras de ruido principales en modo estacionario de un vehículo.

5.2 Características de la medición

5.2.1 <u>Descripción del lugar de medición</u>

El lugar donde se realizaron las mediciones fue el área del parqueadero de la Universidad de San Buenaventura ubicado en el municipio de Bello – Antioquia, barrio Salento (Calle 45 # 61-40).







Figura 35. Visualización del parqueadero de la Universidad de San Buenaventura sede Bello.

5.2.2 Procedimiento de medición

La técnica implementada corresponde a holografía acústica, la cual puede ser descrita como la medición a detalle de la amplitud y fase del campo sonoro cercano a la fuente. Para esto, se realizan mediciones en un plano perpendicular a la superficie a caracterizar. Estas mediciones permiten obtener información cuantitativa sobre la presión acústica y el componente normal de la velocidad de partícula. Estas dos cantidades acústicas posibilitan el cálculo del componente normal de la intensidad acústica. La escala de colores para la visualización de la velocidad de partícula está dada en decibeles (dB). El rango de los valores de la data se representa desde azul oscuro (80 dB) hasta rojo oscuro (150 dB) con referencia a 50 [pm/s].

El sistema utilizado corresponde a una sonda de intensidad tipo PU que se integra a una cámara de video. Un esquemático del sistema es descrito a continuación.





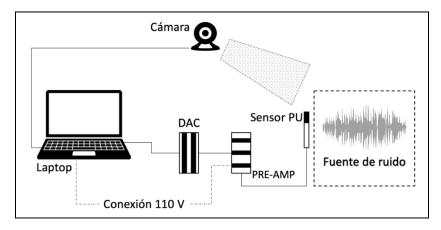


Figura 36. Diagrama esquemático de conexión medición sonda PU.

Las mediciones se realizaron con base en un escaneo perpendicular a cada superficie tomando como referencia el procedimiento establecido en el estándar internacional ISO 9614. Para esto, se realiza un barrido con la sonda en dirección normal a la superficie. El barrido se hace con un movimiento constante en dirección horizontal y vertical. El barrido se realiza en cada cara de la cabina.

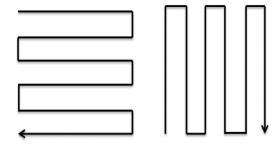


Figura 37. Barrido horizontal y vertical con Sonda PU

Con relación a los tiempos de muestreo, el mismo fue determinado para cada proceso de medición con base en la cantidad de superficies a medir. El proceso de medición fue repetido en algunas superficies con el propósito de obtener mejor resolución espacial.

5.3 Evaluación de vehículos

Se tomo una muestra de 26 vehículos considerando una muestra como mínimo por tipología descrita en este informe en secciones anteriores de este apartado. Las mediciones buscan describir de manera gráfica los sectores de mayor emisión en los vehículos. Las Holografías





acuáticas permiten describir también, la magnitud e impacto en un sector del vehículo producto de su funcionamiento.

A continuación, se enlistan los vehículos evaluados por tipología.

Tabla 26. vehículos evaluados mediante técnica de holografía acústica

Maraa	Modele	A = -	Diese	Catagoría
Marca	Modelo	Año	Placa	Categoría
Nissan	Qashqai	2017	HQO753	Liviano
Nissan	Versa	2013	MVW089	Liviano
Agrale	MA 8.7EuroV	2017	EQS189	Mediano
Chevrolet	NPR	2017	ESO907	Mediano
Chevrolet	NQR	2019	EQW002	Mediano
Chevrolet	NQR	2018	EQW194	Mediano
Chevrolet	NPR	2010	ESO 907	Mediano
Hino	FC9JKUZ	2018	ESY 363	Mediano
Chevrolet	NQR	2017	EQS019	Mediano
BMW	F850 GS	2019	YCJ31E	Motocicleta
Yamaha	FZ	2021	QGO38F	Motocicleta
YAMAHA	NMAX 155	2019	KQK79F	Motocicleta
YAMAHA	CRYPTON	2015	LQM99E	Motocicleta
YAMAHA	SZR150	2019	YOD84F	Motocicleta
International	WorkStar 7600	2011	STZ275	Pesado
Foton	Aumark BJ1044V9JD4-F1	2021	GTY164	Pesado
Hino	500 SG1AF7B	2020	JKY586	Pesado
International	9400	2012	SZX591	Pesado
International	76000SBA	2012	TRI209	Pesado
Kenworth	T800	2011	SKR754	Pesado
Kenworth	De la montaña T800	2013	TRJ713	Pesado
Kenworth	T880	2020	GYY954	Pesado
Kenworth	T880	2019	ODT858	Pesado
Sinotruck	C7H430ZZ4256V384HE1LB	2020	JKY619	Pesado
BYD	K9GA	2020	FWK254	Pesado eléctrico





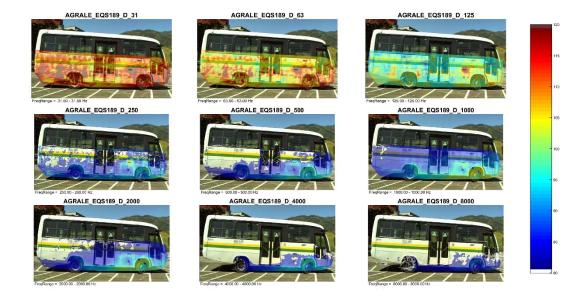


Figura 38. Ejemplo, Holografías por bandas de frecuencia vehículo mediano.

Los resultados numéricos y gráficos se presentan se presentan en la carpeta C643_Anexo_Holografias por medio de informes individuales de los 26 vehículos.

5.4 Conclusiones Generales

De acuerdo con los resultados de cada caracterización vehicular es posible identificar que cada tipología de vehículo proporciona no solo diferentes niveles de emisión, sino diferentes puntos de emisión (tanto con respecto al lugar en el vehículo como respecto al suelo). De manera general, se encontró secciones de los motores con emisiones altas y sectorizadas en la parte frontal y secciones de ruedas con vistas al mismo, además de los sistemas de escape y compresores en vehículos pesados.

Con respecto a los vehículos livianos, quienes presentaron los niveles más bajos de emisión de ruido, se encuentra que el mayor aporte se ubica en el cofre en la sección frontal (Radiador). Adicionalmente, que parte de la emisión del ruido del motor se trasmite por las ruedas y secciones abiertas del motor en la parte inferior del vehículo. Se evaluó la emisión de los exostos, y se presentan niveles bajos de emisión de ruido.

Los vehículos medianos presentan gran nivel de emisión de ruido en los sistemas de escapes, algunos se encuentran en uno de los lados del vehículo en la parte inferior. Se ha denotado que el motor de estos vehículos se encuentra en la parte inferior y que solo los





sistemas de refrigeración se encuentran en la parte frontal, donde se refleja gran parte de la emisión de ruido adicional.

Gran parte de la toma de muestras se realizó en vehículos pesados. Esta es la tipología de vehículos con mayor emisión. Estos vehículos cuentan con motores grandes encerrados por materiales con poca perdida por transmisión. Cuentan con grandes aberturas dispuestas para la circulación de aire para la refrigeración del motor. El ruido emitido identificado, no solo proviene de la combustión, sino de las partes móviles como ventiladores flujo de líquidos y compresores. El escape, el cual se encuentra a unos 3 metros de altura en la mayoría de los vehículos contribuye a la emisión de ruido en media y baja frecuencia.

Por parte de las motocicletas las dos principales fuentes de ruido son el motor, quien está expuesto directamente al aire y el exosto. Se ha encontrado que parte de estos vehículos tienen piezas que vibran por falta de mantenimiento y que también son causantes de la emisión de ruido.

El uso de esta técnica no solo proporciona información para el detalle de las fuentes de ruido en vehículos, sino que permite atención a detalles de la parte mecánica emisoras de ruido y que puede ser controlables, a través de mantenimiento de los vehículos y los motores.

2.2 Mapa de ruido automotor 2D en zona de estudio con los valores de emisión medidos para cada tipología de vehículo

Con el fin de evaluar el impacto de las tipologías de vehículos y asumiendo los hallazgos de este apartado, se ha determinado la influencia de cada tipología de vehículo en una zona, para este caso la ZUAP centro. A continuación, se presentan los mapas ajustados al escenario actualizado para tipologías de vehículos Liviano, Medianos y motos. Cada uno de ellos cuenta con el ajuste determinado por los hallazgos de la caracterización vehicular.



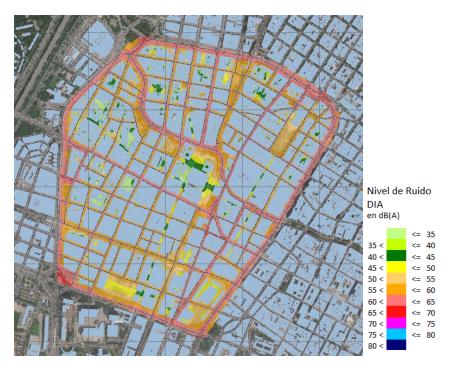


Figura 39. Impacto por ruido debido a vehículos livianos

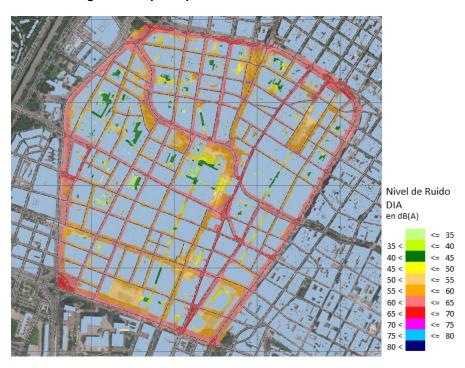


Figura 40. Impacto por ruido debido a vehículos Medianos



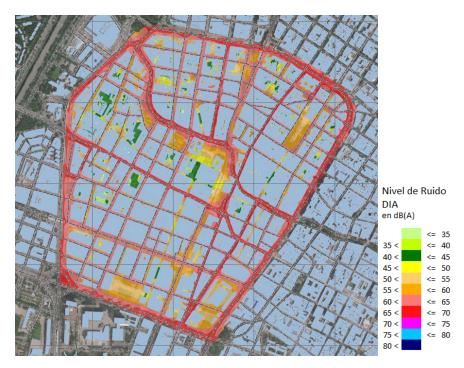


Figura 41. Impacto por ruido debido a vehículos Motocicletas

Del análisis de la Figura 39 a la Figura 41 se presenta el impacto al ruido ambiental producto de la emisión de cada tipología de vehículo (Liviano, Mediano y motocicletas, respectivamente). Es posible notar que para las tipologías livianos y Medianos los niveles de ruido máximo se presentan entre 60 y 65 dBA. Para la tipología de motocicletas los niveles máximos se presentan entre 65 y 70 dBA. El mapa Actualizado tiene zonas donde se presentan niveles de 70 a 75 dBA, en vías principales donde se suman la mayoría de los vehículos que transitan por la ZUAP. Actualmente, los mayores niveles se presentan por la cantidad de vehículos por tipología. Uno de los cambios más relevantes en las correcciones aplicadas es la redefinición de la categoría pesados por medianos, ya que refleja un cambio significativo en los niveles de ruido ambiental.

2.3 Recopilación y análisis de la información relacionada sobre el parque automotor y clasificación en el Valle de Aburrá y su asociación con las mediciones del parque automotor.

El siguiente informe presenta un análisis del modelo CNOSSOS para el cálculo de la emisión de ruido de fuentes de tráfico en carretera. Siguiendo las ecuaciones que rigen el nivel de potencia de las diferentes categorías de vehículos que contempla el modelo para diferentes velocidades. En CNOSSOS se considera una vía como una fuente lineal que aproxima la trayectoria de la fuente puntual equivalente móvil. Bajo esta consideración se puede estimar el nivel de potencia acústica de la vía en función del flujo de vehículos y la





velocidad media a la que circulan. De este modo, se plantean diferentes situaciones según el flujo vehicular para analizar la potencia acústica de una fuente lineal.

A partir del nivel de potencia de una vía, se calcula el nivel de presión sonora usando un modelo de propagación de fuente lineal incoherente. Los cálculos se realizan bajo condiciones aproximadas a las jornadas de caracterización del ruido vehicular para una muestra del parque automotor del Valle de Aburrá. Adicionalmente, se estiman los niveles de presión sonora mediante simulación en el software SoundPlan, a partir de un modelo simplificado que aproxima las condiciones de medición en campo en estado dinámico.

Finalmente, se presenta un análisis de la situación de medición, ya que los niveles de presión sonora medidos se obtienen bajo condiciones de aceleración, con el nivel de presión sonora máximo como indicador acústico, se asume que el nivel medido corresponde con el nivel de presión sonora de una fuente puntual frente al receptor que considera el ruido de propulsión y de rodadora simultáneamente. De esta forma, se calcula el nivel de potencia promedio de los vehículos medidos, a través de la expresión de nivel de presión sonora para una fuente puntual.

Modelo CNOSSOS para la emisión de ruido de fuentes de tráfico

En CONOSSOS la fuente se modela como una o varias fuentes puntuales. De este modo, cada vehículo está representado por una fuente puntual única ubicada a 0.05 m por encima de la superficie de la carretera. Por otro lado, el flujo de tráfico está representado por una fuente lineal colocada en el centro del carril. La potencia sonora de la fuente se define "n "campo semi-li"re", donde no hay objetos reflectantes en su entorno excepto por la superficie de la carretera [27].

Clasificación de los vehículos

El método de cálculo CNOSOS permite determinar el ruido del tráfico rodado considerando la emisión de ruido de cada vehículo individual que forma el flujo de tráfico. Estos vehículos se agrupan en cuatro categorías diferenciadas, con respecto a sus características de emisión como indica la siguiente tabla:

Tabla 27. Categorías según CNOSSOS

Categoría	Nombre	Descripción
C1	Vehículos de motor liviano	Vehículos de pasajeros, furgonetas de reparto ≤ 3.5 toneladas, vehículos deportivos utilitarios, vehículos multipropósito, incluidos remolques y caravanas.





C2	Vehículos medianos pesados	Vehículos medianos pesados, furgonetas de reparto > 3,5 toneladas, autobuses, convertibles, etc. con dos ejes y montaje de neumáticos gemelos en el eje trasero.		
С3	Vehículos pesados	Vehículos pesados, descapotables, autobuses, con tres o más ejes.		
C4a	Vehículos motorizados de	Ciclomotores, triciclos o cuatrimotos ≤ 50 cc		
C4b	motorizados de dos ruedas	Motos, triciclos o cuatrimotos > 50 cc		
C5	Categoría abierta	Por definir según futuras necesidades		

Para los vehículos motorizados de dos ruedas, se definen dos subclases según la cilindrada en centímetros cúbicos (CC), diferenciando ciclomotores de motocicletas más potentes, ya que operan en modos de conducción distintos y su número suele variar ampliamente. Se prevé una quinta categoría abierta para vehículos nuevos que puedan desarrollarse en el futuro y que pueden ser lo suficientemente diferentes en su emisión de ruido como para requerir la definición de una categoría adicional. Esta categoría podría abarcar, por ejemplo, vehículos eléctricos, híbridos, etc.

Potencia acústica de un solo vehículo

El método de cálculo CNOSSOS establece que la producción instantánea de ruido de un vehículo se define mediante dos parámetros principales: la categoría y la velocidad, y se corrige por varios efectos ambientales o específicos. De este modo, los cálculos se realizan con velocidades independientes para cada categoría de vehículo, por lo que se asume que todos los vehículos de la categoría m conducen a una velocidad v_m en km/h.

El modelo de emisiones consiste en un conjunto de ecuaciones que representan las dos principales fuentes de ruido en un vehículo de carretera:

- Ruido de rodadura debido a la interacción llanta-carretera (incorpora el ruido aerodinámico);
- Ruido de propulsión producido por la línea motriz (motor, escape, etc.) del vehículo.





Para vehículos de motor ligero, medianos y pesados, la potencia acústica corresponde a la suma energética del ruido de rodadura (R) y de propulsión (P). Por lo tanto, el nivel de potencia acústica de las categorías m=1,2,3 se define como:

$$L_{W,i,m}(v_m) = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_{WR,i,m}(v_m)}{10}} + 10^{\frac{L_{WP,i,m}(v_m)}{10}} \right)$$
 (0.1)

donde:

- i corresponde al índice de cada banda de octava desde 125 Hz a 4 kHz,
- $L_{WR,i,m}(v_m)$ es el nivel de potencia acústica del ruido de rodadura y;
- $L_{WP,i,m}(v_m)$ es el nivel de potencia acústica del ruido de propulsión.

En la categoría 4, sólo se considera el ruido de propulsión para la fuente lineal, de este modo,

$$L_{W \ i \ m=4}(v_{m=4}) = L_{W \ i \ m=4}(v_{m=4}).$$

La expresión matemática general para el nivel de potencia acústica emitida por la rodadura o propulsión en función de la velocidad del vehículo, donde $20 \le v_m \le 130$ km/h es:

$$L_{W,i,m}(v_m) = A_{i,m} + B_{i,m} f(v_m),$$

donde $f(v_m)$ es una función logarítmica de v_m para el ruido de rodadura y aerodinámico, y una función lineal de v_m para el caso de ruido de propulsión. Los coeficientes $A_{i,m}$ y $B_{i,m}$ están dados para cada categoría y cada banda de octava i. Los coeficientes se definen bajo las siguientes condiciones de referencia:

velocidad constante del vehículo;





- carretera plana;
- temperatura de referencia $\tau_{ref} = 20$ grados centígrados;
- una calzada de referencia virtual, formada por un promedio de hormigón asfáltico denso 0/11 y asfalto de masilla de piedra 0/11, de entre 2 y 7 años y en estado de mantenimiento representativo;
- superficie seca;
- una flota de vehículos cuyas características corresponden a los valores encontrados para la media europea;
- sin neumáticos con clavos.

Los coeficientes $A_{i,m}$ y $B_{i,m}$ se presentan por bandas de octava en el apéndice III-A de [27].

Ruido de rodadura

El nivel de potencia acústica para el ruido de rodadura se calcula mediante la siguiente expresión:

$$L_{WR,i,m}(v_m) = A_{R,i,m} + B_{R,i,m} \log \left(\frac{v_m}{v_{ref}}\right) + \Delta L_{WR,i,m}(v_m), \tag{0.2}$$

donde $v_{ref} = 70$ km/h es la velocidad de referencia y $\Delta L_{WR,i,m}(v_m)$ corresponde a la suma de los coeficientes de corrección aplicada a la emisión de ruido de rodadura para condiciones específicas de la carretera o del vehículo que se desvían de las condiciones de referencia. Los coeficientes de corrección se definen en la sección III.2.3 de [27].

Ruido de Propulsión

La emisión de ruido de propulsión incluye todas las contribuciones del motor, escape, engranajes, admisión de aire, etc. La potencia acústica del ruido de propulsión se calcula de la siguiente forma:





$$L_{WP,i,m}(v_m) = A_{P,i,m} + B_{P,i,m} \frac{v_m - v_{ref}}{v_{ref}} + \Delta L_{WP,i,m}(v_m), \qquad (0.3)$$

donde $\Delta L_{WP,i,m}(v_m)$ corresponde a la suma de los coeficientes de corrección aplicada a la emisión de propulsión, los cuales se definen en la sección III.2.4 de [27].

Emisión de potencia sonora del flujo de tráfico

La emisión de ruido de un flujo de tráfico está representada por una línea fuente caracterizada por su potencia sonora direccional por metro por frecuencia. Corresponde a la suma de las emisiones sonoras de los vehículos individuales en el flujo de tráfico, teniendo en cuenta el tiempo de permanencia de los vehículos en el tramo de carretera considerado. Si se supone un flujo constante de vehículos Q_m por hora, con una velocidad media v_m , la potencia acústica direccional por metro por banda de frecuencia de la línea fuente $L_{W',ea,line,i,m}$, determinada por el flujo del vehículo, se define por:

$$L_{W',eq,line,i,m} = L_{W,i,m} + 10 \log_{10} \left[\frac{Q_m}{1000 v_m} \right], \tag{0.4}$$

donde $L_{W,i,m}$ es la potencia acústica direccional instantánea "n "campo semi-li"re" de un solo vehículo. $L_{W',eq,line}$ se expresa en dB (re. 10^{-12} W / m). Los datos de flujo de tráfico Q_m deben expresarse como un promedio anual por período de tiempo (día-tarde-noche), por clase de vehículo y por fuente lineal. Para todas las categorías, deben utilizarse los datos de flujo de tráfico de entrada derivados del recuento de tráfico o de los modelos de tráfico. La velocidad media v_m corresponde a la velocidad representativa por categoría de vehículo: en la mayoría de los casos, la velocidad máxima legal para la categoría de vehículo.

Cálculo de los niveles de presión sonora a partir de la potencia acústica

La Figura 42 presenta los niveles de potencia acústica ponderado A en función de la velocidad. Estos niveles son calculados a partir de la suma logarítmica de los niveles por bandas de octava, usando las ecuaciones (0.11), (0.12) y (0.13). De este modo, los coeficientes de corrección se descartan para este análisis. Las líneas azules, naranjas y verdes representan $L_{WR,m}(v_m)$ (rodadura), $L_{WP,m}(v_m)$ (propulsión) y $L_{W,i,m}(v_m)$ (total) respectivamente. La figura presenta las 4 categorías. Sin embargo, de los vehículos a motor





de dos ruedas solo se muestra la subcategoría 4b, ya que únicamente se midieron motocicletas de cilindrada mayor a 50 CC. El punto rojo señala el nivel de potencia acústica total a $v_m=40\,$ km/h, correspondiente con la velocidad promedio registrada para las mediciones en estado dinámico.

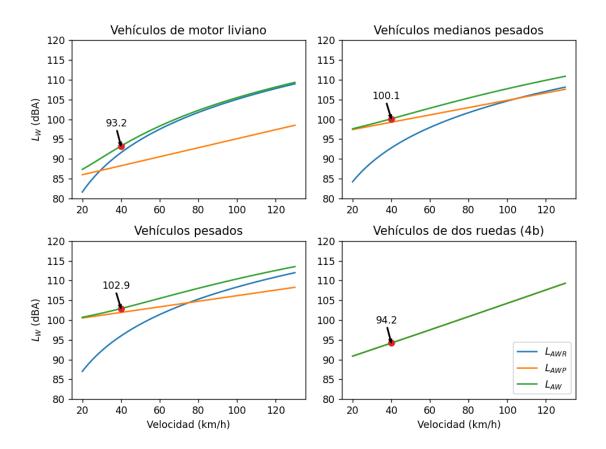


Figura 42. Potencia acústica en función de la velocidad por categorías, bajo condiciones de referencia.

Los niveles de potencia presentados en la Figura 42 corresponden a un solo vehículo o fuente puntual bajo condiciones de referencia. Para representar el nivel de potencia de un vehículo en una vía, CNOSSOS considera una fuente lineal que aproxime la trayectoria de la fuente puntual equivalente móvil. De forma práctica, la fuente lineal se puede representar mediante un conjunto de segmentos de línea recta como presenta la Figura 43.





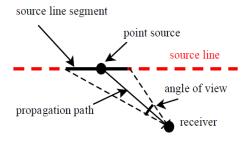


Figura 43. Representación de una fuente lineal en CNOSSOS.

Para estimar el nivel de potencia de la fuente lineal, se usa la ecuación (0.14). Con el fin de analizar la dependencia de la potencia con el fujo vehicular, se considera una velocidad constante $v_m = 40$ km/h y diferentes valores para Q_m . De este modo se construye la Figura 44, donde puede observar la dependencia logarítmica de la potencia de una fuente lineal.

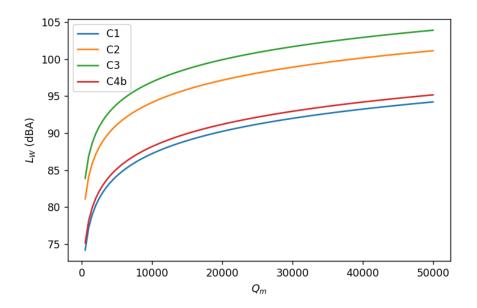


Figura 44. Nivel de potencia de una fuente lineal.

A partir de la Figura 44 se pueden considerar las siguientes situaciones:

Situación 1: Si se asume un flujo $Q_m=40000$, el término logarítmico se hace cero. De este modo, $L_{W',eq,line,i,m}=L_{W,i,m}$. Bajo esta simplificación, el nivel de potencia de la fuente lineal





corresponde con el nivel de potencia de un solo vehículo. Visto de otro modo, cada segmento de fuente lineal tiene la potencia de un vehículo, por lo que cada segmento contribuye significativamente al nivel de presión sonara sobre un receptor.

Situación 2: Si se asume un flujo $Q_m < 40000$, el término logarítmico se hace negativo, de este modo, $L_{W',eq,line,i,m} < L_{W,i,m}$. En este caso el nivel de potencia es menor al de un solo vehículo, por lo que cada segmento de recta contribuye en menor grado al nivel de presión sonora sobre un receptor en comparación con la situación 1.

Situación 3: Si se asume un flujo $Q_m > 40000$, el término logarítmico se hace positivo, y $L_{W',eq,line,i,m} > L_{W,i,m}$. Este escenario indica que la fuente lineal tiene una potencia mayor a la de un solo vehículo.

Para estimar el nivel de presión sonora generado por una fuente lineal a partir de la potencia acústica, CNOSSOS asume una fuente lineal infinita con segmentos de fuente incoherentes (segmentos que emiten con fase aleatoria). La expresión de presión cuadrática media para este tipo de fuente está dada por:

$$\overline{p^2} = \rho_0 c \frac{W}{\pi d}$$

donde $\rho_0 \approx 1.18$ kg/m³ es la densidad del aire promedio en las condiciones de medición, $c \approx 344.8$ m/s es la velocidad del sonido a una temperatura de 22°C, W es la potencia acústica de la fuente lineal y d es la distancia perpendicular entre el receptor y la fuente. Mediante manipulación algebraica se obtiene:

$$\overline{p^2} = \rho_0 c \frac{W}{\pi d} \frac{p_{ref}^2}{p_{ref}^2} \frac{W_{ref}}{W_{ref}}$$

Reordenando





$$\frac{\overline{p^2}}{p_{ref}^2} = \frac{W}{W_{ref}} \frac{\rho_0 c W_{ref}}{\pi d p_{ref}^2}$$

y aplicando logaritmo en base 10 y multiplicando por 10 se obtiene:

$$10\log_{10}\left(\frac{\overline{p^2}}{p_{ref}^2}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{W}{W_{ref}}\right) - \log_{10}(d) + 10\log_{10}\left(\frac{\rho_0 c W_{ref}}{\pi p_{ref}^2}\right),$$

lo que equivale a:

$$L_p = L_W - 10 \log_{10}(d) + 10 \log_{10}\left(\frac{\rho_0 c W_{ref}}{\pi p_{ref}^2}\right)$$
 (0.5)

donde $W_{ref} = 1 \times 10^{-12} \ \mathrm{y} \ p_{ref} = \ 20 \times 10^{-6}.$

La Tabla 28 presenta el nivel de presión sonora calculado para una vía de longitud infinita con un flujo de $Q_m=40000,20000,10000$ (situación 1 y 2). Para este ejemplo se usa la ecuación (0.15), para las categorías m=1,2,3,4b, a una distancia de la fuente de $d=7.5\,\mathrm{m}$.

Tabla 28. Nivel de presión sonora calculado asumiendo una fuente lineal infinita.

Q_m	Categorías, $L_p(dBA)$				
	1	2	3	4b	
40000	79.6	86.5	89.3	80.5	
20000	76.6	83.5	86.3	77.5	
10000	73.6	80.5	83.3	74.5	





Como indica la ecuación (0.15), el nivel de presión sonora calculado en un punto para una fuente lineal infinita depende de la distancia d perpendicular entre el receptor y la fuente. Adicionalmente, la $Tabla\ 29$ demuestra un aumento de 3dBA cada vez que se duplica el flujo de vehículos.

Niveles de presión sonora estimados mediante simulación

Para estimar el nivel de presión sonora sobre un receptor a 7.5 m, se modela el sitio de medición para las pruebas en estado dinámico como muestra la Figura 45. La pista está representada por la línea roja (fuente lineal de 40 m de largo), mientras los receptores corresponden a los puntos amarillos ubicados a 7.5 m perpendicular la fuente y a 1.2 m del suelo.



Figura 45. Modelo del sitio de medición para pruebas en estado dinámico.

Se simula un flujo de $Q_m=40000$ vehículos a 40 km/h para aproximar las condiciones descritas anteriormente. Bajo esta configuración, el nivel de potencia acústica de la vía se presenta en la Tabla 29 . Como se observa, los niveles de potencia se aproximan a los niveles calculados (ver Figura 46). Las diferencias entre los niveles de potencia calculados y los simulados pueden estar asociados a algunos coeficientes de corrección en el modelo y a diferencias en las condiciones de referencia.

Tabla 29. Niveles de potencia de la vía por categoría.

Categoría 1 2 3 4b	
--------------------	--





L _{w line} (dBA) 93.84	100.27	103.05	94.37
---------------------------------	--------	--------	-------

El cálculo de presión sonora se realiza asumiendo la longitud de 40 m de la pista para $Q_m=40000,10000$, como indica la Figura 46 . Los valores estimados de nivel de presión sonora se presentan en la Tabla 30.

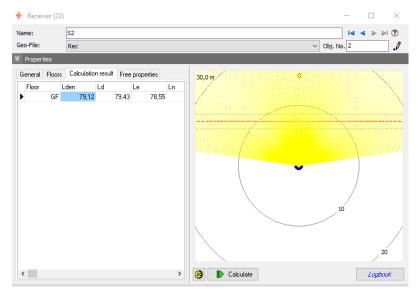


Figura 46. Modelo

Figura 47. Cálculo del nivel de presión sonora.

Tabla 30. Niveles de presión sonora simulados por categoría.

Categoría	1	2	3	4b
$L_{eq}(dBA),Q_m=40000$	79.20	85.73	88.58	79.69
$L_{eq}(dBA),Q_m=10000$	73.18	79.71	82.56	73.67

72.5, 80.9, 84.3 y 79.2dBA

Se puede observar que los niveles obtenidos mediante simulación se aproximan a los niveles calculados para una fuente lineal de longitud infinita.



Niveles de presión sonora medidos en estado dinámico

Teniendo en cuenta que el modelo CNOSSOS presenta una clasificación de vehículos adaptada a las características del parque automotor en la Unión Europea, se realizó una revisión cuidadosa de las categorías presentadas en las mediciones. Se encontró que 8 camiones pesados, de solo dos ejes, que habían sido clasificados como vehículos pesados, son considerados como vehículos medianos pesados en CNOSSOS. De este modo se procedió a reclasificar estos vehículos según las características que propone el modelo. La Figura 47 presenta el diagrama de cajas y bigotes de los niveles de presión sonora medidos en estado dinámico L_D por categorías según CNOSSOS.

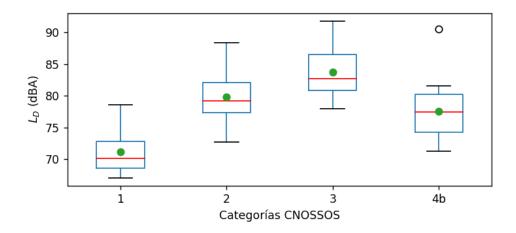


Figura 48. Niveles medidos en estado dinámico.

Los niveles promedio, el percentil 75 y el percentil 95 se presentan en la Tabla 31.

Tabla 31. Niveles medidos en estado dinámico

Medida	Categorías, L_{max} (dBA)				
	1	2	3	4b	
Promedio	71.1	79.8	83.7	77.5	
Percentil 75	72.8	82.1	86.5	80.2	
Percentil 95	77.9	84.9	87.9	81.4	





Es importante aclarar que los niveles medidos se obtienen bajo condiciones de aceleración sin carga, en campo semi-libre, con nivel de presión sonora máximo (L_{max}) como indicador acústico. De este modo, L_{max} representa el nivel de presión sonora de un vehículo en movimiento, que se encuentra perpendicular al receptor como representa la Figura 49.

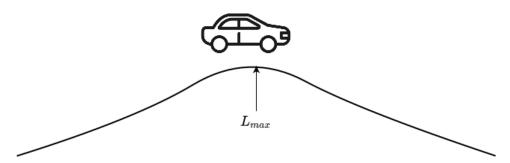


Figura 49. Representación del nivel de presión sonora máximo registrado en las mediciones.

Bajo esta situación de medición, se puede asumir que L_{max} corresponde con el nivel de presión sonora continuo equivalente de una fuente lineal que considera el ruido de propulsión y de rodadora simultáneamente.

Usando el indicador L_{max} se puede calcular el nivel de potencia acústica aproximado de un vehículo, a través de la expresión de nivel de presión sonora para una fuente lineal sobre una superficie rígida. Despejando L_W de la ecuación (0.15) se obtiene:

$$L_W = L_p + 10 \log_{10}(d) - 10 \log_{10}\left(\frac{\rho_0 c W_{ref}}{\pi p_{ref}^2}\right)$$
 (0.6)

Usando la ecuación (0.16) se calcula el nivel de potencia acústica a partir de los niveles de presión en la Tabla 32. Estos valores corresponden con los niveles de potencia de una fuente lineal de longitud infinita.

Tabla 32. Nivel de potencia acústica de una fuente lineal, obtenidos a partir de los niveles de presión medidos.

Medida	Categorías, $L_W(dBA)$			
	1	2	3	4b
Promedio	84.8	93.4	97.4	91.2





Percentil 75	86.5	95.7	100.1	93.8
Percentil 95	91.5	98.6	101.5	95.0

La diferencia entre los niveles de potencia acústica calculados para una fuente lineal, asumiendo $Q_m=40000$. y los niveles de potencia obtenidos a partir de las mediciones se presenta en la Tabla 33.

Tabla 33. Diferencia entre los niveles de potencia acústica calculados y los obtenidos mediante L_{max}

Medida	Categorías (dBA)				
Wedida	1	2	3	4b	
$L_W - L_{W\ Promedio}$	8.4	6.7	5.5	3.0	
$L_W - L_{W\ Percentil\ 75}$	6.8	4.4	2.8	0.4	
$L_W - L_{W\ Percentil\ 95}$	1.7	1.6	1.4	-0.8	

Partiendo de la suposición de que las condiciones de medición son comparables con las condiciones que propone CNOSSOS, la Tabla 33 indica que el método de cálculo CNOSSOS estima niveles de potencia superiores a los obtenidos mediante el indicador L_{max} medido, para una fuente lineal infinita. En el caso de la categoría 4b, usando el percentil 75 y 95 se obtienen valores similares a los calculados mediante CNOSSOS.

2.4 Análisis Aforos vehiculares registrados por SIMM y niveles de ruido registrado por estaciones de Monitoreo de Ruido SITA.

Con el fin de determinar la variación de los niveles de ruido medidos y simulados se realizó una simulación que contiene los datos de aforo vehicular por tipología medidos en un día para vías representativas cercana a 2 puntos de medición de estaciones de monitoreo de SIATA. Estos datos fueron tomados en instantes donde solo el aforo vehicular era predominante como fuente de ruido, en el marco del aislamiento preventivo debido a la emergencia por el COVID19. A continuación, se presentan los resultados de los resultados y análisis.

Tabla 34. Resultados Estación de monitoreo MED-ZOOL - Aforo vehicular Av. Guayabal

Fecha	LAeq (dBA) Medido	Carril	Velocidad (km/h)	Veh. Categ 1 (Motos)	Veh. Categ 2 (livianos)	Veh. Categ 3 (Medio Pesados)	Total Vehículos	LAeq (dBA) Simulado
2019-08-30 17:00	64.2	DAI-ZOOLOGICO- P1-L0	40	1018	90	41	1149	





	DAI-ZOOLOGICO- P1-L1	36	882	61	32	975	64.2
	DAI-ZOOLOGICO- P1-L2	37	171	45	14	230	

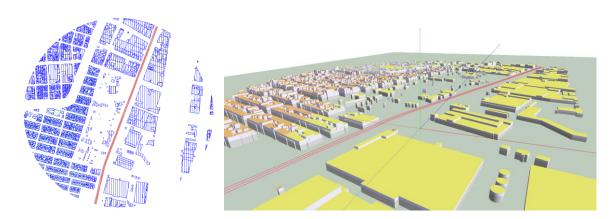


Figura 50. Modelo para estimación de ruido en avenida Guayabal

Tabla 35. Resultados Estación de monitoreo MED-PJIR – Aforo vehicular Av. Regional

Fecha	LAeq (dBA) Medido	Carril	Velocidad (km/h)	Veh. Categ 1 (Motos)	Veh. Categ 2 (livianos)	Veh. Categ 3 (Medio Pesados)	Total Vehículos	LAeq (dBA) Simulado
2021-01-18 17:00	70.0	DAI-INEM-P1- L0	41	820	151	130	1101	
		DAI-INEM-P1- L1	44	811	199	172	1182	67.5
		DAI-INEM-P1- L2	46	769	165	108	1042	
2021-01-18 17:00	70.0	DAI-INEM-P1- L0	41	820	151	130	1101	
		DAI-INEM-P1- L1	44	811	199	172	1182	69.0
		DAI-INEM-P1- L2	46	769	165	108	1042	





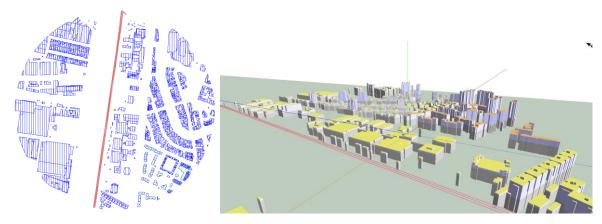


Figura 51. Modelo para estimación de ruido en Avenida Regional

Aunque se obtienen niveles de ruido por cada categoría a través de mediciones, este modelo corresponde a una situación ideal en donde las tipologías se encuentran independiente a las demás en una vía. Sin embargo, en la dinámica se tiene emisión de diferentes carriles, mixtura de categorías, vías separadas con flujos contrarios que pueden incidir en el cálculo del nivel de ruido total. Esto se puede percibir con el ejercicio donde se compara el nivel medido, con condiciones de aforos estimadas al mismo tiempo, y la simulación del escenario.

El resultado para la Avenida Guayabal indica un valor medido de 64.2 dBA, mismo valor del simulado, asumiendo las categorías 1. livianos, 2. Motos, 3. Medio Pesados. Esa misma distribución se dispuso para el caso de la avenida regional, pero se halló una diferencia significativa donde el valor simulado corresponde a 67.5 dBA frente a un valor medido de 70.0 dBA. Se realizó un ejercicio adicional en el cual se cambió la categoría 3 de mediopesados a pesados (esto justificado por la categoría de la vía), donde se obtuvo un nivel de 69.0 dBA.

Estos resultados sustentan que la variabilidad de la tipología de vehículos sobre una vía, además de las otras características físicas de la vía interfieren en la estimación de un valor único global del nivel de presión sonora en un punto receptor. Sin embargo, los niveles medidos individuales por categoría sugieren una condición óptima para ser comparados directamente con resultados de las mediciones. Aunque se debería esperar que el modelo tuviese niveles mayores a los medidos, se denota similitud en las condiciones donde se valida que el modelo con respecto al nivel a largo plazo de ruido ambiental no varía más de +- 2 dB.





Conclusiones

- El modelo CNOSSOS asume condiciones de velocidad constante para modelar la emisión de fuentes de tráfico considerando un promedio de emisión sonora en un intervalo de tiempo. Sin embargo, situaciones de velocidad variable no se contemplan mediante simulación. Por otro lado, el proceso de medición en estado dinámico contempla el análisis del ruido vehicular en una situación de aceleración. De este modo, ambas metodologías (simulación y medición) son complementarias para la caracterización de fuentes vehiculares, ya que consideran escenarios diferentes.
- La clasificación por categorías realizada para las mediciones difiere de la clasificación que propone CNOSSOS para algunos vehículos. Se encuentra que algunas tipologías de camiones y buses pesados pertenecen a la categoría de vehículos medianos pesados bajo las consideraciones que presenta CNOSSOS. Es importante tener en cuenta que las características de los vehículos que propone CNOSSOS están enmarcadas en el contexto europeo, por lo que es necesario realizar un estudio en el contexto nacional que permita una adecuada relación de categorías para metodologías de aforamiento vehicular, con el fin de obtener modelos precisos del tráfico vehicular.
- Las condiciones de medición difieren de las condiciones propuestas en el modelo, ya que las mediciones se realizaron en vehículos bajo aceleración sin carga. El modelo CNOSSOS establece condiciones típicas de operación (vehículos cargados), por lo que los niveles de emisión en estas situaciones no son comparables.
- Los niveles de presión sonora obtenidos mediante simulación se aproximan a los niveles calculados para una fuente lineal de longitud infinita. De este modo se concluye que la implementación de CNOSSOS en SoundPlan considera vías de longitud infinita.
- El indicador acústico L_{max} representa el nivel de presión sonora que ejerce una fuente puntual en frente del receptor considerando simultáneamente el ruido de propulsión y de rodadora. Este argumento se puede usar para estimar un nivel de potencia acústica asociado a un vehículo, necesario para estimar el nivel de potencia acústica de una vía.
- El límite de confianza superior para livianos, medianos, pesados y motos corresponde a 72.5, 80.9, 84.3 y 79.2dBA, respectivamente. Se indica que los vehículos pesados generan en promedio un nivel de ruido mayor, seguido de los





vehículos medianos, las motos y livianos. Las mediciones realizadas para vehículos pesados indican que el mayor tamaño del motor respecto a las otras categorías y el tipo de combustible que usan son factores importantes en la emisión de ruido en estado dinámico. Al igual que en la prueba en estado estacionario, el nivel de ruido generado por las motos sobrepasa el de los vehículos livianos, lo que puede estar relacionado con el tren de potencia expuesto de las motos.

3. Realizar una caracterización acústica de 10 (diez) superficies de rodadura usados en la infraestructura vial del Valle de Aburrá

Una de las principales fuentes generadoras de ruido en el transporte automotor es la interacción de los neumáticos con el pavimento. De acuerdo con el intervalo de velocidades al que un vehículo se desplace, esta interacción aporta significativamente el nivel de presión sonora emitido. Este ruido se cataloga como ruido de rodadura y también depende del material de la superficie de la vía. El desarrollo constante de varios tipos de pavimentos para las vías conlleva a la necesidad de realizar un estudio que determine el impacto de estos en la emisión de ruido. Literatura científica indica que la superficie de rodadura puede variar hasta 9 dB el nivel de ruido emitido. El proceso se desarrolla mediante la asesoría técnica de un Ingeniero Civil con experiencia en obra civil aplicado a vía e información de los municipios referente a la composición asfáltica usado en carretera.

En esta fase se contempló la realización de mediciones para la caracterización de 10 muestras de superficies de rodadura que son usados en vías del Valle de Aburrá. Se determinará el coeficiente de absorción a través del método de tubo de impedancia de acuerdo con los estándar ISO 10534.

1. Introducción

En este informe se presentan los resultados del proceso de formulación de un protocolo para la caracterización del ruido en diferentes superficies de rodadura del Valle de Aburrá, a partir de la revisión y el análisis de información secundaria. Dicho protocolo, reúne los parámetros necesarios para la caracterización acústica de los pavimentos rígidos y flexibles encontrados en las vías del Área Metropolitana, los ensayos necesarios para obtener dichos parámetros, los sitios representativos o críticos donde realizar las mediciones y la manera de procesar la información obtenida.

Con la aplicación del protocolo, se espera obtener tendencias que permitan predecir o estimar características de la superficie de rodadura relacionadas con la generación y absorción del ruido, como la micro y la macrotextura, la porosidad y el estado vial de los





pavimentos flexibles y rígidos presentes en el Valle de Aburrá, para finalmente generar una caracterización de estos a partir de los análisis necesarios. Las fases que componen el protocolo se enlistan a continuación y serán ampliadas en el transcurso del informe:

- 1. Definición de ensavos
- 2. Selección de tramos viales
- 3. Levantamiento de información de campo
- 4. Correlaciones y análisis de resultados

6. Metodología

El presente estudio se divide en 2 fases, considerando una fase inicial que consistió en las actividades previas como son la elaboración de la propuesta y metodología, así como su socialización y discusión con los interesados. Estas dos (2) fases son:

6.1 Revisión de información secundaria

Los términos del proyecto solicitan que se determine el coeficiente de absorción de sonido, sin embargo, es necesario conocer otras propiedades de los pavimentos para así complementar la caracterización y poder establecer relaciones útiles para realizar los análisis necesarios.

En este sentido, se recolectó información secundaria como teoría, estudios previos pertinentes, entre otros; de este modo poder determinar los ensayos de laboratorio requeridos para complementar la caracterización, los cuales deben brindar información pertinente y ágil de tomar. Se debe examinar la oferta de laboratorios especializados y, en aras de reducir costos y facilitar el trabajo.

Finalmente, es necesario definir los criterios de selección de los ensayos y sitios de muestreo, de tal modo que la información levantada sea representativa.

Esta fase incluyó los siguientes ítems:

- Elaborar estado del arte sobre caracterización de superficies de rodadura y coeficiente de absorción.
- II) Hacer revisión y análisis de estudios anteriores de caracterización de pavimentos y ruido en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- III) Definir parámetros útiles que se puedan correlacionar con el coeficiente de absorción del sonido en superficies de rodadura.
- IV) Revisar normas de ensayos de campo y laboratorio para caracterización de pavimentos (contrastar con las necesidades y posibilidades).
- V) Hacer mapeo e inventario de laboratorios de pavimentos en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- VI) Definir los criterios bajo los cuales se seleccionarán los ensayos de campo.





Para conocer el detalle de esta fase, se puede consultar el anexo C643_Anexo_Coeficiente de absorción: informe caracterización vial.docx

6.2 <u>Diseño del protocolo</u>

A partir de la información recolectada previamente y los criterios definidos, se construyó el protocolo de caracterización, este partió de la selección de ensayos y sitios, para luego levantar la información y finalmente procesarla.

Esta fase incluyó los siguientes ítems:

- I) Elaborar la metodología con la que se seleccionarán los ensayos necesarios.
- II) Elaborar la metodología con la que se seleccionarán los sitios donde se realizarán las mediciones.
- III) Diseñar la ficha de caracterización del estado vial para levantamiento de información en campo.
- IV) Diseñar las maneras de procesar la información levantada en campo para su posterior análisis.

Para conocer el detalle de esta fase, se puede consultar el anexo C643_Anexo_Coeficiente de absorción: informe caracterización vial.docx

3.1 Medición del coeficiente de absorción de superficies de rodadura usados en la infraestructura vial del Valle de Aburrá

De acuerdo con la descripción de las características de las superficies de rodadura que pueden influenciar en la emisión de ruido automotor, se ha incluido la estimación de coeficientes de absorción sonora de asfalto rígido en 10 puntos sobre la malla vial del Valle de Aburrá. La metodología aplicada para esta estimación se basa en la medición de variables acústicas como lo son la Presión Sonora y la Velocidad de Partícula, con la cual se puede determinar la impedancia acústica y por consiguiente los coeficientes de reflexión y absorción sonora. Para este caso de estudio se utilizó la técnica "Impedance Setup" con la tecnología Microflown.

El hardware utilizado se denomina la pistola de impedancia (ver Figura 52) es una herramienta que ofrece *Microflown Technologies* para medir las propiedades acústicas (impedancia acústicas, coeficiente de absorción y reflexión) de los materiales in situ [33], [35]. Es una alternativa real para reemplazar los métodos de sala reverberante y tubo de Kundt. Las mediciones con este dispositivo se pueden realizar a cualquier ángulo de incidencia, como ocurre en la práctica.







Figura 52. Configuración de la pistola de impedancia. Componentes. Tomado de [33]

La configuración consta de una sonda P-U, una fuente esférica (similar a un monopolo) con montaje anti vibratorio, dos acondicionadores de señal y software. Su rango en frecuencia es de 300 Hz a 20 kHz, el límite inferior es establecido por las condiciones de la fuente (respuesta en frecuencia) [33].

El hecho que la presión sonora y la velocidad acústica puedan ser medidos por la sonda PU, no solo permite el cálculo directo de la intensidad acústica, sino también de la impedancia acústica a partir de la relación entre ambas magnitudes [33], [34]. Con el software *Impedance Setup* se puede obtener valores de impedancia, coeficiente de absorción y reflexión acústica de manera in situ. Esto ofrece una gran alternativa a los métodos típicos como el tubo de Kundt o la sala reverberante.

3.1.1 Configuración para la medición con Kit de impedancia.

La fuente que compone la configuración de este dispositivo hace que la impedancia de la fuente esférica sea similar a un monopolo. El modelo de fuente imagen para el coeficiente de reflexión con ondas planas que se muestra en la Figura 53, se utiliza para proporcionar una medición sencilla. Se asume que la reflexión es esférica después de la corrección es igual a el coeficiente de reflexión plano [7][8].

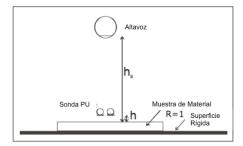


Figura 53. Esquema de configuración para pruebas en campo libre. Adaptado de [7]

a. Sistema de medición. Kit de impedancia y software Impedance





A partir de este esquema de medición y mediante el procesamiento de la información recolectada cerca de una superficie es posible determinar el coeficiente de absorción. Con el fin de garantizar repetibilidad en los resultados, la configuración del hardware y software se realizó de la siguiente manera:

El sistema de medición usado para el estudio fue el "Microflown Kit IMPDEM002" dispuesto en la Universidad de San Buenaventura Seccional Medellín. Este Kit está compuesto por:

- Sonda PU.
- Fuente esférica y Estructura.
- Trípode y Agarradera para realizar mediciones estáticas.
- Tarjeta de Sonido (DAQ, Data Acquisition).
- Acondicionador de señal.
- Cables para conexión.

El Kit Proporciona entonces como herramienta la "Pistola de impedancia" (ver Figura) que acompañado con el software *Impedance* proporcionan los datos necesarios para determinar las variables, velocidad de partícula y presión sonora, y a partir de estas la absorción sonora, involucradas en el estudio. La Figura 54 muestra el diagrama de conexión del sistema de medición.

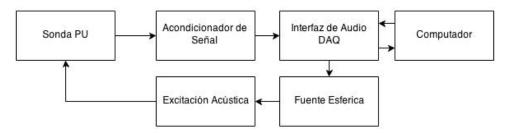


Figura 54. Diagrama de Conexión del Sistema Microflown (Pistola de Impedancia)

Las variables del sistema de medición fueron definidas como se presenta en la Tabla 36, esto garantiza la repetibilidad del método y la mínima desviación entre los resultados en la estimación del coeficiente de absorción.

Tabla 36. Protocolo definido para determinar del coeficiente de absorción sonora mediante mediciones con la Sonda PU y el kit de impedancia de *Microflown Technologies*

Parámetro	Valor		
Distancia Sonda/Muestra (h)	5 mm		
Tiempo de Medición	20 segundos		
Señal de Excitación	Ruido Blanco		
Archivo de Calibración	Aproximado a Campo Libre		





Suavizado en Frecuencia Calibración / Medición	Media Móvil Logarítmica	
Modelo de Absorción	Fuente Imagen (Mirror Source)	

3.2 Resultados

A continuación, se aplicará el protocolo con el fin de obtener ensayos y tramos viales a los que se recomienda realizar las mediciones correspondientes y que pueden brindar información relevante y representativa sobre la absorción del ruido en el Área Metropolitana.

En base a los criterios de Implicaciones Técnicas, Minimización de Gastos y Conveniencia se determinó los siguientes ensayos pueden ser aplicados:

Tabla 37. Ensayos definidos.

Textura	Circulo de Arena (INV E 791)
Drenaje	Medida del Drenaje Superficial (ASTM E- 2380)

Se determinó el circulo de arena ya que es fácilmente replicable en cualquier vía, hay variada oferta en distintos laboratorios de la ciudad, su coste es bajo y mediante correlaciones se puede obtener el MPD y MTD. Por otro lado, se seleccionó en ensayo de drenaje superficial ya que, según lo investigado, es el único ensayo que puede brindar información del drenaje en pavimentos flexibles y rígidos sin extracción de núcleo, su dificultada radica en la disponibilidad del ensayo en los laboratorios de la ciudad.

6.3 Selección de tramos viales

Se aplica el método de Eliminación & Priorización de la siguiente manera:

6.3.1 Eliminación

Del mapa de ruido del Área Metropolitana del Valle de Aburrá se extraen las vías que cumplen el criterio de reportar 75dBA o más por ruido del tránsito en horario diurno, este proceso arroja un listado de 122 entradas pertenecientes a Medellín, Bello, Envigado, Itagüí, La Estrella, Sabaneta y Copacabana, a cada entrada se relaciona el tipo de pavimento que corresponde.

6.3.2 Priorización

A las entradas anteriores se les asignan los puntajes correspondientes según la jerarquía homologada, luego se realiza el proceso de acotamiento, se identifican y puntean las intersecciones, para finalmente asignar los puntajes según el número de carriles. Cabe





mencionar que estos puntajes se van sumando a medida que se realiza cada paso. Producto de este procedimiento se obtiene un listado de los tramos viales, intersecciones y puntos con la puntación definitiva, la lista se ordena con el fin de identificar las entradas mejor calificadas y se procede con el proceso de selección según la distribución geográfica, lo que implica elegir entradas que no se encuentran entre las 10 mejor punteadas. Finalmente, las entradas seleccionadas son:

Tabla 38. Sitios Medidos.

N°	Tipo Pavimento	Municipio	Vía
1	Flexible	Bello	Hospital Mental – Carrera 57
2	Flexible	Bello	Autopista norte – Fabricato Glorieta
3	Flexible	Copacabana	Autopista - HACEB
4	Rigido	Medellín	Avenida regional – Terminal del norte
5	Flexible	Itagüí	Autopista sur
6	Flexible	La Estrella	Autopista Sur x Variante Caldas
7	Flexible	Sabaneta	Parque industrial
8	Flexible	Envigado	Autopista x Viva Envigado
9	Flexible	Medellín	Carabobo X Huesos
10	Flexible	Medellín	Avenida las Palmas x Sandiego.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados del proceso de medición para la estimación del Coeficiente de absorción de Superficies de rodadura de tipo rígidas en 10 puntos sobre la malla vial del Valle de Aburrá.

a. Punto 1: Pista de pruebas, Parqueadero Universidad de San Buenaventura, Bello. (Flexible)





Figura 55. Punto 1: Universidad San Buenaventura Bello (6°19'52.0"N 75°34'08.2"W)

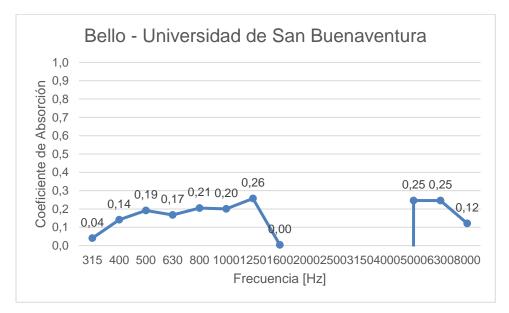


Figura 56. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en la pista de pruebas de la Universidad de San Buenaventura Medellín.

b. Punto 2: Hospital Mental (Flexible)





Figura 57. Punto 2: Hospital Mental (6°19'23.9"N 75°33'49.4"W)

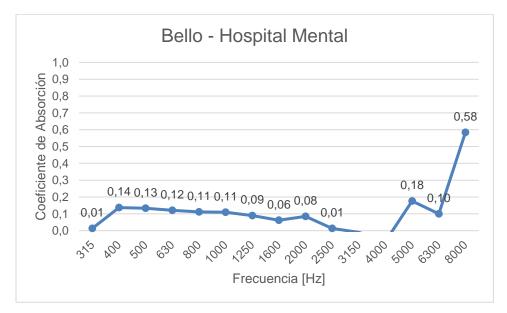


Figura 58. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Bello cerca al Hospital Mental de Antioquia.

c. . Punto 3: Fabricato (Flexible)





Figura 59. Punto 3: Fabricato (6°19'37.0"N 75°33'28.0"W)

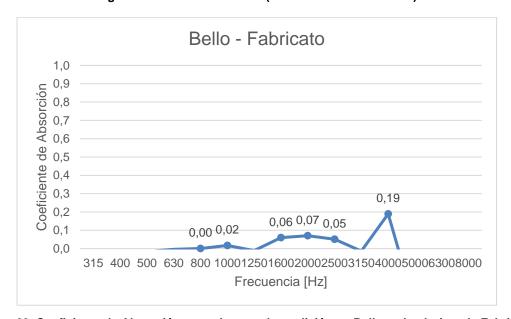


Figura 60. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Bello en la glorieta de Fabricato.

d. Punto 4: Copacabana Haceb (Flexible)





Figura 61. Punto 4: Copacabana Haceb (6°21'04.1"N 75°30'29.3"W)

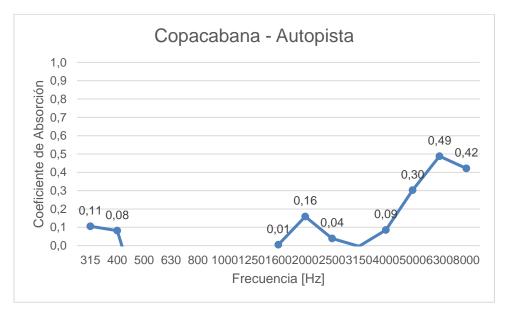


Figura 62. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Copacabana en la autopista frente HACEB.

e. Punto 5: Terminal del Norte (Segmento Rígido)





Figura 63. Punto 5: Terminal del Norte (6°16'33.0"N 75°34'13.1"W)

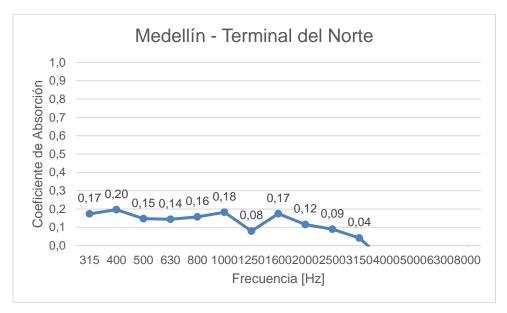


Figura 64. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Medellín en la Terminal del Norte.

f. Punto 6: Autopista Sur Itagüí (Flexible)







Figura 65. Punto 6: Autopista Sur Itagüí (6°09'48.0"N 75°36'47.9"W)

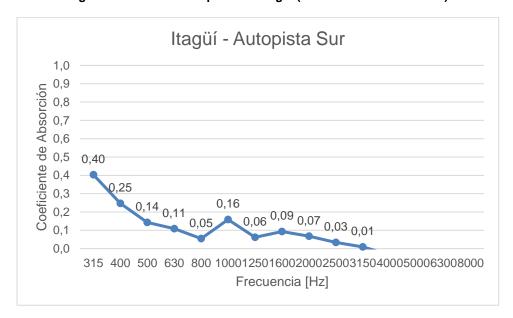


Figura 66. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Sabaneta, Autopista Sur (Cementerio Jardines Montesacro)

g. Punto 7: Variante Caldas (Flexible)





Figura 67. Punto 7: Variante Caldas (6°08'28.2"N 75°37'55.9"W)

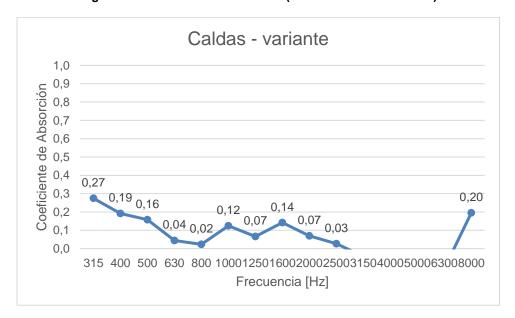


Figura 68. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Variante a caldas.

h. Punto 8: Sabaneta (Flexible)





Figura 69. Punto 8: Sabaneta (6°09'01.4"N 75°37'41.6"W)

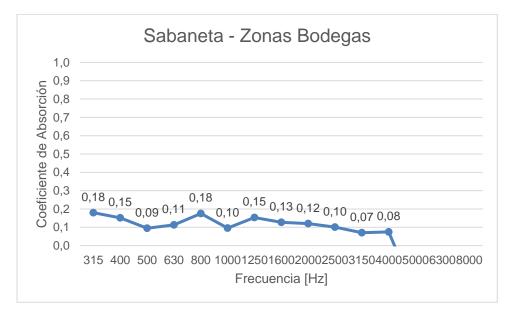


Figura 70. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Sabaneta en estación la Estrella del Metro.

i. Punto 9: Viva Envigado (Flexible)





Figura 71. Punto 9: Viva Envigado (6°10'38.7"N 75°35'32.3"W)

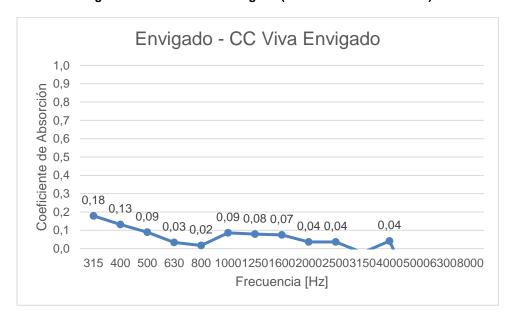


Figura 72. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Vía distribuidora a la altura de Viva Envigado .

j. Punto 10: Carabobo (Flexible)





Figura 73. Punto 10: Carabobo (6°14'29.4"N 75°34'21.8"W)

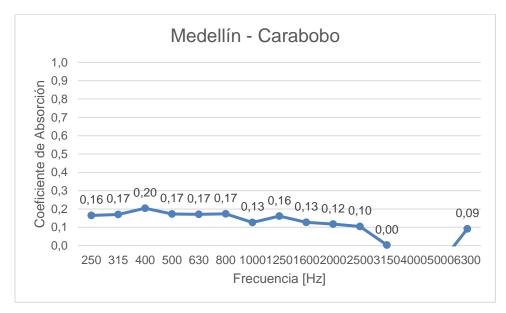


Figura 74. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Medellín, Carabobo con los huesos.

k. Punto 11: Palmas (Flexible)





Figura 75. Punto 11: Palmas (6°13'54.4"N 75°33'57.2"W)

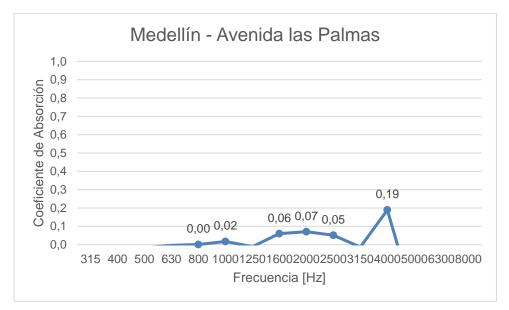


Figura 76. Coeficiente de Absorción para el punto de medición en Medellín, vía las palmas.

3.3 Análisis y discusión

La metodología aplicada para estimación de coeficientes de absorción de superficies de rodadura ha permitido describir características comunes entre las 11 muestras. En todos los casos para el rango en que el método es confiable (300 Hz – 800 Hz) el coeficiente de absorción es menor a 0.3 en promedio. En algunos casos especialmente en frecuencias superiores a 5 kHz, se han presentado coeficientes mayores, posiblemente definidos por aumento en la porosidad de las superficies. Adicionalmente, el análisis sugiere que no





existen diferencias significativas entre el coeficiente de absorción del asfalto flexible con respecto al rígido.

Los resultados reflejan que las superficies de rodadura contribuyen muy poco a la disminución del ruido producto del tráfico rodado. La porción de energía absorbida por ellas es menor al 30%, lo que en nivel de reducción es inferior a 1 dB de la emisión de ruido por los vehículos que transitan por ellas. Sin embargo, es posible denotar del trabajo en campo que todas las superficies de rodadura cuentan con características morfológicas (Textura, baches, pinturas) diferentes y aunque no tienen influencia sobre el coeficiente de absorción, si lo hacen en su interacción con neumáticos, lo cual de acuerdo con el método CNOSSOS EU pueden variar entre 1 a 15 dB.

Se recomienda abordar las estrategias de control de ruido a través de la intervención y mantenimiento de la malla vial.





Conclusiones

Uno de los mecanismos más importantes para la gestión del ruido ambiental corresponde a prevenir sus impactos mediante una adecuada planeación territorial. Este acercamiento proactivo posibilita un desarrollo urbano armónico que responde a las necesidades del territorio, pero considerando la minimización de impactos adversos como el ruido. Es importante hacer énfasis que este abordaje no solo presenta a largo plazo una mejor relación costo/beneficio, sino que promueve una adecuada compatibilización de las diferentes dinámicas y actividades que se generan en las ciudades.

Las medidas de protección y restricción en la planeación deben partir de una zonificación acústica del territorio en función de las actividades, usos y niveles de ruido actuales que permitan definir y actualizar objetivos de calidad acústica y límites a futuros emisores. Esto permite orientar las medidas hacia la prevención y reducción del ruido y la gestión de la contaminación acústica en el Valle de Aburrá.

Los lineamientos se construyeron desde el principio de la armonización y en ningún caso definen el modelo de ocupación territorial municipal, no establecen norma urbanística, tampoco definen condiciones o instrumentos para la gestión del suelo o sobre el uso del suelo. Por último, no hacen referencia a ninguna disposición que riña con la autonomía municipal.

Los lineamientos para la zonificación acústica orientan el modelo de ocupación territorial, a partir de la interpretación de los resultados de los mapas de ruido ambiental. En la etapa de diagnóstico, se presentan herramientas metodológicas de análisis y síntesis para identificar las incompatibilidades en los usos del suelo y determinar las zonas críticas por contaminación de ruido. En la etapa de formulación, suministran la información necesaria para identificar las acciones requeridas para prevenir y controlar que las emisiones de ruido se mantengan por debajo de los estándares máximos permisibles y compatibilizar los usos del suelo, de modo que puedan ser incluidos dentro de los objetivos y estrategias territoriales.

Con respecto a la caracterización del ruido automotor, el análisis del modelo de cálculo con respecto a mediciones ha sido el factor más relevante. En principio la recategorización de vehículos especialmente los pesados en medianos ha significado cambios importantes en la estimación del ruido ambiental y por lo tanto, la estimación de indicadores a favor de las acciones para la mitigación, a partir de buenas prácticas de valuación. Se identifica que las buenas prácticas en la categorización de vehículos en las vías, proporciona un mejor insumo para la estimación de niveles de ruido, a través de los métodos de cálculo.

Así mismo, la caracterización ha permitido identificar la variabilidad de la emisión del ruido por tipología de vehículo, sin embargo, también ha permitido establecer el nivel medio con





el cual se puede corregir los niveles de emisión por categoría. Uno de los hallazgos más importantes es la relevancia de la tipología motos en los niveles de ruido, tanto por sus altos niveles de emisión como su proporción en el parque automotor. Los vehículos livianos en su caso representan una gran porción del total del parque automotor, pero en su emisión individual no representan la tipología que más contribuye a la emisión. Una de las evaluaciones más relevantes fue sobre los vehículos eléctricos, donde se demuestra que la emisión individual por vehículo puede ser de hasta 10 dB menor. Esto permite establecer que el cambio masivo de tecnología vehicular fomenta enormemente a la disminución de ruido ambiental dentro del territorio. La inclusión de la caracterización vehicular constante del parque automotor puede contribuir a robustecer los insumos de entrada que permitan la precisión de modelo de cálculo en la actualización de los mapas de ruido.