

DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE EL INDICE DE RUGOSIDAD
INTERNACIONAL (IRI) Y LA GENERACIÓN DE RUIDO VEHICULAR

MANUEL EDUARDO CEPEDA HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN INFRAESTRUCTURA VIAL
TUNJA
2019

DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE RUGOSIDAD
INTERNACIONAL (IRI) Y LA GENERACIÓN DE RUIDO VEHICULAR

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar el título de:
Magister en Ingeniería con énfasis en Infraestructura Vial

Director:
Luis Alfredo Vega Baez
Ingeniero de Transporte y Vías
Doctor en Ingeniería

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN INFRAESTRUCTURA VIAL
TUNJA
2019

Nota de aceptación

Firma del Director de Proyecto de grado

Firma del jurado

Firma del jurado

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios que me ha dado la vida, la salud y me ha permitido cursar y terminar esta maestría, colocando las personas idóneas en cada etapa para llevar a feliz término este proyecto.

Quiero agradecer a mi familia, mi esposa Franci, mis hijos Valentina, Santiago y Samuel, porque son el motor y la motivación de salir adelante en cada proyecto de mi vida; a mis padres Manuel Antonio y Tilcia porque han sido constantes en la motivación para la terminación de este proceso y me han apoyado incondicionalmente.

Agradecimiento especial a la Escuela de Posgrados de Ingeniería por facilitar las herramientas para la culminación de este proyecto de grado, al Ingeniero Luis Alfredo Vega, Director del proyecto por su oportuna asesoría y acompañamiento en el proceso de desarrollo de este proyecto.

No ha sido fácil el camino para este logro, pero gracias a sus aportes, su bondad, su motivación y su apoyo, lo complicado se torna realizable. Les agradezco, y hago notar mi gran afecto hacia ustedes, mil gracias.

CONTENIDO

| | pág |
|--|-----|
| GLOSARIO..... | 14 |
| INTRODUCCIÓN..... | 16 |
| 1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA | 17 |
| 2. OBJETIVOS | 20 |
| 2.1 OBJETIVO PRINCIPAL..... | 20 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 20 |
| 3. MARCO TEÓRICO | 21 |
| 3.1 RUIDO VEHICULAR | 21 |
| 3.1.1. Sonido y ruido o contaminación acústica. | 21 |
| 3.1.2. Medición del ruido..... | 22 |
| 3.1.3. Instrumentos de medición del ruido | 27 |
| 3.1.4. Operaciones con la unidad de registro del sonido (decibelios):..... | 28 |
| 3.1.5. Factores que afectan a la generación del ruido del tráfico | 30 |
| 3.1.6. Niveles sonoros máximos permisibles | 33 |
| 3.1.7. Efectos del ruido en la salud y el bienestar | 33 |
| 3.1.8. Efectos del ruido sobre el valor de las viviendas..... | 35 |
| 3.2 PERFIL Y REGULARIDAD SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO | 36 |
| 3.2.1. Técnicas para medir la regularidad superficial de los pavimentos..... | 37 |
| 3.2.2. Índice de Rugosidad Internacional - IRI | 38 |
| 3.2.3. Cálculo del IRI | 40 |
| 3.3 COSTOS AMBIENTALES DEL RUIDO VEHICULAR..... | 46 |
| 3.3.1. Metodologías para la valoración económica | 46 |
| 3.3.2. Medidas de mitigación contaminación acústica..... | 49 |
| 4. METODOLOGÍA Y TRABAJO DE CAMPO..... | 61 |
| 4.1 MATERIALES Y EQUIPOS | 61 |
| 4.2 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO | 64 |

| | |
|---|-----|
| 4.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MEDICIÓN | 67 |
| 4.3.1. Prueba piloto..... | 67 |
| 4.3.2. Montaje de instrumentos..... | 68 |
| 4.3.3. Medición de índice de rugosidad..... | 71 |
| 4.3.4. Medición de velocidad | 72 |
| 4.3.5. Determinación volumen y composición vehicular | 72 |
| 4.3.6. Medición de niveles de ruido..... | 73 |
| 5. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS | 78 |
| 5.1 CÁLCULO DE LAS VARIABLES DEL MODELO | 78 |
| 5.1.1. Ruido vehicular promedio (Leq) | 78 |
| 5.1.2. Índice de Rugosidad Internacional – IRI..... | 79 |
| 5.1.3. Composición del tránsito..... | 81 |
| 5.1.4. Velocidades promedio | 82 |
| 5.1.5. Base de datos obtenidos en el estudio..... | 82 |
| 5.2 ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS DE LAS VARIABLES | 86 |
| 5.2.1. Identificación de valores atípicos | 87 |
| 5.2.2. Estadísticas descriptivas para los volúmenes vehiculares | 89 |
| 5.2.3. Estadísticas descriptivas de las velocidades promedio | 90 |
| 5.3 MODELO DE GENERACIÓN DE RUIDO..... | 91 |
| 5.3.1. Modelo de Leq en función de todas las variables medidas | 91 |
| 5.3.2. Modelo de Leq en función del IRI y la composición vehicular | 92 |
| 5.3.3. Modelo que mejor describe el comportamiento del ruido vehicular en función del IRI..... | 94 |
| 5.3.4. Análisis de sensibilidad del ruido vehicular en función del IRI y el flujo del tráfico | 97 |
| 5.4 VALORACIÓN ECONÓMICA DE LOS IMPACTOS DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA: COSTOS DE MITIGACIÓN | 99 |
| 5.4.1. Localización y población del entorno de referencia..... | 99 |
| 5.4.2. Identificación de las externalidades generados por el ruido vehicular | 103 |
| 5.4.3. Descripción y cuantificación de las técnicas de mitigación planteadas..... | 104 |
| 6. CONCLUSIONES | 113 |
| 7. COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES | 115 |

BIBLIOGRAFÍA..... 117
ANEXOS 122

LISTA DE FIGURAS

| | pág |
|--|-----|
| Figura 1. Localización de los tramos seleccionados sobre la doble calzada Briseño -Tunja- Sogamoso, Tramo Duitama – Tunja..... | 18 |
| Figura 2. Curvas de Fletcher y Munson. | 23 |
| Figura 3. Curvas de Ponderación A, B y C. | 24 |
| Figura 4. Longitud de Onda y Amplitud..... | 37 |
| Figura 5. Relación del desplazamiento vertical y recorrido horizontal de la masa del CC entre dos puntos consecutivos. | 39 |
| Figura 6. Representación gráfica del modelo matemático de “CC”..... | 40 |
| Figura 7. Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías (Adaptado de UMTRI Research Review, Vol. 33. Número 1. Enero-febrero 2002)..... | 43 |
| Figura 8. Valores recomendables del IRI según el tránsito Diario Promedio Anual (TPDA)..... | 44 |
| Figura 9. Clasificación de un tramo según su condición funcional – Regularidad de la superficie..... | 44 |
| Figura 10. Clasificación de condición estructural y funcional del pavimento..... | 44 |
| Figura 11. Excedente del Consumidor..... | 48 |
| Figura 12. Excedente del Productor..... | 48 |
| Figura 13. Barrera acústica para vías..... | 50 |
| Figura 14. Dependencia de la zona de sombra acústica con la frecuencia..... | 52 |
| Figura 15. Ciclo de vida de un pavimento..... | 55 |
| Figura 16. Situación idealizada de mantenimiento integral..... | 56 |
| Figura 17. Esquema general para mantenimiento integral..... | 57 |
| Figura 18. Consecuencias de una intervención..... | 57 |

| | |
|---|----|
| Figura 19. Imágenes de uso de equipos a) Nivel de precisión, b) Mira de aluminio y cinta métrica..... | 61 |
| Figura 20. Imágenes de uso de Sonómetro digital versión 1.2 marca Extech, modelo HD600..... | 62 |
| Figura 21. Imágenes de uso del radar. | 63 |
| Figura 22. Cámara filmadora para registrar velocidades de los vehículos..... | 63 |
| Figura 23. Volumen Máximo Horario para la semana del 30 de marzo al 05 de abril del 2014. | 64 |
| Figura 24. Volúmenes Máximos Horarios días a) martes, b) miércoles, c) jueves.. | 65 |
| Figura 25. Localización de los tramos seleccionados sobre la doble calzada Briseño -Tunja- Sogamoso, Tramo Duitama - Tunja..... | 66 |
| Figura 26. Posicionamiento de equipo de medición del ruido con el sonómetro y toma de video, abscisas Km 116 460-520, de un camión..... | 69 |
| Figura 27. Posicionamiento de equipo de medición de índice de rugosidad, mira y nivel de precisión, abscisas Km 116 760-820..... | 69 |
| Figura 28. Posicionamiento de equipo de medición de volumen vehicular, cámara de video, abscisas Km 116 760-820..... | 70 |
| Figura 29. Medición de la velocidad posicionamiento de radar dentro de vehículo para evitar ser detectado por los conductores en el tramo con abscisas Km 116 760-820, de un automóvil..... | 70 |
| Figura 30. Medición de las cotas de perfil longitudinal del tramo con abscisas Km 116 760-820..... | 71 |
| Figura 31. Medición de las cotas de perfil longitudinal del tramo con abscisas Km 119 800-860..... | 71 |
| Figura 32. Medición de la velocidad en el tramo con abscisas Km 116 460-520... | 72 |
| Figura 33. Medición del ruido con el sonómetro y toma de video abscisas Km 116 460-520. a) al paso de vehículo. b) al paso de camión..... | 73 |
| Figura 34. Medición del ruido con el sonómetro y toma de video abscisas Km 116 760-820, de un bus. | 74 |
| Figura 35. Medición del ruido con el sonómetro y toma de video abscisas Km 117 520-580..... | 74 |

| | |
|--|----|
| Figura 36. Medición del ruido con el sonómetro y toma de video abscisas Km 119 800-860..... | 74 |
| Figura 37. Medición del ruido con el sonómetro y toma de video abscisas Km 122 100-160. a) al paso de vehículo. b) al paso de camión..... | 75 |
| Figura 38. Niveles de ruido Km 116 460-520. a) Mañana, b) Tarde | 75 |
| Figura 39. Niveles de ruido Km 116 760-820. a) Mañana, b) Tarde | 76 |
| Figura 40. Niveles de ruido Km 117 520-580. a) Mañana, b) Tarde | 76 |
| Figura 41. Niveles de ruido Km 117 920-980. a) Mañana, b) Tarde | 76 |
| Figura 42. Niveles de ruido Km 119 800-860. a) Mañana, b) Tarde | 77 |
| Figura 43. Niveles de ruido Km 122 100-160. a) Mañana, b) Tarde | 77 |
| Figura 44. Determinación del ruido equivalente Leq en decibeles A (dBA) para un periodo de cinco minutos en el tramo Km 116 + 460-520. Datos tomados en el periodo de 11:00 am a 11:05 am. Obtenido de tabla de Excel datos obtenidos del sonómetro..... | 78 |
| Figura 45. IRI Calculado para el Km 116 460-520 (IRI regular = 4.11 m/km) | 79 |
| Figura 46. IRI Calculado para el Km 116 760-820 (IRI malo = 5.45 m/km)..... | 79 |
| Figura 47. IRI Calculado para el Km 117 520-580 (IRI regular = 3.9 m/km) | 80 |
| Figura 48. IRI Calculado para el Km 117 920-980 (IRI bueno = 2.60 m/km) | 80 |
| Figura 49. IRI Calculado para el Km 119 800-860 (IRI malo = 6.73 m/km)..... | 80 |
| Figura 50. IRI Calculado para el Km 122 100-160 (IRI bueno = 2.21 m/km) | 81 |
| Figura 51. Histograma de frecuencias para los valores obtenidos de Leq | 87 |
| Figura 52. <i>Boxplot</i> del ruido para cada valor de IRI con valores atípicos. | 87 |
| Figura 53. Histograma de frecuencia ruido sin valores atípicos..... | 88 |
| Figura 54. <i>Boxplot</i> del número de automóviles y el número de comerciales. | 89 |
| Figura 55. <i>Boxplot</i> de las velocidades promedio según tipo de vehículos. | 90 |
| Figura 56. Histograma de frecuencias de los residuos estandarizados para el modelo de Leq en función del IRI y la composición vehicular..... | 93 |
| Figura 57. Gráfico de dispersión del ruido en función del número de vehículos comerciales..... | 94 |

| | |
|---|-----|
| Figura 58. Histograma de los residuos normalizados para el modelo de Leq en función del IRI y el logaritmo del número de vehículos..... | 96 |
| Figura 59. Gráfico de probabilidad para verificar normalidad del modelo. | 96 |
| Figura 60. Localización vía de interés Paipa-Tunja-Villapinzón..... | 100 |
| Figura 61. Zona de Población Afectada de Paipa..... | 101 |
| Figura 62. Zona de Población afectada de Villapinzón. | 101 |

LISTA DE TABLAS

pág

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Estándares máximos permisibles de niveles de emisión de ruido en Colombia, expresados en decibeles dB(A). | 33 |
| Tabla 2. Valores Guía para el ruido urbano en ambientes específicos. | 34 |
| Tabla 3. Porcentaje de depreciación en los precios de la vivienda por el incremento en un 1 dB(A) del nivel de ruido. | 36 |
| Tabla 4. Especificaciones de rango de frecuencia según características de la superficie según PIARC. 1990 | 37 |
| Tabla 5. Equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial de pavimentos. | 41 |
| Tabla 6. Rangos y Valores Característicos de IRI en función del PSI | 45 |
| Tabla 7. Principales criterios para el diseño de una pantalla acústica | 51 |
| Tabla 8. Funcionamiento de una barrera acústica | 52 |
| Tabla 9. Clasificación Barreras Acústicas en Proyectos de Infraestructura de Transporte | 54 |
| Tabla 10. Períodos de diseño de las obras de rehabilitación de los pavimentos asfálticos de las carreteras nacionales | 56 |
| Tabla 11. Tolerancias permitidas para los tipos de sonómetro. | 62 |
| Tabla 12. Periodos de medición y tramos seleccionados sobre la doble calzada (BTS) sentido Duitama-Tunja. | 66 |
| Tabla 13. Índice de rugosidad internacional (IRI) obtenido en los Tramos seleccionados sobre la doble calzada sentido Duitama-Tunja | 81 |
| Tabla 14. Base de datos de las variables medidas. | 83 |
| Tabla 15. Estadísticas descriptivas para el Leq para cada IRI. | 89 |
| Tabla 16. Estadísticos descriptivos para la composición vehicular. | 90 |
| Tabla 17. Estadísticos descriptivos de las velocidades por tipo de vehículo. | 90 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 18. Resumen modelo regresión de Leq en función de todas las variables medidas. | 91 |
| Tabla 19. Coeficientes del modelo con todas las variables medidas. | 91 |
| Tabla 20. Resumen modelo regresión de Leq en función del IRI y la composición vehicular. | 92 |
| Tabla 21. Coeficientes del modelo con el IRI y la composición vehicular. | 92 |
| Tabla 22. Coeficientes del de Leq con el IRI y los logaritmos del número de vehículos. | 95 |
| Tabla 23. Tabla ANOVA para el modelo de Leq en función del IRI y los logaritmos del número de vehículos. | 95 |
| Tabla 24. Coeficientes del modelo de Leq en función del IRI y los logaritmos del número de vehículos. | 95 |
| Tabla 25. Análisis de sensibilidad del ruido en función del IRI, vehículos livianos y vehículos comerciales. | 98 |
| Tabla 26. Determinación de la población afectada por kilómetro de vía para las áreas suburbanas de estudio. | 102 |
| Tabla 27. Comparación de los niveles de ruido promedio en las seis zonas de estudio con la normativa. | 103 |
| Tabla 28. Efectos del ruido sobre la salud humana | 104 |
| Tabla 29. Datos iniciales suministrados a las empresas. | 105 |
| Tabla 30. Cotización Barrera Acústica Vial en Colombia. | 106 |
| Tabla 31. Determinación del costo por decibelio por día y por cada hora, para implementación de barreras de ruido. | 107 |
| Tabla 32. Determinación del costo por decibelio por cada hora por habitante, para barreras de ruido, en los entornos de referencia de estudio. | 108 |
| Tabla 33. Presupuesto general para la recuperación de la carpeta asfáltica un tramo de 1 Km | 109 |
| Tabla 34. Determinación del costo por decibelio por día y por cada hora, para recuperación de la carpeta asfáltica. | 110 |
| Tabla 35. Determinación del costo por decibelio por cada hora por habitante, para el mantenimiento vial, en los entornos de referencia de estudio. | 111 |

GLOSARIO

BARRERA ACÚSTICA: estructura exterior, diseñada para reducir la contaminación acústica.

CONTAMINACIÓN ACÚSTICA: exceso de sonido que altera las condiciones normales del ambiente de una determinada zona. Es una de las formas de la contaminación atmosféricas que puede afectar en mayor medida a la salud de las personas sin ser realmente consciente de ello.

COSTOS DE MITIGACIÓN: forma de valorar los daños causados al medio ambiente a partir de la valoración de los gastos en que se incurre para evitar o reducir los impactos ambientales no deseados.

DECIBEL (dB): unidad logarítmica que se utiliza para medir la intensidad del sonido. Es la décima parte de un belio (B) y la unidad adecuada para representar el espectro auditivo del ser humano.

EXTERNALIDAD: efectos externos positivos o negativos que sufren terceras personas por acciones u omisiones de otras sin que haya compensación económica.

INTENSIDAD DEL SONIDO: nivel promedio al que se transmite la energía del sonido por unidad de área normal a la dirección de propagación del sonido.

IRI: Índice de la Rugosidad Internacional que representa un índice de comodidad de rodadura, y constituye el parámetro de la vía que percibe el usuario, y se encuentra definido como la acumulación del movimiento vertical que sufre la suspensión de una rueda (un cuarto de carro) cuando recorre la superficie a una velocidad de referencia de 80km/h.

MANTENIMIENTO VIAL: conjunto de actividades adecuadas y oportunas que se realizan para conservar a largo plazo en buen estado las condiciones físicas de los diferentes elementos que constituyen la vía, preservando condiciones iguales o similares de cuando fue construida o rehabilitada y garantizando la prestación de un servicio aceptable en forma permanente, donde el transporte sea cómodo, seguro y económico para los usuarios.

NIVEL CONTINUO EQUIVALENTE (Leq): ruido impulsivo, variante e intermitente que es igual en energía a un nivel de ruido continuo en un intervalo de tiempo.

NIVEL DE INTENSIDAD DEL SONIDO: en decibeles, es 10 veces el logaritmo base 10 del cociente de la intensidad del sonido entre el nivel de referencia del sonido.

NIVEL DE PRESIÓN DEL SONIDO: en decibeles, es 10 veces el logaritmo base 10 del cociente de la presión del sonido al cuadrado entre el cuadrado de la presión de referencia.

PONDERACIÓN A: simplificación de la respuesta en frecuencia del oído a niveles bajos de presión sonora.

PRESIÓN DEL SONIDO: presión instantánea total en un punto en presencia de una onda de sonido menos la presión estática en ese punto.

RUGOSIDAD: Conjunto de asperezas de una superficie respecto a otra idealmente lisa.

RUIDO: cualquier sonido molesto o indeseado, usualmente de alta intensidad.

SONIDO: sensación producida en el órgano del oído por medio de los movimientos vibratorios de los cuerpos, transmitido por un medio elástico como el aire.

SONÓMETRO: instrumento de medida de niveles de presión sonora.

INTRODUCCIÓN

Para brindar bienestar a la sociedad es importante analizar el impacto que genera en su comodidad y salud el desarrollo de las ciudades y regiones en las cuales habitan y plantear una serie de soluciones para contrarrestar tal impacto. Dicho desarrollo puede ser cuantificado a partir del número de vehículos existentes, pues a medida que la ciudad crece, el número de vehículos también asciende y, por ende, la contaminación atmosférica, así como la contaminación acústica. Esta última contaminación es generada tanto por el motor, mecanismos de transmisión de potencia del motor a las ruedas y demás elementos componentes del vehículo; sin embargo, también es causada por el contacto entre los neumáticos y el pavimento, y aunque esta fuente posee una importancia considerable, en Colombia no se ha investigado al detalle.

Ésta investigación se enfoca en determinar la magnitud e importancia del ruido producido por el rozamiento del neumático y el pavimento, y el impacto que éste genera en la población aledaña a vías suburbanas del área de estudio, para lo cual se determina a través de una expresión econométrica, la incidencia de la rugosidad del pavimento en la emisión del ruido ambiental asociado con el flujo de tráfico, Además de valorar el impacto del ruido asociado con el flujo de tráfico, usando técnicas como la de costos de mitigación.

Para tal fin, se recurre a la determinación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) a partir de la medición con nivel y mira de la rugosidad del perfil longitudinal de dos tramos con IRI bueno, regular y malo, en el carril de la vía de estudio; luego, en éstos mismos tramos se realiza la medición del sonido generado por los vehículos, con uso de un sonómetro digital versión 1.2 marca Extech modelo HD600; infiriendo de acuerdo a los límites de decibeles establecidos para el oído humano por la Organización Mundial de la Salud y el Ministerio de Ambiente de Desarrollo Sostenible de Colombia; se tomaron datos de velocidad y composición vehicular, luego tales datos son utilizados para definir una expresión que muestre la relación existente entre el IRI y la contaminación acústica.

Finalmente, a partir de la técnica de valoración de costos de mitigación, se busca establecer el valor monetario de algunas técnicas empleadas para atenuar los impactos negativos o externalidades del ruido vehicular, en la población más representativa expuesta a la contaminación acústica de los vehículos que circulan en el tramo del carril de la vía de estudio como lo son los municipios de Villapinzón y Paipa; y por ende, para valorar así mismo el ruido ocasionado.

1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El crecimiento económico de una nación requiere de la construcción de vías de comunicación que intersecten las grandes ciudades y las zonas rurales de mayor importancia, bien sea para el transporte de mercancía o de pasajeros. Por tanto, la cantidad de vehículos aumenta y debido a esto, se generan innumerables pérdidas en los recursos naturales de la nación, además de una marcada contaminación del ambiente y por ende un significativo deterioro en la calidad de vida de la población.

Con el objeto de analizar la relación que tiene la condición de las vías con la contaminación acústica y el impacto en la población, se seleccionó una de las principales vías del departamento de Boyacá según el Plan de Desarrollo (Asamblea de Boyacá, 2016, pág. 494), la doble calzada Bogotá – Tunja – Sogamoso (Hace parte de la ruta 55 – Tramo Concesión BTS) por facilidad de acceso para el autor, se estudia la doble calzada (BTS) que hace parte de la Concesión Briceño-Tunja-Sogamoso, la cual es una vía nacional que une a la zona industrial de Boyacá con Bogotá, presta grandes beneficios a los viajeros ya que reduce su tiempo de desplazamiento en carretera y genera un impacto ambiental considerable, puesto que, muchas de las poblaciones que están cerca de su trazado, están expuestas tanto a la polución causada por los vehículos, como al ruido que estos producen cuando son conducidos a altas velocidades y la superficie vial posee mal estado.

Considerando que la investigación pretende encontrar la relación entre la rugosidad del pavimento y la generación de ruido vehicular, fue necesario trabajar en un tramo particular de la vía que permitiera mantener relativamente constantes variables como pendiente, volumen y composición vehicular, además de mantener un patrón de velocidad (velocidades mayores a 60 km/h, en el día y en la noche). Se determinaron tramos con similares condiciones en el entorno, áreas abiertas sin presencia de árboles, muros de contención o barreras naturales que pudieran afectar el comportamiento de la propagación de ruido. En relación a la infraestructura se tomaron tramos con similar perfil de vía, para lo cual se cuenta con dos calzadas de dos carriles de circulación en cada sentido, separador de las calzadas en tierra con altura promedio de 1.1 m, bermas y calzada en pavimento asfáltico.

Cuando se trata del desplazamiento de los neumáticos sobre el pavimento, entra en juego una variable clave a la hora de entender cómo interfiere el estado de una vía en el contacto neumático-pavimento y cómo esto puede contribuir a la generación de mayores niveles de ruido. El índice internacional de rugosidad (IRI) es precisamente esa variable que al medirla, permite establecer las condiciones en las que se encuentra la superficie de rodadura de la carretera, por esto se tomaron 6 sub-tramos lo suficientemente distanciados uno del otro, como se muestra en la Figura 1, con el fin de evitar la intersección de un mismo foco de ruido entre tramos

contiguos, con características de IRI bueno, regular y malo para obtener conclusiones más representativas, además se realizaron las mediciones de ruido, velocidades, composición y volumen vehicular.



Figura 1. Localización de los tramos seleccionados sobre la doble calzada Briseño -Tunja- Sogamoso, Tramo Duitama – Tunja.

Fuente. Google Earth Pro

El ruido o contaminación acústica es el resultado de la propagación de un conjunto de sonidos que pueden llegar a ocasionar molestias y problemas de salud en los seres humanos. Chávez J. menciona que el malestar, la interferencia de la comunicación, la pérdida de atención, de concentración y de rendimiento, los trastornos del sueño, la pérdida de la capacidad auditiva, el estrés y sus manifestaciones y la habituación al ruido son algunos de los efectos nocivos que éste ocasiona en los individuos a causa de los altos niveles sonoros a los que están expuestos (Chávez Miranda, 2006).

Teniendo en cuenta la gran cantidad de efectos negativos que el ruido origina en la salud de las personas, en Colombia el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial emitió la resolución 627 del 07 de abril de 2006, por medio de la cual se establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental; en el artículo 9 de dicha resolución, se precisa que las troncales, autopistas principales y en general todas las vías, son objeto de medición del nivel de ruido y se definen los estándares máximos permisibles para zonas específicas, expresados en decibeles DB (A) (Minambiente, 2006).

Es importante indicar en este punto que el ruido es multifactorial y que fuentes sonoras como: el ondear de las ramas de los árboles, los animales, las actividades comerciales, el transitar de las personas, etc., tienen un aporte significativo dentro del ruido ambiental. Sin embargo, el ruido del transporte puede llegar a ser uno de los problemas que mayor incidencia tiene en la generación de la contaminación acústica en los sistemas urbanos. Entonces es necesario reconocer que dentro del ruido producido por los vehículos pueden identificarse diferentes fuentes. En este sentido, García A. determina que gran parte del ruido de un vehículo resulta de: las explosiones del motor, el frenado, las vibraciones de la carrocería y el desplazamiento de los neumáticos sobre el revestimiento de la calzada, incluso dependiendo de la velocidad, el ruido asociado con la aerodinámica también puede ser muy importante. (García, 1988)

Con el fin de analizar el impacto en poblaciones sub urbanas de condiciones similares a los tramos de la vía de análisis, se determina que poblaciones como Villa-Pinzón y Paipa son las más representativas y expuestas al ruido por el tránsito vehicular. Teniendo en cuenta que el ruido es una externalidad a la cual no es posible determinar la magnitud del impacto de forma directa o en precios del mercado, encontramos que una de las formas de saberlo es a través de la técnica de costos de mitigación, que implica saber cuánto costaría mitigar el impacto y éste representaría su valor. Por lo anterior, se estudian componentes como los costos que genera el control de los problemas en la salud de los habitantes afectados por la contaminación acústica, la devaluación de los predios aledaños a la vía, los costos de mantenimiento vial para proporcionar un buen estado de la vía permanente y los costos de colocación de barreras acústicas para reducir el impacto generado en la población por el tránsito vehicular.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Determinar la magnitud e importancia del ruido producido por el rozamiento del neumático y el pavimento, y el impacto que éste genera en la población aledaña a vías suburbanas del departamento de Boyacá.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

-) Determinar a través de expresiones econométricas, la incidencia de la rugosidad del pavimento en la emisión del ruido ambiental asociado con el flujo de tráfico.
-) Valorar el impacto del ruido asociado con el flujo de tráfico, usando técnicas como la de costos de mitigación.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 RUIDO VEHICULAR

3.1.1. Sonido y ruido o contaminación acústica.

El sonido es la “sensación producida en el órgano del oído por el movimiento vibratorio de los cuerpos, transmitido por un medio elástico, como el aire” (RAE, 2019). Desde el punto de vista físico, el sonido es “una propagación de energía sonora por un movimiento ondulatorio en un medio elástico” (Ramírez Gonzalez & Domínguez Calle, 2011).

El sonido, como toda onda, se caracteriza por los valores de sus parámetros, entre otros, la frecuencia y la amplitud. La frecuencia es la cantidad de ciclos o vibraciones por unidad de tiempo, la cual está medida en Hertz (Hz) que corresponde a ciclos por segundo (Miyara, Acustica y sistemas de sonido, pág. 8); está relacionada con el tono alto o bajo de un sonido y el rango de frecuencia audible al oído humano es entre 20Hz y 20.000Hz y es mejor en el rango de 500 a 15.000Hz por eso no escuchamos por igual todas las frecuencias, de ahí que la mayoría de mediciones a través de sonómetros se realizan referenciadas al oído humano por eso se denotan dB(A). La intensidad, se puede asociar con el volumen al cual escuchamos el sonido y está asociada con la amplitud de la onda sonora. Se dice que el oído humano es más sensible a las variaciones de frecuencia que a las de intensidad (Ramírez Gonzalez & Domínguez Calle, 2011).

En cuanto a la relación entre el sonido y el ruido, físicamente no existe una distinción entre ellos (OMS, 1999, pág. 1). Sin embargo, desde un punto de vista subjetivo, el ruido es una combinación desordenada de sonidos que produce una sensación desagradable al oído (Ramírez Gonzalez & Domínguez Calle, 2011). El sonido es un conjunto de vibraciones ordenadas, mientras que el ruido es un sonido inarmónico (Rodríguez P., 2000), que se produce como resultado de la mezcla de ondas sonoras de diferentes intensidades y frecuencias.

De acuerdo al patrón de tiempo, se pueden identificar tres tipos de ruido: *continuo* cuando su intensidad es prácticamente constante durante el periodo de observación con fluctuaciones hasta de un (1) segundo y que no presenta cambios repentinos durante su emisión, por ejemplo, un motor eléctrico; *intermitente* cuando se producen caídas bruscas hasta el nivel ambiental y se vuelve a alcanzar el nivel superior y manteniéndose durante más de un segundo antes de producirse una

nueva caída, como al accionar de un taladro; de impacto cuando hay una elevación brusca de ruido en un tiempo inferior a 35 milisegundos y una duración total de menos de 500 milisegundos, como en el arranque de compresores, impacto de carros, cierre o apertura de puertas (ECI, 2019).

Los problemas ocasionados por el ruido, según la Organización Panamericana de la Salud, éste tiene efectos adversos sobre la comunicación, el sueño, el estado de ánimo, el desempeño en la escuela y el trabajo, la audición y la salud cardiovascular. Afirma que el tránsito denso tiene una relación directa con el ruido, y los efectos adversos se verificaron por estudios realizados en el Canadá, Eslovaquia, China, Sao Paulo y Curitiba en Brasil, donde además, se revela que el sexo, la edad, el nivel de educación, el tamaño de la comunidad y la provincia tienen una relación estadísticamente significativa con la molestia que genera el ruido del tránsito (OPS, 2010).

En Bogotá, según la Secretaría Distrital de Ambiente, el ruido es considerado uno de los impactos ambientales que afectan a la población en forma directa, ya que generan problemas auditivos y extra auditivos (insomnio, estrés, agresividad, baja productividad, ansiedad y depresión). Además, confirma que en esta ciudad, las fuentes móviles como tráfico rodado, aéreo y perifoneo, aportan el 60% de la contaminación auditiva (SDA, 2019).

3.1.2. Medición del ruido

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud – OMS, el ruido ambiental generalmente es descrito a partir de medidas que consideran la frecuencia del sonido, los niveles de presión acústica (SPL, por sus siglas en inglés) y la variación de esos niveles con el tiempo; donde, la presión sonora es una medida básica de las vibraciones del aire que constituyen el sonido (OMS, 1999). Ya que el rango de presión sonora que puede detectar el hombre es muy amplio, se mide en una escala logarítmica cuya unidad es el decibel (dB).

Un decibel (dB), es la unidad de sonido que expresa la relación entre las presiones de un sonido cualquiera y un sonido de referencia en escala logarítmica y es equivalente a 20 veces el logaritmo de base 10 del cociente de las dos presiones (Minsalud, 1983). Dado que se usan escalas logarítmicas, los niveles de presión sonora no se pueden sumar, ni promediar aritméticamente; y en su cálculo, además debe considerarse las fluctuaciones instantáneas de presión integrando en un intervalo de tiempo, ya que la mayoría de ruidos varían temporalmente.

La OMS afirma que la mayor parte de sonidos ambientales posee una mezcla compleja de frecuencias diferentes, encontradas en una banda de 20Hz a 20 000Hz para receptores jóvenes con buena audición que no pueden ser totalmente percibidas por los sistemas auditivos existentes, teniendo una misma sonoridad

para distintas frecuencias, por lo cual, según Casado, se crean las curvas isofónicas para representar los niveles de presión sonora de igual sonoridad para las diferentes frecuencias del espectro audible del oído humano (Casado-García), siendo Harvey Fletcher y Wilden A. Munson en 1933 los primeros en trazar unas curvas de igual sonoridad a partir de una investigación sobre el comportamiento del oído humano a determinados sonidos, obteniendo lo siguiente:

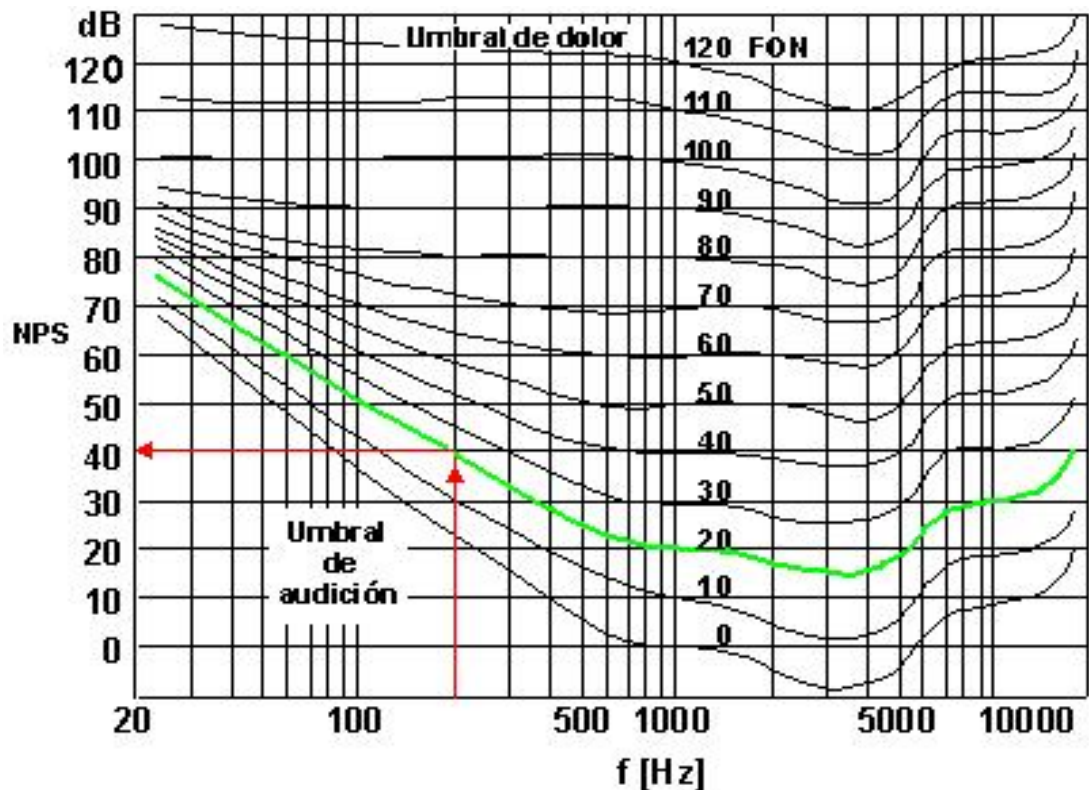


Figura 2. Curvas de Fletcher y Munson.
Fuente: (Miyara, Niveles sonoros)

Sin embargo, existieron dificultades para implementar tal sistema de medición que generaron el diseño de tres redes de ponderación de frecuencia mostradas en la Figura 3, correspondientes a niveles de alrededor de 40dB, 70dB y 100dB, llamadas A, B y C respectivamente; aplicándose la red de ponderación A para sonidos de bajo nivel, la red B a los de nivel medio y la C a niveles elevados. Aunque también tuvieron varios inconvenientes en su aplicación, la escala de ponderación A se volvió muy popular ya que mostró una buena correlación entre el nivel sonoro A y el daño auditivo, así como con la interferencia a la palabra; siendo la única medida disponible para evaluar los problemas de ruido con la salud y la tranquilidad, así como con la interferencia en diferentes actividades. Así, como se indica en la Resolución 8321/83, el nivel de presión sonora del ruido obtenido con un medidor

de nivel sonoro, en interacción y con un filtro de ponderación A se representa con dB(A) (Minsalud, 1983).

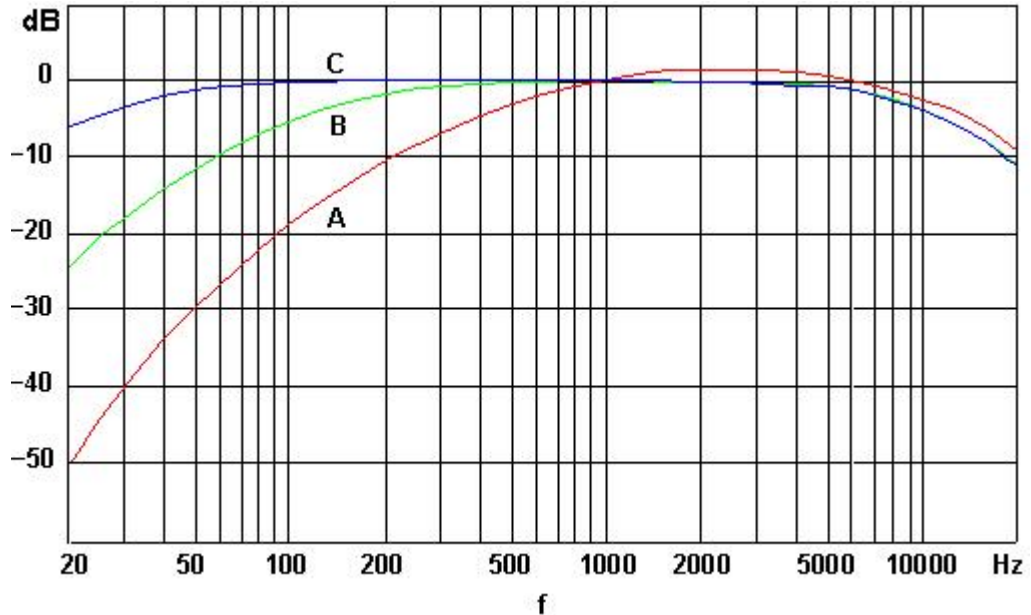


Figura 3. Curvas de Ponderación A, B y C.
FUENTE: (Miyara, Niveles sonoros)

Según la Organización Mundial de la Salud, para medir sonidos continuos, tales como el ruido del tránsito en carreteras se debe usar el nivel equivalente de la energía promedio del sonido con ponderación A en un periodo T ($L_{Aeq,T}$), el cual es la suma de la energía sonora total, asociada a la combinación de sucesos de ruidos en un período de tiempo T. Sin embargo, en sucesos distintivos, como son los casos: ruido de aviones o ferrocarriles, también se deben obtener medidas de sucesos individuales como el nivel máximo de ruido (L_{Amax}) o el nivel de exposición al sonido (NES) con ponderación A (OMS, 1999, pág. 2). Cuando el ruido consta de un número pequeño de eventos discretos, el nivel máximo (L_{Amax}) es el mejor indicador del trastorno del sueño y otras actividades, aunque en la mayoría de casos, el nivel de exposición al sonido con ponderación A (NES) proporciona una medida más uniforme de los eventos individuales de ruido, al integrar el evento de ruido completo y se define como “el nivel de presión sonora de un ruido continuo que tiene la misma energía en un segundo que la del ruido real durante el intervalo de tiempo T”. (MinTransición Ecológica-España, s.f., pág. 27)

Entre los índices de medición (MinTransición Ecológica-España, s.f., pág. 26) considerados para el estudio de la contaminación acústica también se tienen:

- Índices de la serie estadística (niveles percentiles). L_N : Cuando se estudia la variación de nivel de presión sonora en un período de tiempo largo, para ciertas fuentes de ruido, el período siguiendo una ley normal se puede descomponer en intervalos constantes para cada uno de los cuales se obtienen correspondientes niveles de presión sonora, así, se definen los siguientes valores:
 - ✓ Nivel L_1 : Valor muy cercano al ruido máximo que corresponde al nivel alcanzado o sobrepasado durante el 1% del tiempo en el período de análisis.
 - ✓ Nivel L_{10} : Nivel igualado o superado durante el 10% del tiempo en el período considerado.
 - ✓ Nivel L_{50} : Nivel igualado o superado durante el 50% del tiempo de medición, siendo igual a la mediana estadística es decir el ruido medio.
 - ✓ Nivel L_{90} : Nivel igualado o superado durante el 90% del tiempo en el período considerado que generalmente se toma como el ruido de fondo.
 - ✓ Nivel L_N : Nivel igualado o superado durante el N% del tiempo de análisis.

Sin embargo, tales índices estadísticos para su aplicación al ruido originado por el transporte no responden a una formulación matemática precisa, en realidad, solo informan la probabilidad de alcanzar o sobrepasar un determinado nivel, en un lugar concreto, durante un N% del tiempo; además para que sean significativos, se pueden aplicar únicamente en un tráfico de carreteras con una intensidad superior a 500 vehículos/hora.

- Distribución temporal: los períodos día, noche y tarde-noche. El L_{den} .

Considerando que un ruido es soportable dependiendo las circunstancias, un indicador de carácter general difícilmente puede explicar todas las situaciones, por lo tanto se establecen dos índices:

- ✓ L_{Aeq} (día)
- ✓ L_{Aeq} (noche)

Luego, se define un nivel sonoro día-tarde-noche (L_{DEN}) y se calcula con:

“

$$L_D = 10 * \log\left(\frac{12 * 10^{\frac{L_d}{10}} + 4 * 10^{\frac{L}{10} + 5} + 8 * 10^{\frac{L_n}{10} + 1}}{24}\right)$$

Donde,

$L_{\text{día}}$ = nivel sonoro medio a largo plazo ponderado a definitivo en la norma ISO 1996 2: 1987, determinado a lo largo de todos los periodos diurnos del año.

L_{tarde} = nivel sonoro medio a largo plazo ponderado a definitivo en la norma ISO 1996 2: 1987, determinado a lo largo de todos los periodos vespertinos del año.

L_{noche} = nivel sonoro medio a largo plazo ponderado a definitivo en la norma ISO 1996 2: 1987, determinado a lo largo de todos los periodos nocturnos de un año.” (MinTransición Ecológica-España, s.f., pág. 31)

En Colombia, la legislación vigente a la fecha corresponde a la Resolución 627/06, en la cual se establece la normatividad para emisión de ruido (Minambiente, 2006). De allí se puede extraer algunos aspectos relevantes para la medición del ruido vehicular:

Horarios de día y noche para el territorio nacional son (Artículo 2):

-) Diurno: de las 7:01 a las 21:00 horas.
-) Nocturno: de las 21:01 a las 7:00 horas.

Los principales parámetros de medida son (Artículo 4):

-) Los niveles de presión sonora continuo equivalente ponderados A, $L_{\text{Aeq T}}$ y ponderado lento,
-) Ruido residual, medido como nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, $L_{\text{Aeq T, Residual}}$.
-) Nivel percentil L_{90} .

“Artículo 6. Los niveles de presión sonora continuo equivalente ponderados A, $L_{\text{Aeq T}}$ y nivel percentil L_{90} , se corrigen por impulsividad, tonalidad, condiciones meteorológicas, horarios, tipos de fuentes y receptores, para obtener niveles corregidos de presión sonora continuo equivalente ponderados A”. Tales correcciones en decibeles, se efectúan de acuerdo con lo siguiente:

$$L_{RA(X),T} = L_{A(X),T} + (K_I, K_T, K_R, K_S)$$

Donde,

K_I = Ajuste por impulsos (dB(A))

K_T = Ajuste por tono y contenido de información (dB(A))

K_R = Ajuste por la hora del día (dB(A))

K_S = Ajuste para ciertas fuentes y situaciones, por ejemplo, bajas frecuencias, que puede ser negativo o positivo (dB(A))

(X) = Cualquiera de los parámetros de medida.”

3.1.3. Instrumentos de medición del ruido

Según la normatividad colombiana (Minambiente, 2006), la selección de los equipos de medida se debe hacer de manera que tengan la capacidad para medir el nivel equivalente de presión sonora con ponderación frecuencial A, $L_{Aeq T}$, directa o indirectamente; los sonómetros deben ser del Tipo 1 o mínimo Tipo 2.

Dentro de los principales instrumentos de medición encontramos (Ortiz, 2010):

3.1.3.1 Sonómetro

Instrumento de medición de niveles de presión sonora en un determinado lugar y momento dado. Tal instrumento tiene como unidad de medida el decibelio y si no usa un sonómetro integrador (uso de curvas ponderadas) se entiende que son dB SPL.

Cuando se quiere medir la contaminación acústica se han creado sonómetros específicos que permitan hacer las mediciones de ruido para la fuente particular de análisis y según normas nacionales e internacionales se han logrado clasificar en 4 tipos:

- Sonómetro de Clase 0: Utilizado en laboratorios para obtener niveles de referencia.
- Sonómetro de Clase 1: Permite el trabajo de campo con precisión.
- Sonómetro de Clase 2: Permite realizar mediciones generales en los trabajos de campo. Entre los sonómetros de Clase 2, en el mercado nacional (Safety Instruments) se ofrece el Sonómetro Extech HD600 caracterizado por:
 - ✓ 3 rangos desde 30 a 130 dB.
 - ✓ Tipo2 según ANSI ,IEC61672-1 y OSHA
 - ✓ Capacidad de Registro de Datos hasta de 20,000 datos.
 - ✓ Registra lecturas con fecha y hora.
 - ✓ Funciones de Mínimo, Máximo y Sostener Dato (HOLD)
 - ✓ Ensamble en carcasa robusta

Además, incluye:

- ✓ Software compatible Windows
- ✓ Cable USB
- ✓ Protector contra viento
- ✓ Adaptador AC
- ✓ Batería 9VDC
- ✓ Trípode
- ✓ Estuche de Transporte

- Sonómetro de Clase 3: Tipo de sonómetro menos preciso, permitiendo realizar únicamente mediciones aproximadas, utilizándolo para realizar reconocimientos.

3.1.3.2 Micrófonos de medición

Instrumento costoso, al estar diseñado para que su respuesta de frecuencia sea ultra plana, y no coloreen el sonido en ningún punto del espectro.

3.1.3.3 Calibradores

Generalmente son dispositivos de forma cilíndrica con una cavidad donde el micrófono de medición entra para ser calibrado, tales instrumentos son creados para calibrar un sonómetro o sistema de medición en 94dB facilitando la realización de la medición con valores reales en decibeles.

3.1.4. Operaciones con la unidad de registro del sonido (decibelios):

Para poder efectuar los cálculos necesarios con la información proporcionada en campo, es fundamental considerar la manera de operarlos ya que como se ha explicado anteriormente, los niveles son valores logarítmicos que no es posible sumarlos, restarlos y promediarlos de forma aritmética, así:

) SUMA DE DECIBELIOS

Para sumar dos o más niveles de presión sonora no relacionados se usa la siguiente expresión:

$$L_p = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right)$$

Donde,

- ❖ L_{pt} = Nivel de presión sonora total, dB
- ❖ L_{pi} = Cada Nivel de Presión sonora Individual (i^{th}), dB
- ❖ n = Número total de valores o niveles.

Luego, para sumar múltiples niveles de potencia de sonido, se sigue el mismo formato:

$$L_w = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right)$$

Donde,

- ❖ L_{wt} = Nivel de potencia sonora total, dB
- ❖ L_{wi} = Cada Nivel de Potencia sonora Individual (i^{th}), dB
- ❖ n = Número total de valores o niveles. (Associates in Acoustics Inc, 2009, pág. 24.)

Además, existe otro método como el uso de la tabla de combinación de niveles de decibelios para sonidos no relacionados, la cual consiste en determinar la diferencia numérica entre los dos niveles que se van a sumar, de acuerdo a esta diferencia se agrega un valor al mayor de los dos niveles para obtener el nivel resultante (LP3).

) PROMEDIO DE DECIBELIOS

Para mediciones repetidas que se realizan en la misma posición con el tiempo, es útil promediar los decibelios y se realiza a partir de la siguiente fórmula:

$$\bar{L} = 10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right)$$

Donde,

- ❖ \bar{L} = Nivel de presión sonora promedio, dB
- ❖ L_{pi} = Cada nivel de presión sonora individual (i^{th}), dB
- ❖ n = Número total de valores o niveles.

Se puede aclarar que cuando hay diferencia de solo unos dB entre los niveles individuales, el promedio del logarítmico aritmético es similar al promedio aritmético. (Associates in Acoustics Inc, 2009, págs. 29-30)

3.1.5. Factores que afectan a la generación del ruido del tráfico

Cuando se delimita un área de estudio para analizar cuál es el origen del ruido, es posible encontrar múltiples fuentes de donde puede provenir ligeramente o gran parte del ruido al que están expuestos los individuos dentro de la zona establecida. Por un lado, la propia naturaleza aporta cierta porción de ruido ambiental, mientras que las actividades comerciales, si se trata de una zona urbana, también pueden constituir un foco importante de ruido, además del sonido proveniente de los procesos productivos de fábricas, industrias o el campo de la construcción. Señalar puntualmente a una fuente de ruido como única no es acertado, puesto que, como se explicó anteriormente, la generación del ruido es multifactorial.

Tomando como referencia a la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 1974), se pueden clasificar a las fuentes de ruido en las ciudades, como: móviles y fijas. En cualquier caso, sea por cuestiones relacionadas con las industrias, las fábricas o el propio comercio (fuentes fijas), o debidos al tráfico rodado (fuente móvil), siempre se llegará a la conclusión de que la contaminación acústica es un subproducto de la actividad humana.

Se ha encontrado que existe una relación directa y exponencial entre el nivel de desarrollo de un país y el grado de contaminación acústica que impacta a su población, ello por cuanto aumenta el número de vías y el tráfico vehicular, así como el ruido proveniente del sector industrial (OMS, 1999).

“Sin duda alguna, las fuentes de ruido más importantes de los países industrializados, son los automóviles (turismos, camiones, autobuses, motocicletas, etc.). En particular, la circulación rodada, se ha convertido en poco tiempo en la fuente de contaminación acústica más importantes de todas las grandes ciudades del mundo. Esta afirmación se basa en el aumento espectacular que ha experimentado el parque automovilístico en el curso de estos últimos años y en el hecho de que las ciudades por las que circula no han sido concebidas para soportarlo”.

De acuerdo a (GTZ, 2000), el ruido que proviene de las calles y el tráfico tiene cuatro fuentes principales:

- Ruido Vehicular: Proviene del motor, los mecanismos de transmisión de potencia del motor a las ruedas, el ruido aerodinámico del vehículo al desplazarse, los sistemas auxiliares (sistemas de frenos, bombas, etc.) y otra serie de fuentes como el portaequipaje cuándo el vehículo está en movimiento, además de tener la fuente del motor y tubo de escape sin importar si el vehículo está en movimiento o estacionario. El mantenimiento escaso también contribuye a esta fuente de ruido.
- Ruido de la fricción con el camino: El ruido que proviene del contacto entre los neumáticos y el pavimento contribuye en forma significativa al ruido del

tráfico total. Criterio confirmado por (Garcia, 1988) quien asocia a ésta fuente el mayor porcentaje de la contaminación acústica por tráfico vehicular. Hay dos mecanismos importantes de generación de ruidos:

- ✓ Las irregularidades de la superficie del camino generan vibraciones en los neumáticos que llevan a la producción de ruido.
- ✓ La compresión y relajación del aire en los contornos del neumático en el área de contacto generan ruido aerodinámico o bombeo de aire.

Así, el nivel de ruido generado por la fricción en el camino depende del tipo y condición de los neumáticos y del pavimento. Además, el ruido neumático/pavimento generalmente es mayor a alta velocidad y durante el frenado rápido.

- **Comportamiento del Conductor:** Cuando los conductores conducen a altas velocidades, utilizan las bocinas de los vehículos, escuchan música que afecta el equilibrio acústico de la zona, se gritan entre ellos y hacen que sus neumáticos rechinen como resultado de un frenado repentino o una aceleración.
- **Construcción y Mantenimiento:** De acuerdo al Banco Mundial la construcción y mantenimiento de las vías contribuye en gran medida al ruido sostenido durante la operación de la maquinaria pesada utilizada para realizar el trabajo.

Los factores que contribuyen a los impactos del ruido vehicular se pueden agrupar de la siguiente forma (GTZ, 2000):

- *Factores vehiculares:* Dependiendo el vehículo se generan diferentes niveles de ruido, teniendo niveles de ruido mayores a los generados por camiones de transporte que por automóviles livianos, ya que tienen un número de neumáticos en contacto con el pavimento y, frecuentemente, usan frenos en la desaceleración. El escaso mantenimiento hace que los vehículos posean tubos de escape incompletos o frenos en mal estado, generando una mayor cantidad de ruido. Además, si el vehículo posee neumáticos no carreteros, utilizados generalmente en la nieve, son especialmente ruidosos.
- *Superficies viales:* Las características de la superficie de la vía son importantes, pues si son caminos ásperos, son más ruidosos que una superficie vial lisa. En los puentes, las juntas de expansión generan un nivel de ruido mayor. Las superficies viales cubiertas con plantas generalmente se aproximan a reducir una considerable cantidad de ruido, mientras que las superficies de concreto y asfalto, no poseen alguna función benéfica.
- *Geometría vial:* Cuando se suben o bajan vías con una gran pendiente o cuando se debe circular por curvas cerradas, el nivel de ruido aumenta

considerablemente. Además, influye el alineamiento vertical de la vía, pues si se encuentra en un nivel muy por debajo del terreno, se mantiene a los receptores fuera de la zona de impacto por contaminación acústica.

- *Factores ambientales:* La densidad del aire que influye en la propagación de las ondas sonoras se ve alterada por factores ambientales como la temperatura y la humedad. Otro factor influyente es el viento, ya que lugares a favor de éste están expuestos a mayores niveles de ruido. Las zonas con actividades industriales y otras propias de los humanos que generen ruido ambiental son menos perceptibles al nivel de ruido generado por el desarrollo de una nueva vía; y con la creación de ésta se puede generar un nivel inaceptable de ruido total. Otro factor ambiental es la topografía, ya que en un valle el ruido es más perceptible que en una llanura, además las lomas y cerros pueden actuar como barreras naturales si están situados entre la vía y los receptores. Además, las vías a nivel, difunden el ruido sobre distancias más grandes.
- *Relaciones espaciales:* La distancia entre el receptor y el camino, influye considerablemente pues entre más cerca se encuentren mayor será el impacto. El impacto por las relaciones espaciales también está dado por la densidad de población, ya que si hay un mayor número de personas, mayores receptores probables y por lo tanto mayor impacto.
- *Flujo de tráfico:* Influye a partir del tipo de vehículo y nivel de mantenimiento, flujo vehicular (número de vehículos pasando por unidad de tiempo); constancia del flujo, ya que los vehículos generan más ruido en el proceso de detención y arranque; velocidad del flujo, pues a velocidades altas, mayores niveles de ruido y relación entre el nivel de ruido ambiental y el dado por tráfico, pues si el máximo del ruido ambiental y el dado por tráfico coinciden en el horario, los efectos del ruido dado por tráfico son menos perceptibles.

3.1.6. Niveles sonoros máximos permisibles

Los niveles máximos de presión sonora de acuerdo a la normativa colombiana se encuentran en la TABLA 1.:

Tabla 1. Estándares máximos permisibles de niveles de emisión de ruido en Colombia, expresados en decibeles dB(A).

| SECTOR | SUBSECTOR | ESTÁNDARES MÁXIMOS PERMISIBLES DE NIVELES DE EMISIÓN DE RUIDO EN dB(A) | |
|---|--|--|-------|
| | | Día | Noche |
| Sector A. Tranquilidad y Silencio. | Hospitales bibliotecas, guarderías, sanatorios, hogares geriátricos. | 55 | 50 |
| Sector B. Tranquilidad y Ruido Moderado | Zonas residenciales o exclusivamente destinadas para desarrollo habitacional, hotelería y hospedajes. | 65 | 55 |
| | Universidades, colegios, escuelas, centros de estudio e investigación. | | |
| | Parques en zonas urbanas diferentes a los parques mecánicos al aire libre. | | |
| Sector C. Ruido Intermedio Restringido | Zonas con usos permitidos industriales, como industrias en general, zonas portuarias, parques industriales, zonas francas. | 75 | 75 |
| | Zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, tabernas, discotecas, bingos, casinos | 70 | 60 |
| Sector C. Ruido Intermedio Restringido | Zonas con usos permitidos de oficinas. | 65 | 55 |
| | Zonas con usos institucionales. | | |
| | Zonas con otros usos relacionados, como parques mecánicos al aire libre, áreas destinadas a espectáculos públicos al aire libre. | 80 | 75 |
| Sector D. Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado. | Residencial Suburbana. | 55 | 50 |
| | Rural habitada destinada a explotación agropecuaria. | | |
| | Zonas de Recreación y descanso, como parques naturales y reservas naturales. | | |

Fuente: (Minambiente, 2006)

3.1.7. Efectos del ruido en la salud y el bienestar

El ruido ambiental puede provocar efectos negativos sobre la salud humana si se sobrepasan los niveles de ruido establecidos por entidades encargadas del bienestar social y conservación ambiental. La Organización Mundial de la Salud

establece los valores guía para el ruido en ambientes específicos mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Valores Guía para el ruido urbano en ambientes específicos.

| AMBIENTE ESPECÍFICO | EFECTO(S) CRÍTICO(S) SOBRE LA SALUD | L_{Aeq} [dB(A)] | Tiempo [horas] | L_{max fast} [dB] |
|---|--|--------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Exteriores | Molestia grave en el día y al anochecer. | 55 | 16 | - |
| | Molestia moderada en el día y al anochecer. | 50 | 16 | - |
| Interior de la vivienda, dormitorios | Interferencia en la comunicación oral y molestia moderada en el día y al anochecer. | 35 | 16 | 45 |
| | Trastorno del sueño durante la noche. | 30 | 8 | |
| Fuera de los dormitorios | Trastorno del sueño, ventana abierta (valores en exteriores) | 45 | 8 | 60 |
| Salas de clase e interior de centros preescolares. | Interferencia en la comunicación oral, disturbio en el análisis de información y comunicación del mensaje. | 35 | Durante clases | - |
| Dormitorios de centros preescolares, interiores. | Trastorno del sueño. | 30 | Durante el descanso | 45 |
| Escuelas, áreas exteriores de juego. | Molestia (fuente externa) | 55 | Durante el juego | - |
| Hospitales, pabellones, interiores. | Trastorno del sueño durante la noche. | 30 | 8 | 40 |
| | Trastorno del sueño durante el día y al anochecer. | 30 | 16 | - |
| Hospitales, salas de tratamiento, interiores. | Interferencia en el descanso y la recuperación. | #1 | | |
| Áreas industriales, comerciales y de tránsito, interiores y exteriores. | Deficiencia auditiva. | 70 | 24 | 110 |
| Ceremonias, festivales y eventos de entretenimiento. | Deficiencia auditiva (patrones: <5 veces/año) | 100 | 4 | 110 |
| Discursos públicos, interiores y exteriores. | Deficiencia auditiva. | 85 | 1 | 110 |
| Música y otros sonidos a través de audífonos o parlantes. | Deficiencia auditiva (Valor de campo libre) | 85 #4 | 1 | 110 |
| Sonidos de impulso de juguetes, fuegos artificiales y armas. | Deficiencia auditiva (adultos) | - | - | 140 |
| | | | | #2 |
| | Deficiencia auditiva (niños) | - | - | 120 |
| Exteriores de parques de diversión y áreas de conservación. | Interrupción de la tranquilidad. | #3 | | |

Fuente: (OMS, 1999)

Algunas cifras permiten contextualizar el grave problema de salud que ocasiona el ruido, no sólo en sectores suburbanos cercanos a las vías principales, sino a nivel nacional: “En el país, cerca de cinco millones de colombianos, es decir casi 11 por ciento de la población total, padecen problemas de audición y se estima que entre la población laboralmente activa de 25 a 50 años la prevalencia de la pérdida de audición por exposición a ruido es de un 14 por ciento” (Minsalud, 2015).

Las exposiciones repetidas a niveles altos de ruido, durante un periodo prolongado, pueden ocasionar una pérdida de audición temporal o permanente. “Dependiendo la severidad de la exposición al ruido, se puede producir la destrucción de las células sensoriales receptoras o puede conducir al colapso de secciones completas del órgano de Corti” (El ruido.com, s.f.).

Existen varios tipos de daños producidos por el ruido que a su vez causan diversos efectos sobre la salud humana, tenemos el daño auditivo que produce efectos como la fatiga auditiva, entre otros; daños psicosociales que causan dificultad de comunicación, perturbación del reposo y descanso, alteraciones de sueño, disminución de la concentración, malestar, ansiedad, estrés, entre otros; y los daños de alteraciones en órganos distintos a la audición que producen alteraciones del sistema nervioso, alteraciones cardiovasculares, aparato digestivo, entre otros.

En definitiva, existen una gran cantidad de enfermedades que pueden llegar a ser un común dentro de las poblaciones más cercanas al foco de contaminación; probablemente y si se realizara un estudio más a fondo respecto a este tema, podría determinarse estadísticamente la cantidad de personas que se verían afectadas en mayor medida por alguna de las patologías mencionadas anteriormente.

3.1.8. Efectos del ruido sobre el valor de las viviendas

Es evidente que el ruido genera impacto sobre el precio de las viviendas aledañas, en consecuencia, es relevante mencionar a Avelino Sandoval, quien en su artículo “RUIDO POR TRÁFICO URBANO: CONCEPTOS, MEDIDAS DESCRIPTIVAS Y VALORACIÓN ECONÓMICA” (Sandoval, 2005), adapta alguna de la información contenida en el libro de Bateman 2001 (Bateman, Day, Lake, & Lovett, 2001), con el objetivo de organizar una tabla resumen donde se mencionan varias investigaciones cuyas conclusiones iban dirigidas a relacionar el porcentaje de depreciación en los precios de la vivienda, debido al incremento en un 1 dB(A) del nivel de ruido.

Tabla 3. Porcentaje de depreciación en los precios de la vivienda por el incremento en un 1 dB(A) del nivel de ruido

| Método | Autor | Años | País | Localización | Medida Ruido | NSDI(%) ¹ |
|--------------------------|------------------------|-----------|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| Precios hedónicos | Allen (1980) | 1977-79 | USA | North Virginia, Va | L_{10} | 0.15 |
| | | 1977-79 | USA | Tidewater, Va | L_{10} | 0.14 |
| | Anderson y Wise (1977) | 1969-71 | USA | Towson, Md | MPL | 0.43 |
| | | 1969-71 | USA | North Springfield | MPL | 0.14 |
| | Bailey (1977) | 1968-76 | USA | North Springfield | Log de la distancia | 0.30 |
| | Gamble et, al (1974) | 1969-71 | USA | Bogotoa, N.J | MPL | 2.20 |
| | | 1969-71 | USA | Rosendale, Md. | MPL | 0.24 |
| | | 1969-71 | USA | North Springfield | MPL | 0.21 |
| | | 1969-71 | USA | Las Tres Areas | MPL | 0.26 |
| | Grue et, al (1997) | | Norway | Oslo, Obos | L_{eq} | 0.24 |
| | | | Norway | Oslo, Flats | L_{eq} | 0.21 |
| | | | Norway | Oslo, Houses | L_{eq} | 0.54 |
| | Hidano et, al (1997) | | Japón | Tokio | L_{eq} | 0.7 |
| | Hall et, al (1978) | | Canadá | Toronto | L_{eq} | 1.05 |
| | Hall et, al (1982) | | Canadá | Toronto, Arterial | L_{eq} | 0.42 |
| Hall et, al (1987) | | Canadá | Toronto, Expressway | L_{eq} | 0.52 | |
| Hammar (1974) | | Suecia | Estocolmo | L_{eq} | 0.8-1.7 | |
| Iten y Maggi (1990) | | Suiza | Zurich | n.a | 0.9 | |
| Langley (1976) | 1962-72 | USA | North Springfield | MPL | 0.22 | |
| Nelson (1978) | 1970 | USA | Washington, D.C | L_{dn} | 0.87 | |
| Palmquist | 1962-76 | USA | Kingsgate, Wa | L_{10} | 0.48 | |
| 1980,82, 83,84, | 1958-76 | USA | North King Country | L_{10} | 0.30 | |
| 1991) | 1950-78 | USA | Spokane, Wa | L_{10} | 0.08 | |
| Pommerherne (1988) | 1986 | Suiza | Basel | L_{eq} | 1.26 | |
| Renew (1996; a, b) | | Australia | Brisbane | L_{eq} | 1.0 | |
| Soguel (1991,1994) | 1990 | Suiza | Neuchatel | L_{eq} | 0.91 | |
| Vainio (1995) | | Finlandia | Helsinki | L_{eq} | 0.36 | |
| Vaughan y Huckins (1975) | 1971-72 | USA | Chicago | L_{eq} | 0.65 | |
| Precios hedónicos | | | | | | |

Fuente: Ruido por tráfico urbano: conceptos, medidas descriptivas y valoración económica. (Sandoval, 2005)

Es importante aclarar que los estudios contenidos en la tabla resumen, fueron realizados en diferentes países, en consecuencia, pueden llegar a ser una excelente referencia, en tanto se ajusten a las condiciones locales, al valor actual de los predios en el mercado, y al incremento progresivo de la contaminación acústica causada ruido vehicular.

3.2 PERFIL Y REGULARIDAD SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO

Lavaud enuncia que “La regularidad de un pavimento está determinada por las ondulaciones longitudinales en las huellas de los neumáticos con respecto a una

línea de referencia (Lavaud, 2011, pág. 3).” Luego, es importante conceptualizar la longitud y amplitud de onda para poder caracterizar las ondulaciones longitudinales, que de acuerdo al Instituto Nacional de Vías – INVIAS se definen respectivamente como la distancia que hay entre las partes de la curva repetidas periódicamente en dirección longitudinal al plano del pavimento y como la mitad de la distancia entre la cresta y la base de la irregularidad (INVIAS, 2013, pág. 74).

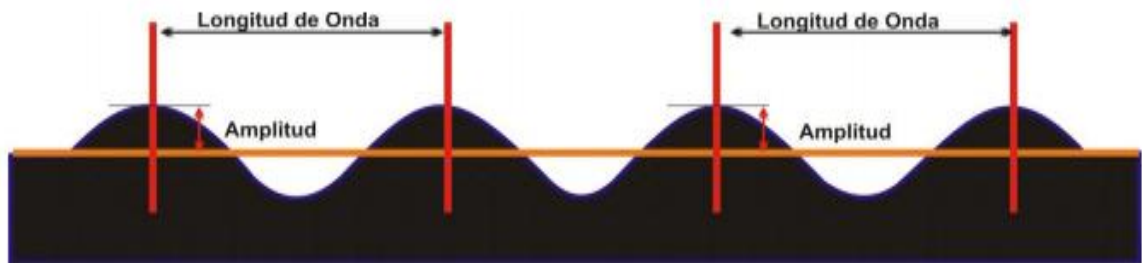


Figura 4. Longitud de Onda y Amplitud

Fuente: LAVAUD, Paul. Importancia de la regularidad superficial (IRI) en la construcción de pavimentos asfálticos en caliente (Lavaud, 2011, pág. 4)

Lavaud comenta sobre la división de las ondulaciones en la huella de rodadura de la superficie de un pavimento, citando la Tabla 3. (Lavaud, 2011, pág. 4)

Tabla 4. Especificaciones de rango de frecuencia según características de la superficie según PIARC. 1990

| SUPERFICIE | Rango de Frecuencia | |
|--------------|---------------------|---------------------------|
| | Longitud de Onda | Número de Ondas (ciclo/m) |
| Microtextura | < 0.5 mm | > 2000 |
| Macrotextura | 0.5 - 50 mm | 20 - 2000 |
| Megatextura | 50 - 500 mm | 2 - 20 |
| Rugosidad | 0.5 - 50 m | 0.02 - 2 |

Fuente: Importancia de la regularidad superficial (IRI) en la construcción de pavimentos asfálticos en caliente (Lavaud, 2011, pág. 4)

3.2.1. Técnicas para medir la regularidad superficial de los pavimentos

En cuanto a las técnicas para medir la regularidad de los pavimentos, el INVIAS (INVIAS, 2013, págs. 76-78) enuncia diferentes técnicas para medir la regularidad superficial de los pavimentos y de acuerdo al Banco Mundial las agrupa en 4 clases:

- ✓ Medidas de precisión del perfil: Nivelación de precisión de la topografía clásica (mira y nivel) que determina el perfil real de la superficie del pavimento, que de acuerdo a Badilla, Elizondo y Barrantes es una representación en dos dimensiones de la superficie del mismo. Procedimiento lento y costoso
- ✓ Otros métodos perfilométricos. Suministran una reproducción a escala, precisa y completa del perfil del pavimento y la determinan a partir de una referencia inercial dada con la colocación de acelerómetros en la carrocería del vehículo de medición que mide el movimiento vertical de ésta.
- ✓ Medidores de rugosidad del tipo respuesta (RTRRMs): Medidores económicos, de fácil manejo y alto rendimiento. Sin embargo, no miden el perfil real de la carretera, sino un efecto dinámico de las irregularidades del mismo, que por el sistema mecánico del vehículo puede ser atenuado o amplificado. Su sistema de operación consiste en utilizar un transductor que detecte los movimientos verticales del eje trasero de un automóvil o del eje de un remolque, respecto de la carrocería del vehículo y los transmita a un microprocesador que registre la condición superficial del pavimento en milímetros o pulgadas acumuladas de movimiento relativo sobre una determinada distancia recorrida.
- ✓ Evaluaciones Subjetivas: Cuando no se dispone del equipo adecuado para la medida de la regularidad superficial, se evalúa a partir de indicadores subjetivos, como la sensación de comodidad que experimenta el evaluador que transita en un vehículo automotor por la vía.

3.2.2. Índice de Rugosidad Internacional - IRI

Según el Instituto Nacional de Vías, *“El IRI es una medida de la influencia de la uniformidad del perfil longitudinal de la carretera sobre la calidad de la rodadura, que representa la vibración de un vehículo típico de pasajeros como resultado de la falta de regularidad de la superficie de la vía. Se define como la relación entre el movimiento acumulado entre las masas amortiguada y no amortiguada de un modelo matemático denominado “cuarto de carro” (cuya respuesta es similar a la de un automóvil) que circula a una velocidad de 80 kilómetros por hora, y la distancia recorrida. Este valor se expresa corrientemente en m/Km. Un IRI = 0 significa una superficie totalmente lisa y su valor aumenta con las irregularidades del perfil”* (INVIAS, 2013, pág. 79).

El índice de rugosidad internacional (IRI) se toma como una medida de referencia para caracterizar la rugosidad en el perfil longitudinal de la carretera. Luego, tal índice mide la influencia de la calidad del perfil longitudinal de la carretera en la calidad de la rodadura, y es una herramienta mediante la cual se puede representar la variación de un vehículo típico de pasajeros como resultado de la falta de regularidad de la superficie de la vía.

MODELO DEL CUARTO DE CARRO

Con el fin de complementar la definición del IRI es fundamental aclarar que su conceptualización como lo indican Romero y Lozano (Romero & Lozano, 1995) está basada en la respuesta dinámica al perfil de un camino de un modelo matemático conocido como “cuarto de carro” (CC). Dicho modelo, corresponde a un sistema de dos grados de libertad, que modela un monociclo, con parámetros definidos e invariables. Así, el IRI para una velocidad y longitud de referencia, es el promedio de la diferencia de la relación encontrada entre el desplazamiento vertical con el recorrido horizontal hecho por las dos masas involucradas sobre el perfil analizado, relación representada en la Figura 5:

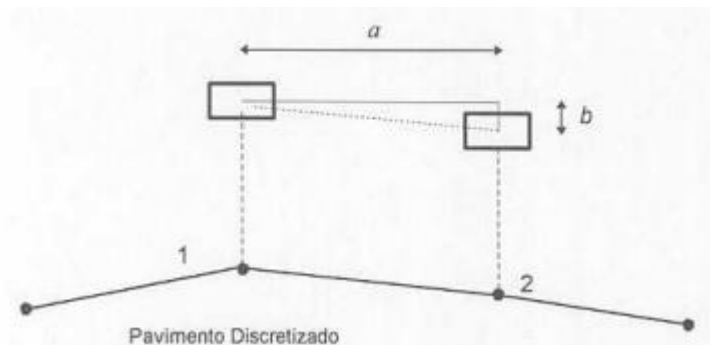


Figura 5. Relación del desplazamiento vertical y recorrido horizontal de la masa del CC entre dos puntos consecutivos.

Fuente: Romero y Navarrete.

Considerando la explicación dada por (Lavaud, 2011, pág. 6) al sistema de suspensión de un auto, se observa que por medio de los neumáticos se transmiten los efectos de la capa de rodadura a la suspensión, por lo cual existen unos amortiguadores sobre el mismo eje de colocación de los neumáticos y lo que los pasajeros del vehículo sienten son las vibraciones transmitidas por el asiento y el timón. De ésta manera, según (Romero & Lozano, 1995) con el fin de simular la condición real de vehículo-vía, el modelo CC está conformado por dos masas, una asociada a la suspensión y la otra al vehículo, donde la suspensión consta de un resorte y un amortiguador, mientras que a la llanta se le asocia únicamente un resorte, teniendo la Figura 5.

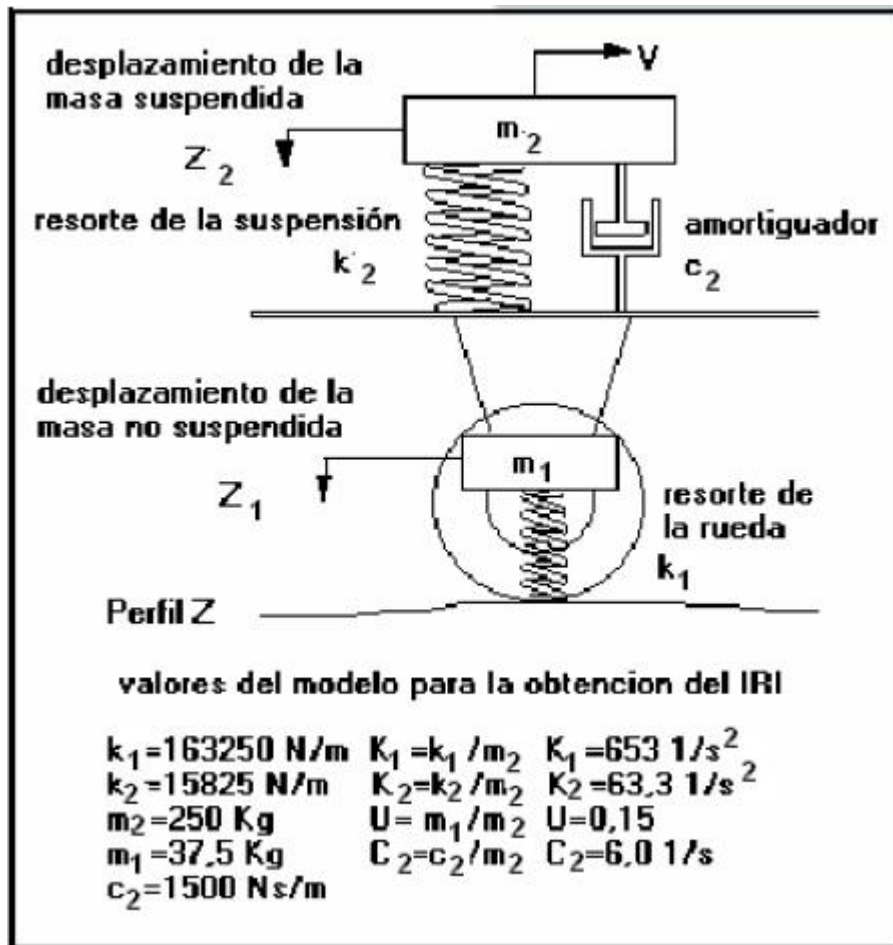


Figura 6. Representación gráfica del modelo matemático de "CC"
Fuente: (INVIAS, 2013, pág. 80).

Donde m_2 representa a la masa del vehículo y m_1 a la masa asociada a la suspensión, además es importante añadir que la velocidad de circulación de las masas es de 80Km/h.

3.2.3. Cálculo del IRI

3.2.3.1 Equipos

De acuerdo al Instituto Nacional de Vías, para obtener los datos necesarios para el cálculo del IRI se pueden utilizar dos categorías de equipos (INVIAS, 2013, pág. 2):

- **Equipos de alto rendimiento:** Perfilómetros ópticos y perfilómetros láser. Que según Romero y Lozano permiten obtener el perfil real del camino que sirve como dato de entrada para el modelo de cuarto de carro y permite obtener directamente el IRI. (Romero & Lozano, 1995, pág. 7)

- **Equipos de bajo rendimiento (portátiles):** Se refieren al uso de perfilómetros pivotantes y equipos de topografía, nivel y mira que de acuerdo a Badilla, Elizondo y Barrantes, son la manera más conocida para la medición del perfil longitudinal y aunque es relativamente lento, tiene una gran precisión y permite obtener una medida exacta del perfil del pavimento y se utiliza generalmente cuando se miden pocos perfiles (Badilla Vargas, Elizondo Arrieta, & Barrantes Jiménez, 2008); sin embargo en proyectos de gran magnitud, es impráctico y de alto costo.

Complementando, el programa de infraestructura del transporte de la universidad de Costa Rica (UCR, 2014), indica que:

Tabla 5. Equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial de pavimentos.

| EQUIPO | GRADO DE PRECISIÓN | IMPLEMENTACIÓN | COMPLEJIDAD DEL EQUIPO | OBSERVACIONES |
|---------------------------------|--------------------|---|------------------------|---|
| Nivel y Mira Topográfica | Muy alto | Mediciones de perfil y calibración de equipos más complejos | Simple | Poco práctico y costos muy elevados para proyectos largos |
| Dipstick | Muy alto | Control de calidad y recepción de obras. | Simple | No son prácticos para evaluar la condición a nivel de red. |
| Equipos tipo respuesta (RTRRMS) | Medio | Monitoreo de carreteras a nivel de red. | Compleja. | Los resultados no son transportables ni estables en el tiempo, pues dependen de la dinámica particular del movimiento del vehículo. |
| Perfilómetro Inercial | Muy alto | Monitoreo de carreteras a nivel de redes y recepción de proyectos viales. | Muy Compleja. | Equipo de alta precisión, cuyos resultados son transportables y estables en el tiempo. Su principal uso es la evaluación de redes viales grandes. |

FUENTE: (Badilla Vargas, Elizondo Arrieta, & Barrantes Jiménez, 2008, pág. 25)

1.1.1.2 Aplicación de resultados al cálculo del IRI

Sin embargo en su medición, como lo indican (Badilla Vargas, Elizondo Arrieta, & Barrantes Jiménez, 2008, pág. 17), es importante “considerar los siguientes requisitos:

- El IRI es calculado a partir de un solo perfil a lo largo de una de las huellas de las llantas de un vehículo. El intervalo de muestreo del perfil debe ser no mayor a 300 mm para cálculos precisos. La resolución requerida depende del nivel de regularidad, necesiéndose resoluciones más finas para pavimentos más lisos. Una resolución de 0.5mm en la obtención del perfil es apropiada para todas las condiciones.
- Se considera que, entre puntos de elevación aledaños, el perfil tiene una pendiente constante.
- El perfil es primero suavizado mediante el uso de medias móviles cuyo largo base es de 250mm. Esto se realiza con el fin de simular el comportamiento de la envolvente de los neumáticos y reducir la sensibilidad de la simulación del cuarto de carro al espaciado de muestreo del perfil longitudinal.
- El perfil suavizado es filtrado utilizando la simulación del cuarto de carro, con parámetros específicos, a una velocidad de 80 Km/h.
- El movimiento de la suspensión simulada es acumulada y dividida por el largo del perfil para así obtener el valor de IRI; es de ésta forma que el IRI es expresado generalmente en unidades de mm/m o m/Km”.

Luego, el IRI se define como una propiedad de un solo perfil longitudinal, por lo tanto, si se desea establecer un valor por pista se deben establecer criterios de cuántos perfiles tomar, donde comúnmente se toman los perfiles en ambas huellas de las llantas de un vehículo para así derivar un valor por carril. Depende de la longitud L, pues con longitudes muy grandes no se identifican niveles altos de irregularidad superficial en los pavimentos y con longitudes muy pequeñas se pueden detectar altos niveles de irregularidad, obteniendo pavimentos con mejores niveles de seguridad y confort.

El Instituto Nacional de Vías establece como longitud L el Hectómetro y determina al IRI a partir de los desplazamientos verticales de las masas no suspendidas del cuarto de carro, u, y de los desplazamientos verticales de las masas suspendidas del cuarto de carro, v, como se muestra a continuación (INVIAS, 2013, pág. 81):

$$I_I = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{u}{x} - \frac{v}{x} \right|$$

Donde, x es el intervalo de análisis fijado y debido a que el IRI se podría considerar como unidad adimensional, se acostumbra a multiplicar por 1000 y a expresar en m/Km (dm/hm).

Considerando el valor absoluto $\left| \frac{u}{x} - \frac{v}{x} \right|$ sería igual a $z'_2 - z'_1$ y se denomina pendiente rectificada del perfil filtrado, luego el IRI en la longitud de evaluación, cuando se analiza en n puntos, de forma discreta estará dado por (INVIAS, 2013, pág. 81):

$$I_l = \frac{\sum |z_2 - z_1|}{n}$$

Sin embargo, si se quiere calcular de forma continua, la expresión de cálculo del IRI es:

$$I_l = \frac{1}{L} \int_0^L |z_2 - z_1| d$$

3.2.3.2 Escala de valores del IRI

De acuerdo a la recopilación de información de investigaciones hechas anteriormente, se tienen los siguientes valores típicos del IRI:

FIGURA 6. Escala de valores del IRI y características de los pavimentos.

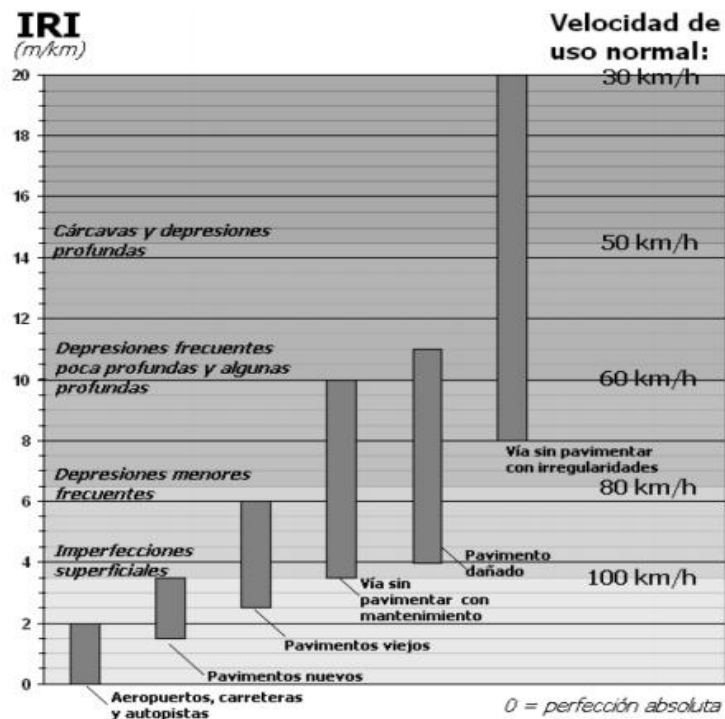


Figura 7. Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías (Adaptado de UMTRI Research Review, Vol. 33. Número 1. Enero-febrero 2002).

Fuente: (UCR, 2014, pág. 18)

| Tránsito Diario Promedio Anual (TPDA) | Indice Internacional de Rugosidad, IRI (m/km) | | | | | | |
|---------------------------------------|---|-------|----------------|-------|-----------------|---------|------|
| | 0 – 2 | 2 – 4 | 4 – 6 | 6 – 8 | 8 - 10 | 10 – 12 | > 12 |
| 0 – 4 999 | <i>Muy bueno</i> | | <i>Bueno</i> | | | | |
| 5 000 – 9 999 | | | <i>Regular</i> | | <i>Malo</i> | | |
| 10 000 – 19 999 | | | | | <i>Muy malo</i> | | |
| > 20 000 | | | | | | | |

Figura 8. Valores recomendables del IRI según el tránsito Diario Promedio Anual (TPDA)

Fuente: Recomendaciones del Transportation Research Board (TBR) para la selección de valores máximos admisibles de IRI en función del TPDA. (Lavaud, 2011, pág. 7)

De acuerdo a la condición funcional es posible clasificar un tramo como se muestra en la figura 9:



Figura 9. Clasificación de un tramo según su condición funcional – Regularidad de la superficie

Fuente: Evaluación de Corredores Viales de Mantenimiento Integral (INVIAS , 2014)

Luego el estado del pavimento se puede establecer dentro de la siguiente escala:

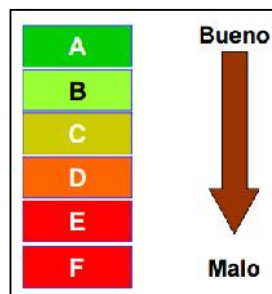


Figura 10. Clasificación de condición estructural y funcional del pavimento

Fuente: Evaluación de Corredores Viales de Mantenimiento Integral (INVIAS , 2014)

Considerando a Barrantes, Badilla y Sibaja se tiene un cuadro resumen de los rangos y valores característicos de IRI en función del PSI teniendo en cuenta la norma AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) que se muestra en la Tabla 5. (Barrantes Jiménez, Badilla Vargas , & Sibaja Obando , 2009, pág. 117)

Tabla 6. Rangos y Valores Característicos de IRI en función del PSI

| Pavimentos Flexibles Modelo de (AASHO) | | | Pavimentos Flexibles Modelo de (AASHO) | | | Calificación | Descripción AASHO |
|--|----------------|---------------|--|----------------|---------------|--------------|---|
| Valores de PSI | Valores de IRI | Rangos de IRI | Valores de PSI | Valores de IRI | Rangos de IRI | | |
| 5 | 0 | 0 - 1.0 | 5 | 0 | 0 - 1.4 | Muy Buena | Sólo los pavimentos nuevos (o casi nuevos) son los suficientemente suaves y sin deterioro para clasificar en esta categoría. La mayor parte de los pavimentos construidos o recarpeteados durante el año de inspección, normalmente se clasificaría como buenos. |
| 4.2 | 0.8 | | 4.5 | 0.97 | | | |
| 4 | 1 | | 4 | 1.4 | | | |
| 3 | 1.9 | 1.0 - 1.9 | 3 | 2.3 | 1.4 - 2.3 | Buena | Los pavimentos de esta categoría si bien no son tan buenos como los "Muy buenos", entregan un manejo de primera clase o muestran muy poco o ningún signo de deterioro superficial. Los pavimentos flexibles pueden estar empezando a mostrar evidencias de un leve deterioro superficial, como desprendimientos y fisuras menores. |
| 2.5 | 2.6 | 1.9 - 3.6 | 2.5 | 2.9 | 2.3 - 3.6 | Regular | En esta categoría la calidad de manejo es notablemente inferior a los de los pavimentos nuevos y pueden presentar problemas para altas velocidades de tránsito. Los defectos superficiales pueden incluir ahuellamiento, parches, agrietamientos. Los pavimentos rígidos en este grupo pueden presentar fallas en las juntas, agrietamiento, escalonamiento y bombeo de finos. |
| 2 | 3.6 | | 2 | 3.6 | | | |
| 1.5 | 4.9 | 3.6 - 6.4 | 1.5 | 4.6 | 3.6 - 6.0 | Mala | Los pavimentos en esta categoría se han deteriorado hasta un punto donde pueden afectar la velocidad de tránsito de flujo libre. Los pavimentos libres pueden tener grandes baches y grietas profundas; el deterioro incluye pérdida de áridos, agrietamientos, ahuellamientos y ocurre en un 50% o más de la superficie. El deterioro en pavimentos rígidos incluye desconches de juntas, escalonamiento, parches, agrietamiento y bombeo. |
| 1 | 6.4 | | 1 | 6 | | | |
| 0 | 9.5 | >6.4 | 0 | 11.2 | >6.0 | Muy Mala | Los pavimentos en esta categoría se encuentran en una situación de extremo deterioro. Los caminos pueden pasar a velocidades reducidas y considerables problemas de manejo. Existen grandes baches y grietas profundas. El deterioro ocurre en un 75% o más de la superficie. |

FUENTE: (Barrantes Jiménez, Badilla Vargas , & Sibaja Obando , 2009, pág. 117)

Lavaud de acuerdo a estudios realizados en los últimos años, resume los factores en los que influye durante la construcción de un pavimento como (Lavaud, 2011, págs. 1-2):

-) Incide en la vida útil del pavimento pues si se reduce el IRI inicial en un 50%, se incrementa la vida útil del pavimento en 27%.
-) El costo de mantenimiento vial ya que se reduce considerablemente en pavimentos con un IRI inicial de 1,2 m/km.
-) En la percepción del confort de los usuarios de acuerdo a las vibraciones percibidas por los conductores y pasajeros.
-) En el nivel de ruido dentro y fuera de los autos.
-) En los accidentes de tránsito ya que hay un incremento de 1,6 veces situaciones de accidentalidad cuando el IRI pasa de 1,56 m/km a un rango de 1,61 a 3,20 m/km.
-) En la resistencia al rodamiento de un pavimento ya que por unidad de IRI se incrementa en un rango de 3 a 6%.
-) En el consumo de combustible, pues por el incremento de cada unidad de IRI, aumenta de 0.6 a 2.5%.
-) En los costos de operación de los autos, pues éstos aumentan 3% para vehículos y 5.5% para camiones por el incremento de cada unidad de IRI.

3.3 COSTOS AMBIENTALES DEL RUIDO VEHICULAR

A continuación, se muestran los diferentes métodos de valoración económica de los costos ambientales.

3.3.1. Metodologías para la valoración económica

MÉTODO DE GASTO EN MITIGACIÓN. Método indirecto que basándose en el dinero que las personas están dispuestas a pagar para prevenir y/o mitigar los impactos ambientales negativos a los que están expuestos, infiere el gasto que implica el soportar el factor o bien ambiental afectado (Osorio Múnera & Correa Restrepo, 2004, pág. 173). Sin embargo, dicho método considera únicamente el efecto mitigante, más no efectos secundarios que las medidas de prevención y/o mitigación puedan generar al individuo. Luego, se debe considerar que el individuo únicamente realizará el gasto en mitigación cuando el beneficio proporcionado por ésta sea mayor al costo relacionado a la implementación de la medida de prevención y/o mitigación. Por lo tanto, éste método, en resumen, mide y compara todos los beneficios y costos del soporte del factor ambiental afectado. Así:

$$N - N' = E$$

Donde:

N = Grado original del daño ambiental

N' = Grado reducido al daño

E = Gastos de reducción o prevención del daño (Roa, Torres, Chaparro, & Cristancho, 2009)

Luego, éste método es el mismo análisis de costo-beneficio que se considera como la principal herramienta para la evaluación económica de los proyectos públicos destinados al manejo de los recursos naturales y aunque en menor medida, también se encuentra difundido en el control de la contaminación ambiental. (Comunidad Andina, 2007, pág. 41)

Para aplicar éste método, se debe inicialmente identificar el atributo ambiental a valorar y las medidas de mitigación que utilizan los individuos para la protección de los efectos ambientales negativos y finalmente se estiman los costos para la implementación de dichas medidas de prevención y/o mitigación, sin embargo, cuando no existen información observable, se estiman posibles medidas mitigadores y sus respectivos costos en los que pueden incurrir los individuos interesados en la prevención y/o protección de los daños ambientales generados por la actividad fuente de la contaminación.

De acuerdo a la conceptualización dada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Minambiente, 2003) se infiere que en éste caso se estaría asumiendo que el precio en el mercado del bien medirá el valor económico de dicho bien; sin embargo, el precio lo que realmente muestra es la mínima cantidad que el individuo está dispuesto a pagar, lo que indica que muchos individuos están dispuestos a pagar una cuantía mayor al precio, por lo tanto es necesario determinar el beneficio económico neto que se considera como la diferencia entre la disponibilidad a pagar del individuo y lo que efectivamente paga, denominada el excedente del consumidor. Luego, entre más amplio sea el excedente, mayor es el nivel de bienestar que está obteniendo implícitamente el individuo. Luego, gráficamente se puede observar como el área bajo la curva de demanda del bien (área sombreada), por encima del precio de mercado de dicho bien (P+), mostrado en la FIGURA 11.

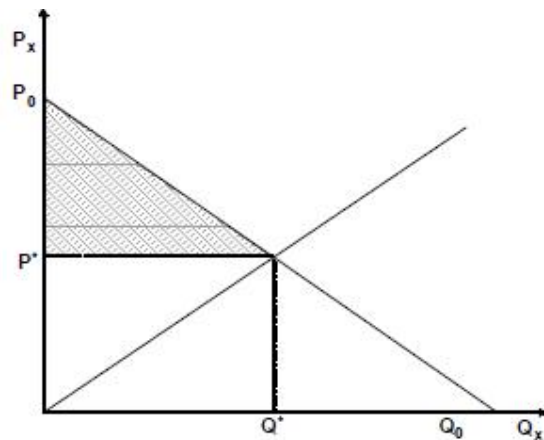


Figura 11. Excedente del Consumidor

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Metodologías para la Valoración Económica de Bienes, Servicios Ambientales y Recursos Naturales. Grupo de Análisis Económico. Resolución 1478 de diciembre 2003. (Minambiente, 2003, pág. 5)

Ahora, si los productores reciben un precio mayor que su mínima disponibilidad a aceptar, la diferencia entre tales valores constituye el excedente del producto que gráficamente se observa como el área (área sombreada) encontrada por encima de la curva de oferta y por debajo del precio de mercado (P_+), que se observa en la figura 12.

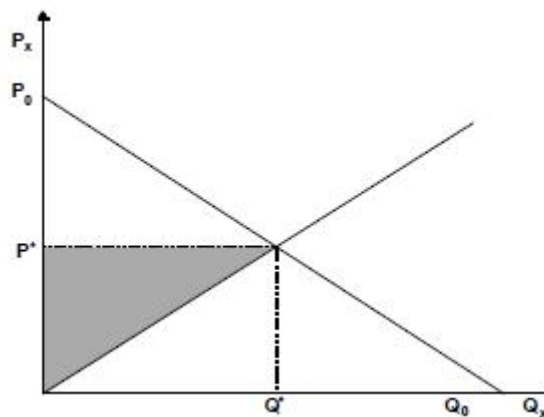


Figura 12. Excedente del Productor

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Metodologías para la Valoración Económica de Bienes, Servicios Ambientales y Recursos Naturales. Grupo de Análisis Económico. Resolución 1478 de diciembre 2003. (Minambiente, 2003, pág. 6)

Luego, la generación de excedentes indica que las medidas de prevención y/o mitigación implicarían beneficios para unos individuos y costos para otros. Así, para

presentar los cambios en el bienestar se debe hacer una discriminación en sectores de personas, de acuerdo a la disminución o aumento del bienestar.

Finalmente, se debe considerar que el método de gastos de mitigación tiene algunas limitaciones como la subestimación del valor del impacto ambiental que dicha metodología entrega por la falta de disposición a pagar para prevenir el daño ambiental, la restricción de la estimación del valor dada por la capacidad de pago de la población en riesgo, el supuesto de que no hay beneficios secundarios, la falta de percepción de la población total a la mitigación del daño ambiental, cuando ésta se aplica en forma muy rápida o el análisis del resultado se realiza cuando la medida de mitigación ha sido aplicada recientemente.

OTROS MÉTODOS DE VALORACIÓN ECONÓMICA DE COSTOS AMBIENTALES:

existen diversos métodos de valoración económica de costos ambientales como el Método de Costos de Reposición, que se refiere a una aproximación del valor que se le da al bien afectado, a partir del gasto generado por la restauración y devolución al estado original del sistema ambiental alterado; Método de Estimación del Cambio en Productividad, en donde a partir del efecto que el impacto ambiental genera a la producción, se experimenta un cambio en el bienestar de las personas que al ser valorado puede dar una estimación del valor de ese impacto ambiental. Método de análisis de cambios en la tasa de Morbilidad, el cual se refiere a los efectos sobre la salud asociado al impacto ambiental; Método de Valoración Contingente, este método busca determinar el valor económico que las personas otorgan a los cambios en el bienestar derivados de una modificación en la oferta de un bien ambiental. Método de Transferencia de Beneficios, consiste en la utilización de los valores monetarios de bienes ambientales estimados en un contexto determinado para estimar los beneficios de un bien similar bajo contexto diferente, del cual se desconoce su valor. Método de Costo de Viaje, consiste en una aproximación al valor del recurso natural a partir de los gastos necesarios para disfrutar el bien ambiental, normalmente asociados al desplazamiento; y finalmente el Método de Costos Evitados, Consiste en determinar los costos de prevención y/o mitigación de los problemas que el recurso natural a valorar evita a la sociedad. (Osorio Múnera & Correa Restrepo, 2004)

3.3.2. Medidas de mitigación contaminación acústica

3.3.2.1 Barreras de ruido

Las barreras anti ruido pueden definirse como “un obstáculo que, por su situación y/o características, protege del ruido proveniente de una fuente sonora a un determinado receptor, dificultando de alguna manera la transmisión del sonido”

(Serrano Pérez, Abad Toribio, Magro Andrade, & García Martín, 2009, pág. 26). Las barreras de ruido o pantallas acústicas son estructuras verticales lineales,

apoyadas por acción de la gravedad sobre el suelo y cuya altura es considerablemente mayor a su espesor; se ubican justo en medio de un foco generador de ruido y un receptor, ya que, su objetivo principal es comportarse como obstáculo que difracte las ondas sonoras provenientes del foco que atenúe los niveles de ruido a los que está expuesto el receptor.



Figura 13. Barrera acústica para vías
Fuente: Ingeniería Acústica (Domingo, 2013)

La reducción en el nivel de ruido por la barrera dependerá de la distancia a la que sea dispuesta (se recomienda que la barrera acústica cubra un ángulo de 160° o tener una proporción de 4 veces entre la distancia receptor-barrera y la perpendicular entre receptor-borde lateral de barrera), y de su diseño; es decir, de sus dimensiones y del material con el cual sea fabricada.

La OCDE sugiere algunos criterios para el diseño de una pantalla acústica, dentro de sus apartes considera que una pantalla generalmente reduce los niveles de ruido de 10 a 15 dB(A) en la zona de sombra, de igual forma considera que el rendimiento estructural y la durabilidad debe considerarse generalmente de 15 a 20 años. En la siguiente tabla se muestran las consideraciones a tener en cuenta.

Tabla 7. Principales criterios para el diseño de una pantalla acústica

| Principales criterios para el diseño de una pantalla acústica |
|---|
| <i>Consideraciones acústicas</i> |
| <p>Las cualidades de atenuación del ruido, es decir la eficiencia acústica de la pantalla en términos de reducción de frecuencias y de intensidad sonora, son:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Una pantalla anti-ruido reduce generalmente los niveles de ruido de 10 a 15 dB(A) en la zona de sombra. ▪ Una pantalla anti-ruido proporciona una reducción del nivel de ruido insignificante cuando ésta no es lo suficientemente alta para cortar la línea visual entre la calzada ▪ Al otro lado de esta línea visual para cada metro de altura suplementaría de la pantalla, se obtiene una reducción del nivel de ruido aproximadamente 1.5 dB(A) (con un máximo teórico de 20 dB(A) para el total) ▪ La longitud de una pantalla anti-ruido debe ser aproximadamente cuatro veces la distancia entre el receptor y la pantalla (para receptores situados a menos de 100m) ▪ Una pantalla anti-ruido debe tener una densidad mínima de 20 kg/m². |
| <i>Consideraciones no acústicas</i> |
| <p>En el diseño de la pantalla es necesario tener en cuenta:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ La estética que debe estar en concordancia con su entorno ▪ La seguridad vial: garantiza una buena visibilidad para los automóviles y una buena resistencia a los choques de los vehículos ▪ El mantenimiento (y los costos del mismo) de la pantalla y estructuras adyacentes y las necesidades de drenaje. ▪ El rendimiento estructural (acciones del viento y del tráfico, estabilidad a largo plazo) y la durabilidad (generalmente de 15 a 20 años); ▪ Los costes de construcción que dependen del tipo de cimentación necesaria del sistema de construcción en presencia o no del tráfico. |

Fuente. Reducción del ruido en el entorno de las carreteras (OCDE y MOPTMA , 1995, pág. 126)

) PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE UNA BARRERA ACÚSTICA

Cuando no existe un obstáculo que se interponga entre el foco de ruido y el receptor, la trayectoria de la onda sonora es recta y por lo tanto los niveles de contaminación a los que está expuesta la población cercana a la vía resultan ser considerablemente altos; pero si se interpone una barrea acústica, este camino se ve alterado, y la energía se re-distribuye de la siguiente manera:

Tabla 8. Funcionamiento de una barrera acústica

| ENERGÍA TRANSMITIDA A TRAVÉS DE LA BARRERA | ENERGÍA DIFRACTADA POR LOS EXTREMOS DE LA BARRERA | ENERGÍA REFLEJADA POR LA BARRERA | ENERGÍA ABSORBIDA POR LA BARRERA |
|--|--|---|---|
| <p>La energía transmitida por la barrera es la que consigue pasar a través de su estructura. Esta situación se produce cuando la masa superficial de la barrera es muy baja, o también cuando esta presenta agujeros o rendijas por donde el sonido puede pasar con facilidad.</p> | <p>La parte superior de la barrera tiene una importancia destacable a la hora de controlar el fenómeno de difracción de la onda acústica que se produce sobre la arista de la barrera.</p> | <p>El fenómeno de reflexión se produce cuando la energía acústica choca sobre la superficie de la barrera. Normalmente las barreras acústicas están hechas de materiales duros y mecánicamente resistentes, que facilitan ese fenómeno.</p> | <p>Una barrera acústica eficiente, dispone de una superficie con absorbente orientada siempre hacia el foco de ruido, para minimizar el efecto de reflexión. Esta mejora se traduce rápidamente en un mayor rendimiento efectivo.</p> |

Fuente. Adaptación propia tomada de Acústica Medioambiental Vol.II. (Domingo, 2013, págs. 531-532)

El fenómeno de difracción del sonido disminuye el efecto de protección de la barrera, por esta razón, en realidad la atenuación que se consigue depende directamente de la frecuencia con la que el foco de contaminación emite la onda sonora; para frecuencias bajas, la altura de la barrera es mucho menor que la longitud de onda y debido a esto la sombra acústica se hace pequeña.



Figura 14. Dependencia de la zona de sombra acústica con la frecuencia
Fuente: Acústica Medioambiental (Domingo, 2013, pág. 535)

Generalmente, suele ser suficiente que la pantalla aporte un índice de aislamiento del orden de 25 a 26 dBA para el espectro de ruido de carretera normalizado o del tráfico que circule por la infraestructura viaria. En efecto, se considera que la energía sonora transmitida a través de la pantalla es despreciable cuando su nivel de presión sonora es inferior en 10 dBA al nivel sonoro resultante que llega al receptor por otros caminos (difractado, directo, etc.) y, dado que actualmente la eficacia máxima de las pantallas acústicas es raramente superior a 15 o 16 dBA, bastará con asegurar unas pérdidas por transmisión del orden indicado, de 25 a 26 dBA (Marrades, 2008).

Tabla 9. Clasificación Barreras Acústicas en Proyectos de Infraestructura de Transporte

| TIPOS DE PANTALLA ACÚSTICA | DESCRIPCIÓN | MATERIALES | CARACTERÍSTICAS | VENTAJAS | USO HABITUAL | PRECAUCIONES ANTE SU PRESCRIPCIÓN. |
|----------------------------|--|---------------|---|--|---|--|
| REFLECTANTES | Pantallas con un índice de absorción muy bajo. | | | | | |
| ABSORBENTES | Pantallas con un índice de absorción considerable. | HORMIGÓN | Elementos prefabricados a base de hormigón armado con diferentes formas y relieves. Pueden tener forma plana o curva y están constituidos por una placa de hormigón armado (aislantes) sobre la cual se encuentra una placa de hormigón poroso (absorbente). Posee índice de absorción de 4 a 5 dBA | <ul style="list-style-type: none"> *Buen Aislamiento. * Fácil Mantenimiento * Gran durabilidad. | <ul style="list-style-type: none"> *Zonas de gran estabilidad de suelocimentación. * Requerimiento de gran durabilidad (>20 años) | <ul style="list-style-type: none"> *Imagen de obstáculo pétreo. * No demasiada absorción. *Obstaculización de la visión. * Mucha rigidez a impacto vehículo. |
| ABSORBENTES | | METÁLICAS | Constituidas por paneles modulares metálicos con un material absorbente acústico en su interior. Los paneles modulares tienen la doble función de aislamiento y absorción acústica. Posee Índice de absorción de 13 a 14 dBA | <ul style="list-style-type: none"> *Poca Reflexión * Gran Ligereza * Fácil Mantenimiento y Reposición * Buen comportamiento a impacto de vehículo * Posibilidad de colores y plasticidad. | <ul style="list-style-type: none"> *Tablero puentes y zonas altas taludes. * Si viviendas margen contrario y ubicación cercana a carriles de circulación. * Pantallas de gran altura. | <ul style="list-style-type: none"> *Poca resistencia al vandalismo * Vida media moderada (15 - 20 años) *Obstaculización de la visión. |
| ABSORBENTES | | MADERA | Constituidas por una carcasa ciega de madera que alberga unas planchas de lana mineral y un enrejado de protección. Posee índice de absorción por encima de 8dBA | <ul style="list-style-type: none"> *Posibilidad de alta absorción *Gran integración en medio ambiente * Buenas posibilidades estéticas. | <ul style="list-style-type: none"> *Zonas de integración específica con el entorno. | <ul style="list-style-type: none"> *Costoso mantenimiento *Alta sensibilidad al vandalismo *Analizar riesgo de fuego |
| ABSORBENTES | | TRANSPARENTES | Pantallas reflectantes que emplean para su construcción planchas de policarbonato, polimetacrilato PMMA o vidrio. Posee un índice de absorción por encima de 25 dBA | <ul style="list-style-type: none"> *Buen aislamiento *Gran permeabilidad visual *Fácil Integración * Buena apariencia estética * Posibilidad de curvar | <ul style="list-style-type: none"> *Tableros, puentes y zonas altas de taludes. *Ubicación cercana a viviendas sin otras en frente * Partes altas de otro tipo de pantallas. | <ul style="list-style-type: none"> *Reflecta sonido al margen contrario. *Vida media moderada (15 - 20 años) *Analizar riesgo de accidentes para la fauna * Analizar riesgo por el impacto de vehículos. * Considerable sensibilidad al vandalismo * Analizar riesgo de fuego. |
| BENTES | | JARDINERÍA | Constituidas por elementos auto-portantes prefabricados de hormigón, cerámica o madera tratada, que una vez instalados habilitan unos huecos que finalmente se rellenan de tierra o grava de diferente calibre y permiten la plantación de diferentes especies vegetales, sin embargo se debe considerar la climatología y costo de mantenimiento. Posee un bajo grado de absorción | <ul style="list-style-type: none"> *Generalmente estético | <ul style="list-style-type: none"> *Viviendas de ubicación cercana a vías de circulación. | |

Fuente: Adecuación propia tomado de (Alegre & Domínguez, s.f.)

3.3.2.2 Mantenimiento vial

El mantenimiento vial es otra de las alternativas de mitigación de contaminación acústica por el tráfico vehicular, pues con éste se busca cambiar el IRI y reducir la contaminación dada por tal factor.

El pavimento luego de su construcción presenta un muy buen estado y satisface con plenitud a los usuarios. Con el paso del tiempo, y de la acción conjunta del tránsito y el clima, empieza un desgaste, lento y poco visible pero constante, donde el pavimento va debilitándose. En esta etapa, que se mantiene por varios años, el pavimento presenta un buen estado hasta que aparecen los primeros indicadores de deterioro.

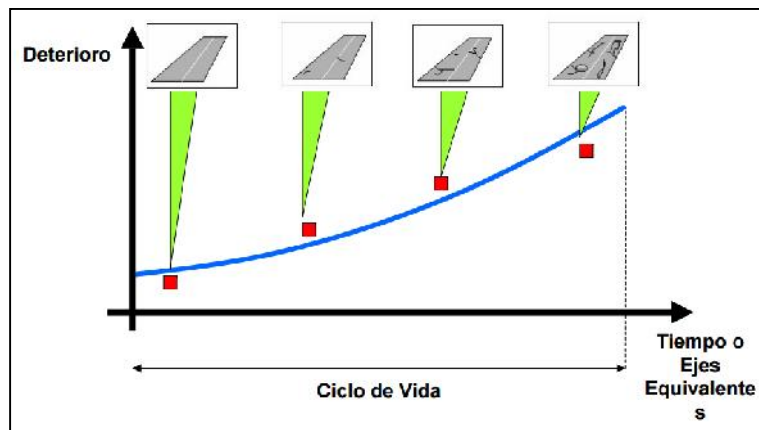


Figura 15. Ciclo de vida de un pavimento

Fuente: Evaluación de Corredores Viales de Mantenimiento Integral (INVIAS , 2014)

Las obras de mantenimiento periódico u obras de rehabilitación necesarias para que la vía ofrezca condiciones adecuadas de servicio pueden ser:

-) Recuperación de pavimentos
-) Re-nivelación
-) Tratamientos superficiales
-) Reconstrucción de terraplenes
-) Rehabilitación de bases
-) Reconstrucción de carpetas
-) Riegos de sello

Una vez culminadas una o varias de estas actividades es posible obtener un mejoramiento significativo en la respuesta estructural y funcional de la vía.



Figura 16. Situación idealizada de mantenimiento integral
Fuente: Evaluación de Corredores Viales de Mantenimiento Integral (INVIAS , 2014)

En cuanto a los periodos de diseño y rehabilitación de la vías, El INVIAS presenta una tabla en donde muestra los períodos de diseño que se proponen para el diseño de las obras iniciales de rehabilitación de los pavimentos asfálticos de la red vial nacional, adaptando en ella la clasificación vial establecida en las “Especificaciones generales de construcción de carreteras” del INVIAS y teniendo en cuenta, además, el hecho de que la entidad administra en la actualidad la red carretera terciaria del país. (INVIAS, 2013, pág. 12)

Tabla 10. Períodos de diseño de las obras de rehabilitación de los pavimentos asfálticos de las carreteras nacionales

| ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN | CATEGORÍA DEL TRÁNSITO | | |
|-------------------------------|---|---|---|
| | NT1 | NT2 | NT3 |
| | Caminos rurales con tránsito medio y bajo | Colectoras interurbanas, caminos rurales e industriales principales | Autopistas interurbanas, caminos interurbanos principales |
| | NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES DE 80 kN EN EL CARRIL DE DISEÑO DURANTE EL PERÍODO DE DISEÑO DE LAS OBRAS DE REHABILITACIÓN | | |
| | < 0.5*10 ⁶ | 0.5*10 ⁶ – 5*10 ⁶ | > 5*10 ⁶ |
| PERÍODO DE DISEÑO (años) | | | |
| Restauración | Depende de las técnicas de intervención | | |
| Refuerzo | 8 | 10 | 12 |
| Reciclado | 10 | 15 | 20 |
| Reconstrucción | 10 | 15 | 20 |

Fuente: Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras (INVIAS, 2013, pág. 12)

Finalmente se representa a través de la siguiente gráfica, el nivel de IRI que se reducirá luego de invertir en la ejecución de obras de mantenimiento vial.

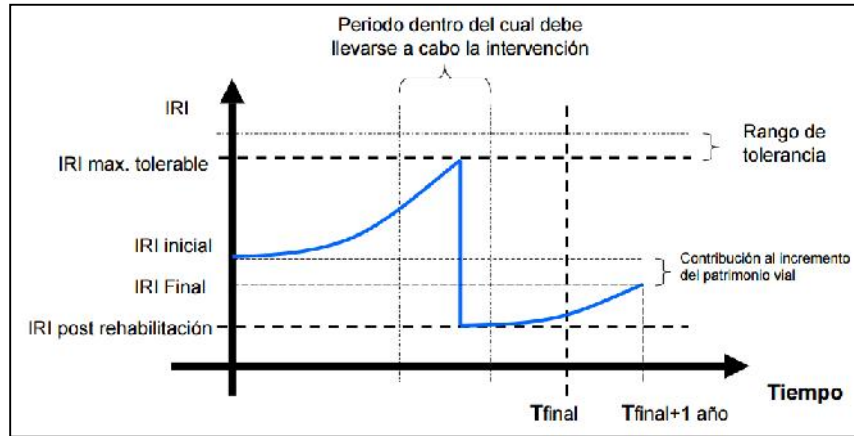


Figura 17. Esquema general para mantenimiento integral
Fuente: Evaluación de Corredores Viales de Mantenimiento Integral (INVIAS , 2014)

Un ejemplo numérico resulta ser más claro y apropiado:

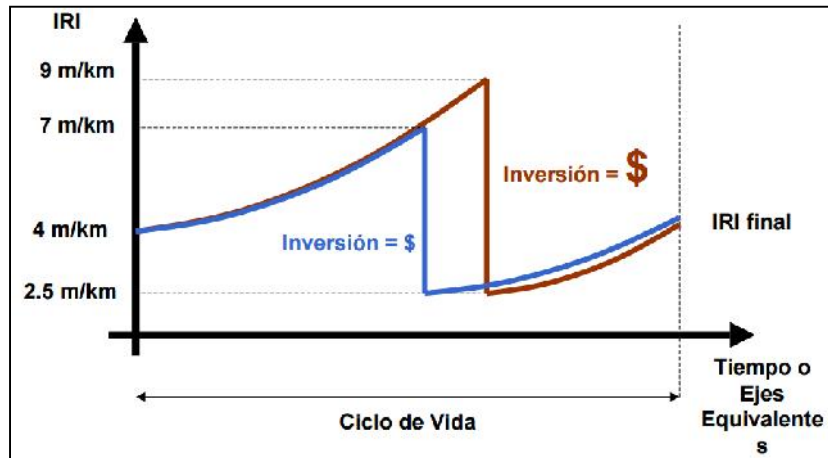


Figura 18. Consecuencias de una intervención
Fuente: Evaluación de Corredores Viales de Mantenimiento Integral (INVIAS , 2014)

Tomando como referencia la escala mostrada, se puede hacer una buena aproximación del mejoramiento del nivel del IRI, en dado caso de implementar obras de mantenimiento vial en los sectores de interés. Teniendo en cuenta a los tramos catalogados como IRI malos, podría decirse que con una buena inversión podría reducirse este valor de **6 a 2.5** y para tramos regulares podría pasarse de **4 a 2.5**.

Según el Banco Mundial (1997), el uso de asfalto nivelado abierto puede ser eficiente en reducir el ruido de vías/neumático en áreas sensibles. Generalmente, las superficies suaves y bien mantenidas, tales como el asfalto recientemente colocado sin estrías o fracturas, van a mantener el ruido en un mínimo (GTZ, 2000, pág. 14).

Con la intención de mejorar en 2 o 3 puntos el nivel de IRI para zonas de estudio, realizar obras de mantenimiento vial integradas por las siguientes actividades: fresado, imprimación y sobre-carpeta asfáltica, es una buena metodología para cumplir con tal objeto; luego cada actividad es descrita a continuación.

FRESADO: De acuerdo al INVIAS, éste paso consiste en la molienda, hecha comúnmente en frío, de la parte superior de un pavimento para corregir sus perfiles tanto transversales como longitudinales, a partir de la remoción de abultamientos, baches, excesos de asfalto y demás imperfecciones que pueda poseer la capa de rodadura, proporcionando una superficie de macro-textura rugosa con una alta resistencia al deslizamiento. Es de considerar que alternativamente existe otro procedimiento denominado “microfresado” el cual consiste en eliminar los puntos altos de la superficie sin tener que hacer un recrecimiento del espesor, corrigiendo algunos de los defectos de regularidad superficial presentados en la capa de rodadura (INVIAS, 2013, pág. 266).

A partir de las especificaciones dadas por el INVIAS (INVIAS , 2012, págs. art. 460, 1-3) el fresado debe realizarse considerando las cotas y espesores indicados en los documentos del proyecto e instrucciones del interventor y es ejecutado de acuerdo al siguiente procedimiento:

- ✓ Preparación de la Superficie Existente: Realización de operaciones de barrido y/o soplado para obtener una superficie de pavimento limpia.
- ✓ Fresado del Pavimento: A partir de una máquina fresadora sobre el área y espesor aprobado por el interventor a temperatura ambiente, sin aditivos que puedan afectar la granulometría de los agregados o propiedades del asfalto existente; debiendo quedar una superficie nivelada y sin fracturas.

IMPRIMACIÓN: Teniendo la base preparada, se debe colocar una capa de imprimación que consiste de acuerdo al INVIAS en “el suministro, transporte eventual calentamiento y aplicación uniforme de una emulsión asfáltica o un asfalto líquido sobre una superficie granular terminada, previamente a la extensión de una

capa asfáltica o un tratamiento bituminoso”. Así, se debe seguir el procedimiento indicado a continuación por el INVIAS (INVIAS , 2012, pág. art. 420):

- ✓ Preparación de la superficie existente: La superficie sobre la cual se efectúa la aplicación debe cumplir con todos los requisitos especificados en cuanto a conformación, compactación y acabado de la capa granular a la cual corresponda. Además, debe considerarse que la capa granular sobre la cual se va a aplicar la emulsión no debe tener exceso de humedad, correspondiendo a una cercana a la óptima de compactación, encontrándose de forma ideal dos puntos de porcentaje por debajo de la misma.
- ✓ Determinación de la dosificación del ligante: Considerando el tipo de producto bituminoso, sistema de aplicación y características superficiales de la capa granular por imprimir se establece una dosificación definitiva del ligante, la cual corresponderá a la que sea capaz de absorber la capa que se imprima en un intervalo de tiempo de veinticuatro (24) horas, logrando una penetración de mínimo 5 mm.
- ✓ Aplicación ligante bituminoso: Previamente al riego de imprimación, se debe humedecer la superficie moderadamente mediante un rociado ligero y de una manera suave y uniforme se aplicará el ligante evitando los traslapos en las juntas transversales que pueden generar una dosificación excesiva de imprimante, con ayuda de la colocación de tiras de papel u otro material en las zonas de iniciación o terminación del trabajo. Seguidamente se aplicará el producto asfáltico mediante el carro-tanque irrigador de una forma uniforme y constante, sin que se vea afectado por la carga, la pendiente de la vía o la dirección del vehículo.
- ✓ Determinación de la dosificación del agregado de protección: Se determina considerando la dosificación mínima necesaria para absorber los excesos de ligante o para garantizar la protección de la imprimación, cuando la capa imprimada deba soportar la acción de tránsito automotor. Sin embargo, no debe exceder los seis litros por metro cuadrado (6l/m²).
- ✓ Extensión del agregado de protección: Se realiza de acuerdo a instrucción del interventor en situaciones cuando se debe permitir la circulación del tránsito automotor sobre la imprimación o cuando parte de ella no ha sido absorbida veinticuatro horas (24h) después de aplicado el ligante.
- ✓ Control del tránsito: Se controlará la circulación de cualquier tipo de tránsito sobre la superficie imprimada mientras no haya sido absorbido todo el ligante o, en caso de que se haya extendido el agregado de protección, dentro de las cuatro horas (4h) siguientes a la aplicación de éste. Sin embargo, si se permite la circulación, la velocidad de los vehículos no deben exceder de treinta kilómetros por hora (30 km/h).

CARPETA ASFÁLTICA: De acuerdo al INVIAS (INVIAS , 2012, págs. art. 450, 17,19), el proceso para la colocación del pavimento asfáltico consiste en:

- ✓ Preparación de la superficie existente: Consiste en comprobar que la superficie sobre la cual se va a colocar la mezcla asfáltica tenga la densidad apropiada y las cotas indicadas en los planos o definidas por el interventor.
- ✓ Extensión de la mezcla: Realizarla con la mayor continuidad posible y debe regularse con el fin de que no haya segregación y la capa extendida resulta lisa y uniforme.
- ✓ Compactación de la mezcla: Se realizará después de extendida la mezcla, de forma longitudinal continua y sistemáticamente, a la temperatura de la mezcla más alta posible con que ella pueda soportar la carga a que se somete.

4. METODOLOGÍA Y TRABAJO DE CAMPO

4.1 MATERIALES Y EQUIPOS

Los materiales y equipos utilizados en el proyecto se presentan a continuación según el objeto de las mediciones.

) **Medición de índice de rugosidad**

Los siguientes equipos empleados son:

-Nivel de Precisión: se utilizó un nivel de precisión con trípode como se muestra en la figura 19 a)

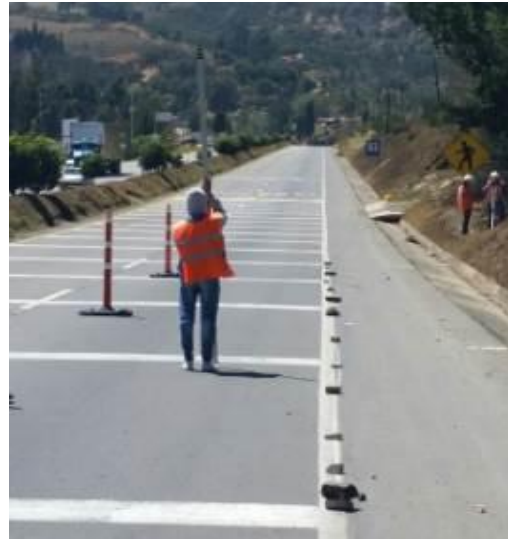


Figura 19. Imágenes de uso de equipos a) Nivel de precisión, b) Mira de aluminio y cinta métrica.

Fuente: Elaboración propia.

-Mira: se usó mira de aluminio de 5 metros de longitud y precisión al milímetro.

-Cinta Métrica: se utilizó cinta métrica de fibra con longitud de 30metros.

) **Medición de niveles de ruido**

- Sonómetro digital versión 1.2 marca Extech, modelo HD600 y *software model HD600*, el cual fue facilitado por la Escuela de Transportes y Vías de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Este equipo, de acuerdo con las especificaciones del fabricante, se clasifica como de tipo 2 y posee las tolerancias permitidas por los estándares internacionales de la IEC (*International Electrotechnical Commission*), en especial lo especificado en la norma IEC 60651, en la cual se describen las tolerancias permitidas para los distintos tipos o clases de equipos. (Ver Tabla 11)



Figura 20. Imágenes de uso de Sonómetro digital versión 1.2 marca Extech, modelo HD600.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Tolerancias permitidas para los tipos de sonómetro.

| Clase | Calibradores (dB) | Sonómetros (dB) |
|-------|----------------------------|-----------------|
| 0 | +/- 0,15 | +/- 0,4 |
| 1 | +/- 0,3 | +/- 0,7 |
| 2 | +/- 0,5 | +/- 1,0 |
| 3 | Eliminada por la IEC 61672 | +/- 1,5 |

Fuente: *International Electrotechnical Commission*. IEC 60651 Citado por (Ruiz Padillo, pág. 3)

) **Medición de la velocidad**

De acuerdo al anteproyecto se definió que se utilizarían dos cámaras de video para estimar el tiempo que tardaban los vehículos en recorrer una determinada distancia.

Sin embargo, luego de haber hecho mediciones piloto en campo, se precisó que se utilizaría un radar KUSTOM SIGNALS INC, para obtener datos más confiables.



Figura 21. Imágenes de uso del radar.

Fuente: Elaboración propia.

) Determinación de volúmenes y composición vehicular

Cámara filmadora: con el uso de una cámara filmadora fue posible diligenciar en oficina los formatos para realizar el conteo de los vehículos que circularon por los tramos de interés, durante los periodos de tiempo en los cuales se registraron los niveles de ruido. De esta manera pudieron establecerse tanto los datos de volumen, como de composición vehicular.



Figura 22. Cámara filmadora para registrar velocidades de los vehículos.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

Para evaluar la incidencia en el ruido ambiental total y el ruido de la rodadura generado por el contacto neumático-pavimento, se identificaron tramos de vía con condiciones de IRI bueno regular y malo (Bueno cercano a 2, regular cercano a 4, malo cercano a 6), con el fin de determinar la incidencia de éste en la generación del ruido vehicular. Igualmente, se buscó controlar variables como la pendiente de la vía de estudio, condiciones climáticas, flujo vehicular y la velocidad a la que transitan los vehículos.

Se buscaron tramos con pendientes bajas, con el fin de evitar mayores niveles de ruido debido al esfuerzo del motor en pendientes ascendentes o a ruidos de motor asociados con el frenado en pendientes descendientes principalmente en vehículos comerciales. De igual forma, se seleccionaron tramos con entornos despejados, áreas abiertas evitando la cercanía a barrera, muros de contención, taludes, entre otros, que pudieran afectar la dispersión de las ondas de ruido. Las mediciones en los diferentes tramos se realizaron en condiciones meteorológicas favorables sin presencia de lluvias o tormentas que pudieran afectar las medidas. Finalmente se seleccionaron tramos en donde las velocidades fueran favorables para la investigación, es decir velocidades que superan los 60 km/h durante la mañana y la tarde, teniendo en cuenta que a menores velocidades priman factores diferentes al contacto neumático pavimento en la generación de ruido vehicular.

Para determinar los días y periodos de medición se tomaron los registros del conteo realizado en el peaje de Tuta (Boyacá), para la semana comprendida entre el 30 de marzo y el 5 de abril del año 2014, mostrando que los días en los que hay menores variaciones en los volúmenes máximos horarios corresponden a los días martes, miércoles y jueves (Ver Figura 23), por esta razón, fueron éstos los días que se designaron para la realización de las pruebas de medición de niveles de ruido de rodadura y volúmenes del flujo vehicular en los tramos de interés.

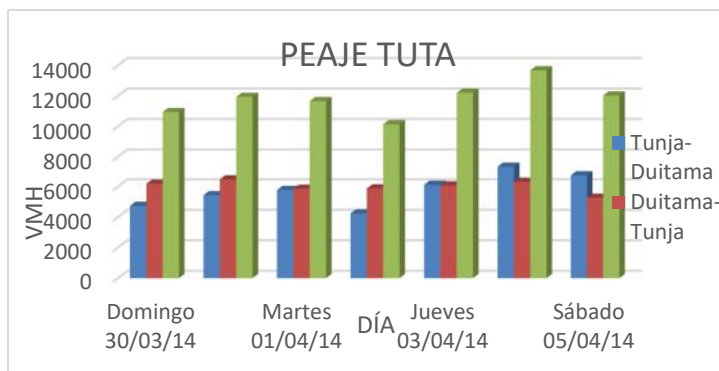


Figura 23. Volumen Máximo Horario para la semana del 30 de marzo al 05 de abril del 2014.

Fuente: Peaje Tuta - Concesión Solarte y Solarte

Igualmente, se determinó que las mediciones del índice de rugosidad internacional y de los niveles de ruido, se realizarían sobre la huella de los neumáticos del carril externo de la doble calzada (Briseño-Tunja- Sogamoso BTS) sentido Duitama-Tunja, sentido en el que se presenta menor variación del flujo vehicular, teniendo como entornos de referencia las poblaciones de Paipa y Villapinzón.

Para definir los periodos de medición se tuvieron en cuenta los conteos correspondientes a los días martes, miércoles y jueves.

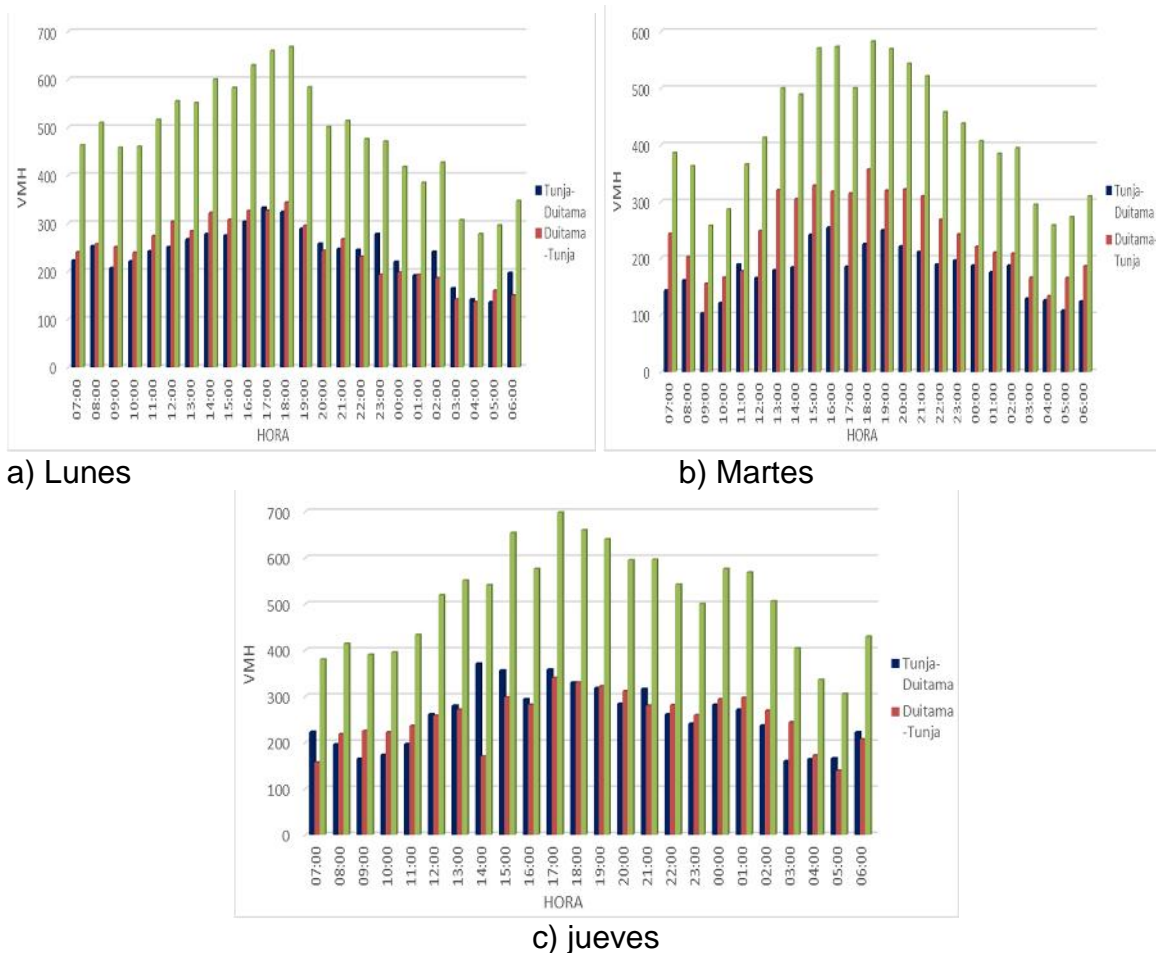


Figura 24. Volúmenes Máximos Horarios días a) martes, b) miércoles, c) jueves
Fuente: Peaje Tuta - Concesión Solarte y Solarte

Se midió el ruido de rodadura en dos periodos de tiempo para cada tramo, uno en la mañana y otro en la tarde en donde el volumen vehicular se encuentre entre el mayor rango registrado (14:00-20:00) y otro donde el volumen vehicular se encuentra en el menor (7:00-13:00), obteniendo un número de datos representativos. Para evitar la intersección de un mismo foco de ruido entre tramos

contiguos, se escogieron sitios lo suficientemente distanciados uno del otro, que variaron con los enunciados inicialmente en el anteproyecto, por cuanto el IRI supuesto para cada tramo no coincidía y era fundamental para la investigación tomar las mediciones en los tramos que realmente variarían entre IRI bueno, regular y malo.

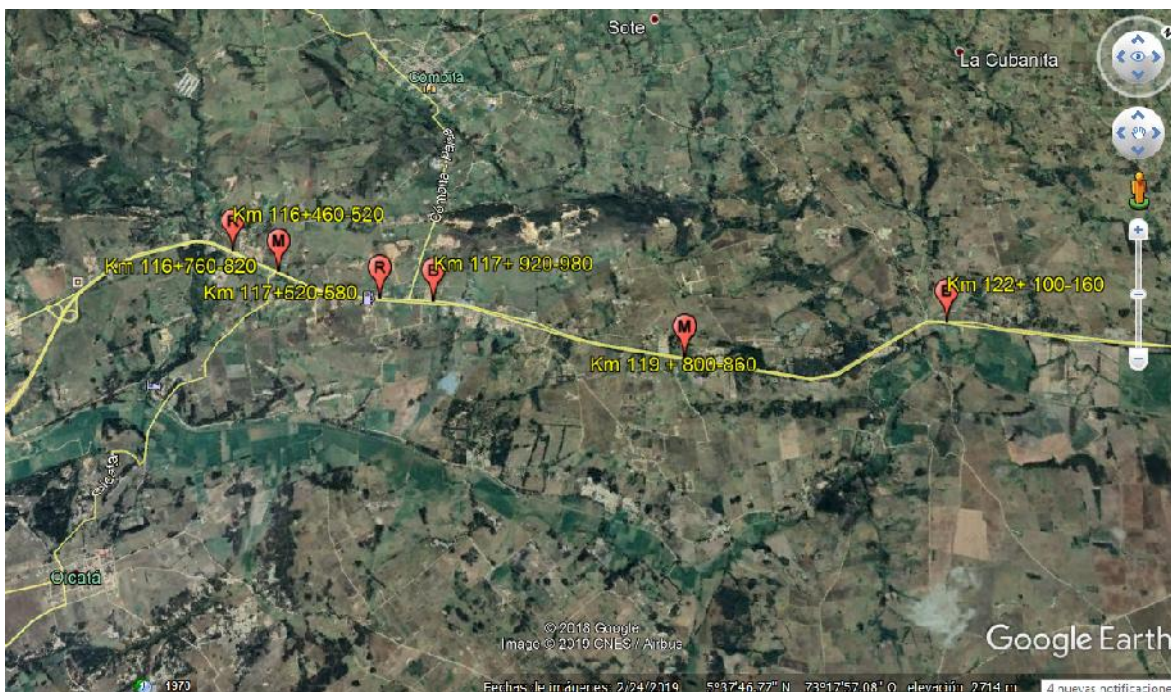


Figura 25. Localización de los tramos seleccionados sobre la doble calzada Briseño -Tunja- Sogamoso, Tramo Duitama - Tunja
Fuente: Google Earth Pro

De esta manera se definieron los siguientes periodos y tramos de medición:

Tabla 12. Periodos de medición y tramos seleccionados sobre la doble calzada (BTS) sentido Duitama-Tunja

| Índice de rugosidad internacional (IRI) | Tramo entre abscisas | | Hora pico | | | Hora valle | | |
|---|----------------------|----------|-----------|-----------|------|------------|-------------|------|
| | Km | Abscisas | Día | Período | | Día | Período | |
| Bueno | 117 | 920-980 | Mar | 2:00-3:00 | p.m. | Jue | 9:00-10:00 | a.m. |
| Bueno | 122 | 100-160 | Mie | 2:00-3:00 | p.m. | Mar | 9:00-10:00 | a.m. |
| Regular | 116 | 460-520 | Jue | 4:00-5:00 | p.m. | Mie | 11:00-12:00 | a.m. |
| Regular | 117 | 520-580 | Mar | 4:00-5:00 | p.m. | Jue | 11:00-12:00 | a.m. |
| Malo | 116 | 760-820 | Jue | 2:00-3:00 | p.m. | Mie | 9:00-10:00 | a.m. |
| Malo | 119 | 800-860 | Mie | 4:00-5:00 | p.m. | Mar | 11:00-12:00 | a.m. |

Fuente: Elaboración propia

4.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MEDICIÓN

4.3.1. Prueba piloto

Inicialmente se realizó medición de IRI mediante el método de nivelación en diferentes tramos esperando obtener resultados de IRI cercanos a 2, 4 y 6 con el fin de definir sitios de estudio con las tres características de IRI bueno, regular y malo, respectivamente. En este chequeo se evidenció que los tramos sugeridos inicialmente en el anteproyecto no satisfacían la clasificación esperada, por esta razón se cambiaron y definieron los tramos sobre las abscisas descritas en la tabla 12

Se realizaron pruebas iniciales de medición de ruido ubicando el sonómetro a una distancia de 1.5 m de la huella exterior de la calzada en el carril de estudio, para determinar la incidencia de factores como el viento producido por el paso de los vehículos, la ubicación de elementos de señalización preventiva, lectura de datos y factores que pueden generar datos atípicos, entre otros. De lo anterior se notó que el paso de los vehículos comerciales principalmente, generan una corriente de viento que desestabiliza el sonómetro produciendo vibraciones y movimientos bruscos que introducen lecturas muy altas generando datos atípicos ajenos al comportamiento de ruido. Por otra parte, la localización de elementos de señalización preventivos como instalación de conos y colombinas de señalización vial, generan que los conductores se aparten de la orilla de la vía, generando el paso de los mismo por áreas diferentes a las huellas de la calzada. Por lo anterior, se hace necesario fijar el trípode del sonómetro a una masa de gran peso para evitar desplazamientos y vibraciones que alteraran los datos, de igual forma, se ubicaron los elementos de señalización preventiva fuera de la línea de demarcación de la calzada para generar el menor impacto en el paso de los vehículos por la huella del carril externo de la calzada

Se realizaron pruebas de ubicación de la cámara filmadora para determinar los volúmenes de tránsito y las velocidades de los vehículos definiendo una distancia constante, determinando que el sitio más adecuado para la ubicación de la cámara filmadora es junto a la ubicación del sonómetro, para determinar los volúmenes de tránsito y facilitar la interpretación de los niveles de ruido registrados por el sonómetro. Finalmente, una vez realizadas las pruebas piloto para determinar la velocidad estimando el tiempo que tardaban los vehículos en recorrer una determinada distancia, el video no muestra la suficiente precisión generando imprecisiones en la estimación de las velocidades, por cuanto se decidió utilizar un radar KUSTOM SIGNALS INC, para mejorar la confiabilidad de los datos.

4.3.2. Montaje de instrumentos

Una vez realizadas las mediciones de prueba y determinar las ubicaciones más favorables de los equipos, se realizó el montaje y toma de datos de las diferentes variables.

Niveles de ruido: se realizó el montaje de **sonómetro** digital versión 1.2 marca Extech modelo HD600 y software model HD600, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- *Escala de medición entre 30 dBA y 130 dBA*
- *Ponderación de frecuencia "A" la cual se usa comúnmente para programas ambientales o de conservación del oído, además, ésta frecuencia de respuesta es similar a la respuesta del oído humano.*
- *Tiempo de respuesta lento (1 segundo) sugerido por el fabricante el cual permite vigilar una fuente de ruido con un nivel de presión sonora razonablemente constante.*
- *Condiciones de operación de 0 a 40 °C (32 a 104 °F); humedad relativa de 10% a 75%.*
- *Posición del sonómetro sobre el corredor vial a 1.5 m de distancia del flujo vehicular y a 1.20 m del piso siendo ésta la posición ideal para los equipos de medición según la Resolución 627 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.*
- *Intervalo de medición de 1 segundo buscando minimizar los errores estadísticos en el tratamiento de la información.*

A continuación, se muestra la figura del posicionamiento de equipo de medición de ruido.



Figura 26. Posicionamiento de equipo de medición del ruido con el sonómetro y toma de video, abscisas Km 116 460-520, de un camión.
FUENTE: Propia.

La rugosidad: el **índice de rugosidad internacional - IRI** se midió realizando el montaje del nivel de precisión a un costado de la vía, se extendió la cinta métrica sobre el asfalto en un tramo de 60 m (30 m atrás y 30 m adelante del sitio donde se localizó el sonómetro), se tomaron datos ubicando la mira cada 25 cm sobre la huella externa del carril de estudio para representar el acoplamiento de la rueda sobre el pavimento, obteniendo así 240 lecturas para determinar el IRI de cada tramo.



Figura 27. Posicionamiento de equipo de medición de índice de rugosidad, mira y nivel de precisión, abscisas Km 116 760-820.
FUENTE: Propia

Volumen vehicular: se realizó el montaje de la **cámara de video** sobre trípode a una altura de 80 cm del piso y a una distancia de 1.5 m del flujo vehicular, se dispuso junto a la ubicación del sonómetro. Las filmaciones se realizaron simultáneamente con las mediciones de ruido, para determinar los volúmenes de tránsito y la

composición del mismo, además de ser una herramienta para comparar y determinar los picos de los niveles de ruido.



Figura 28. Posicionamiento de equipo de medición de volumen vehicular, cámara de video, abscisas Km 116 760-820.

FUENTE: Propia

Velocidades: se realizó medición de las velocidades con **Radar KUSTOM SIGNALS INC**, fue necesario tomar las lecturas desde el interior de un vehículo, por cuanto los conductores al ver la presencia del radar disminuían la velocidad considerablemente. Las velocidades se tomaron de forma simultánea con las mediciones de ruido y las filmaciones. A continuación, se muestra el registro fotográfico de la medición de velocidades.

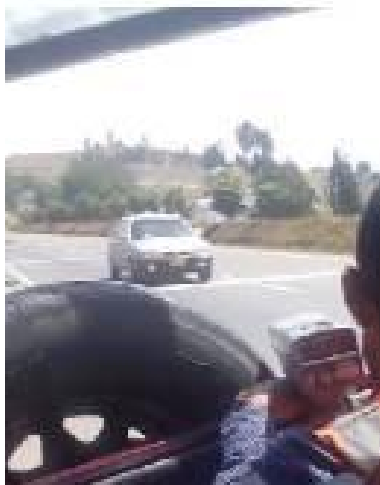


Figura 29. Medición de la velocidad posicionamiento de radar dentro de vehículo para evitar ser detectado por los conductores en el tramo con abscisas Km 116 760-820, de un automóvil.

FUENTE: Propia.

4.3.3. Medición de índice de rugosidad

Para medir el índice de rugosidad internacional IRI, se diseñó una cartera de nivelación simple que calculara las cotas de los puntos que se midieron con el levantamiento topográfico (Mira y Nivel) hecho en campo, en cada tramo y a lo largo de los 60 m seleccionados, obteniendo 240 lecturas para determinar el IRI de cada tramo.

(Anexo 1. Carteras de nivelación simple).

A continuación, se muestra el registro fotográfico de la medición de la rugosidad.



Figura 30. Medición de las cotas de perfil longitudinal del tramo con abscisas Km 116 760-820.

Fuente: Propia



Figura 31. Medición de las cotas de perfil longitudinal del tramo con abscisas Km 119 800-860.

FUENTE: Propia

4.3.4. Medición de velocidad

Se realizó medición de las velocidades con **Radar KUSTOM SIGNALS INC** tomando registros a la mayor cantidad de vehículos teniendo en cuenta las diferentes composiciones (vehículos V, Buses B, Camiones C y Tracto camiones T), se obtuvo un registro de velocidades para cada periodo de cada tramo de estudio, la información fue registrada en el formato mostrado en el documento anexo. (Anexo 2. Formato de registro de velocidades)



Figura 32. Medición de la velocidad en el tramo con abscisas Km 116 460-520.
Fuente: Propia

4.3.5. Determinación volumen y composición vehicular

A partir de las filmaciones hechas en los días y horas de registro, realizando un conteo de vehículos se pudo determinar el volumen y la composición del tránsito. Los videos permiten la agrupación de la composición de tránsito en diferentes periodos de tiempo. Para cada periodo de medición se tomó una hora, que a su vez se dividió en periodos de registro de cinco (5) minutos para garantizar la homogeneidad de los datos obtenidos.

Es importante aclarar que los volúmenes de tránsito totales corresponden a los vehículos que pasaron por los dos carriles de la calzada, en sentido Duitama-Tunja en los tramos de estudio. Además, no se tuvo en cuenta la composición de motocicletas teniendo en cuenta que el estudio se enfoca en determinar la relación del ruido con el rozamiento neumático pavimento, por cuanto se infiere que el ruido producido por los neumáticos de las motocicletas es mínimo a comparación del ruido producido por la explosión del motor.

Para efectos de análisis estadístico y teniendo en cuenta el comportamiento de los automotores se determinó agrupar la composición del tránsito en vehículos livianos (v) y vehículos comerciales (vc).

4.3.6. Medición de niveles de ruido

Luego de determinados los sitios de estudio, se procedió a realizar la medición de los niveles de ruido con el sonómetro digital versión 1.2 marca Extech modelo HD600, de acuerdo con lo establecido por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Minambiente, 2006), las especificaciones técnicas del fabricante y considerando además las características de las fuentes emisoras de ruido (vehículos automotores)⁹, se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones base para la medición de los niveles de presión sonora:

- La escala de medición se encuentra entre un rango de 30 dBA y 130 dBA
- En programas ambientales o de conservación del oído se usa comúnmente la ponderación de frecuencia "A", además, ésta frecuencia de respuesta es similar a la respuesta del oído humano.
- El tiempo de respuesta es lento (1 segundo), el cual es el sugerido por el fabricante y permite vigilar una fuente de ruido con un nivel de presión sonora razonablemente constante.
- Las condiciones de operación deben ser: Temperatura entre 0 a 40 °C (32 a 104 °F) y humedad relativa de 10% a 75%.
- La posición del sonómetro sobre el corredor vial debe estar a 1.5 m de distancia del flujo vehicular y a 1.20 m del piso siendo ésta la posición ideal para los equipos de medición según la Resolución 627 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- El intervalo de medición de 1 segundo busca minimizar los errores estadísticos en el tratamiento de la información.

A continuación, se muestra el registro fotográfico de la toma de datos en campo del ruido para los diferentes tramos.

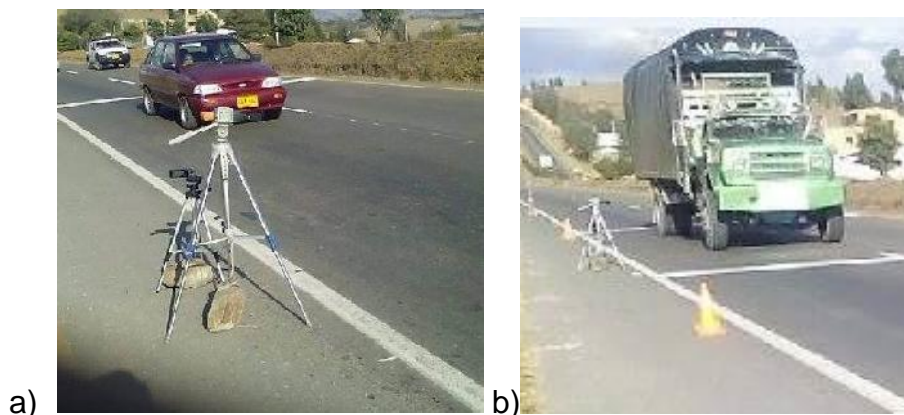


Figura 33. Medición del ruido con el sonómetro y toma de video abscisas Km 116 460-520. a) al paso de vehículo. b) al paso de camión

Fuente: Propia



Figura 34. Medición del ruido con el sonómetro y toma de video abscisas Km 116 760-820, de un bus.
Fuente: Propia



Figura 35. Medición del ruido con el sonómetro y toma de video abscisas Km 117 520-580
Fuente: Propia.



Figura 36. Medición del ruido con el sonómetro y toma de video abscisas Km 119 800-860.
Fuente: Propia.



Figura 37. Medición del ruido con el sonómetro y toma de video abscisas Km 122 100-160. a) al paso de vehículo. b) al paso de camión

Fuente: Propia

Los datos de ruido medidos en campo se trabajaron con el software model HD600, que venía incluido en el equipo y además es compatible con Windows, la información se descargó en formato .txt y posteriormente se importó a Excel.

En este punto es preciso recordar que, para cada zona de interés, se trabajaron dos periodos de medición de una (1) hora; uno en la mañana y otro en la tarde.

A continuación, se muestran las gráficas de Nivel de ruido en dB(A) vs Tiempo en segundos, que se obtuvieron del programa Model HD600 para cada uno de los tramos:

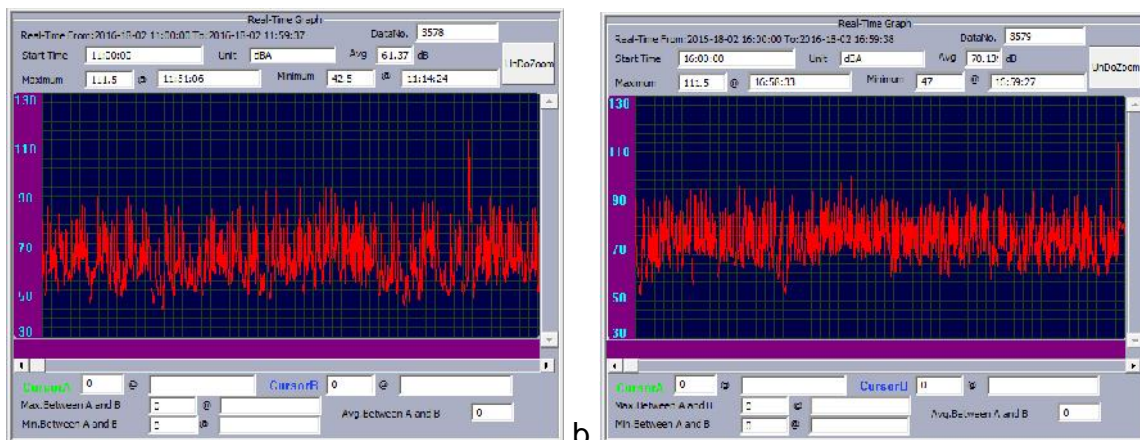
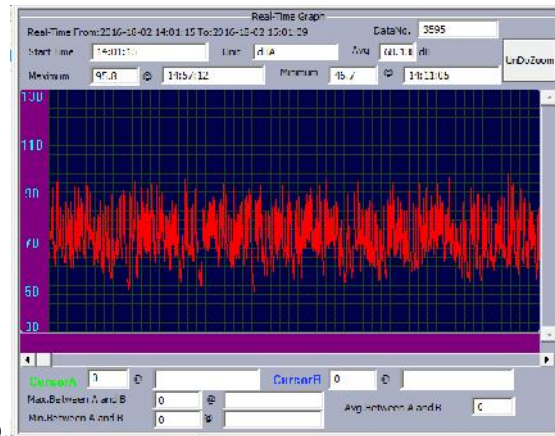
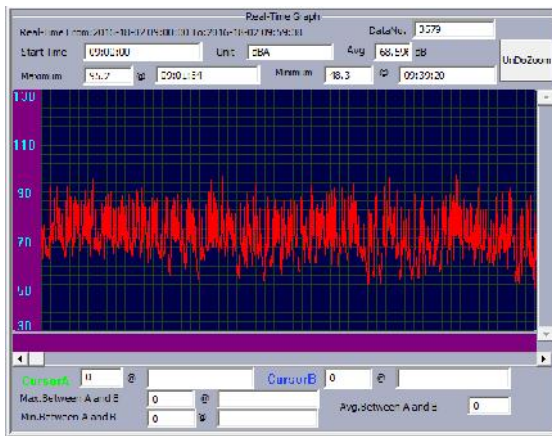
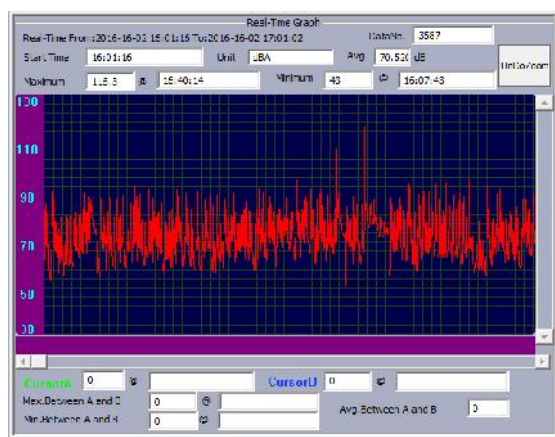
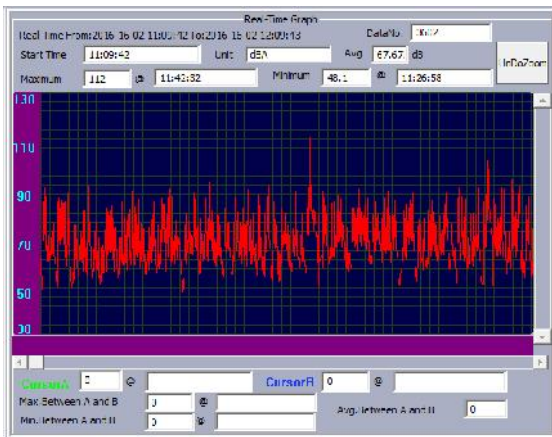


Figura 38. Niveles de ruido Km 116 460-520. a) Mañana, b) Tarde

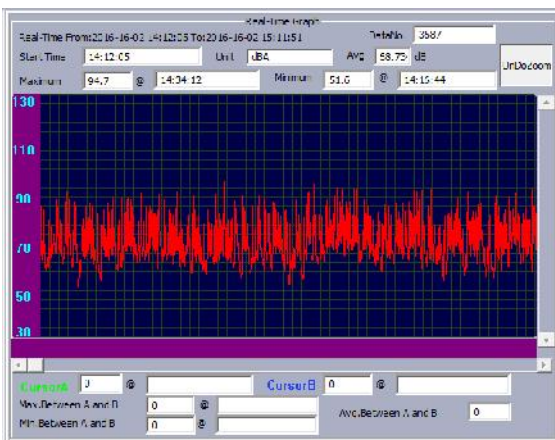
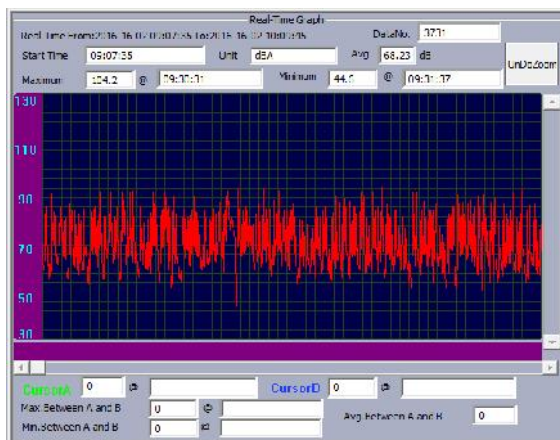
Fuente: SOFTWARE MODEL HD600



a. b.
 Figura 39. Niveles de ruido Km 116 760-820. a) Mañana, b) Tarde
 Fuente: SOFTWARE MODEL HD600



a. b.
 Figura 40. Niveles de ruido Km 117 520-580. a) Mañana, b) Tarde
 Fuente: SOFTWARE MODEL HD600



a. b.
 Figura 41. Niveles de ruido Km 117 920-980. a) Mañana, b) Tarde
 Fuente: SOFTWARE MODEL HD600

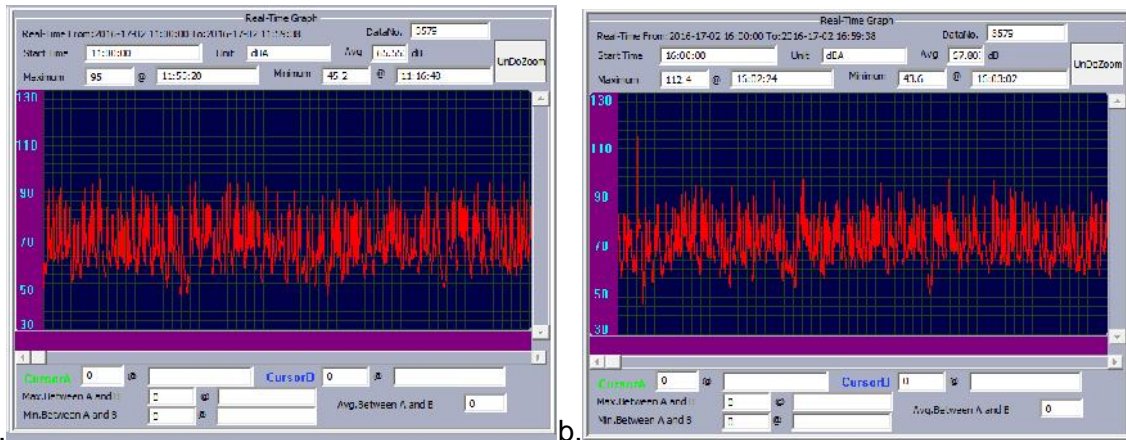


Figura 42. Niveles de ruido Km 119 800-860. a) Mañana, b) Tarde
Fuente: SOFTWARE MODEL HD600

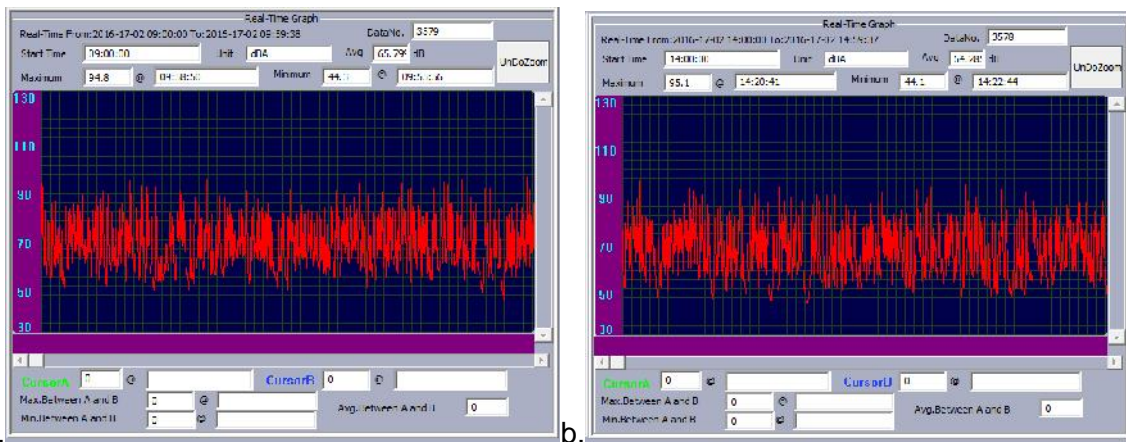


Figura 43. Niveles de ruido Km 122 100-160. a) Mañana, b) Tarde
Fuente: SOFTWARE MODEL HD600

De los histogramas presentado, podemos inferir que el ruido oscila entre los 50 y 90 decibelios, comportamiento esperado teniendo en cuenta las características de la vía de estudio. Igualmente se evidencia la presencia de algunos picos que reflejan situaciones atípicas como se evidencia en los tramos de Km 117 920-980 en la mañana, Km 117 520-580 en la mañana y en la tarde; y Km 119 800-860 en la tarde.

5. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

5.1 CÁLCULO DE LAS VARIABLES DEL MODELO

5.1.1. Ruido vehicular promedio (Leq)

Para obtener los valores de promedio de ruido en un periodo de cinco minutos, se usaron las formulas del numeral 3.1.4 Operaciones con la unidad de registro del sonido - Promedio de decibelios, así:

Se determinaron periodos de estudio cada cinco minutos (5 min)

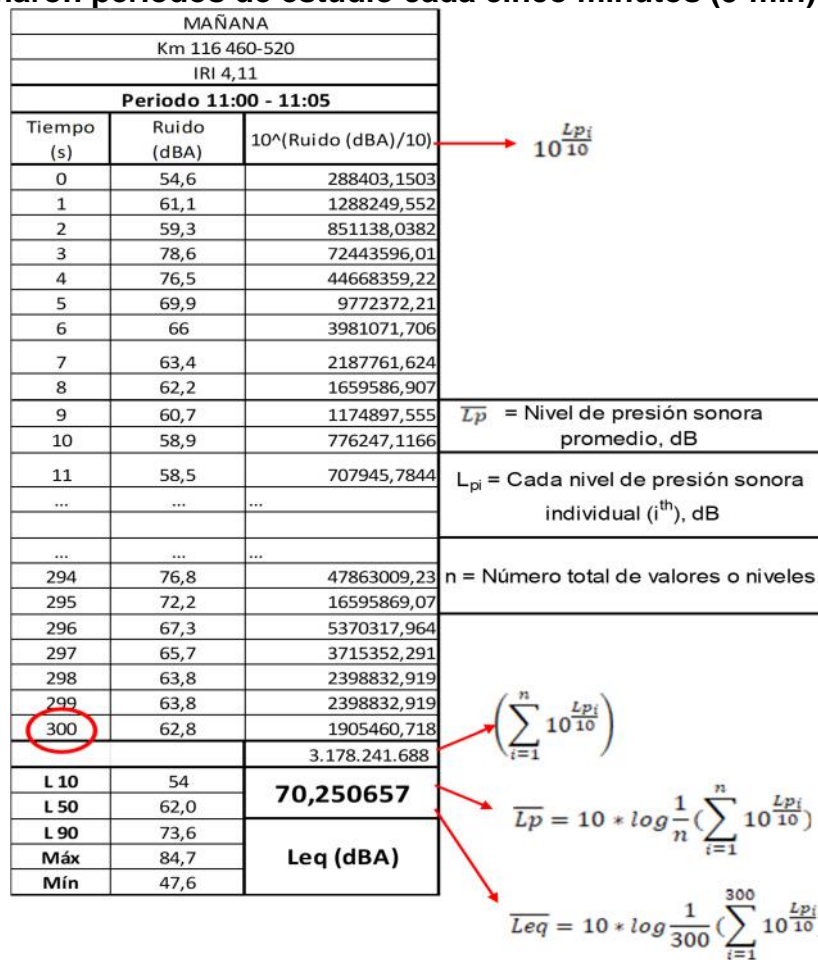


Figura 44. Determinación del ruido equivalente Leq en decibeles A (dBA) para un periodo de cinco minutos en el tramo Km 116 + 460-520. Datos tomados en el periodo de 11:00 am a 11:05 am. Obtenido de tabla de Excel datos obtenidos del sonómetro.

Fuente: propia

5.1.2. Índice de Rugosidad Internacional – IRI

Una vez tabuladas la información obtenida en campo, se ingresaron los datos de abscisa-cota al programa INPACO, obtenidos de las carteras de nivelación y de esta manera obtener los valores de IRI para cada tramo de estudio, clasificándolos en: malo, regular y bueno de acuerdo a los valores obtenidos.

A continuación, se muestran los resultados arrojados por el INPACO para cada uno de los tramos:

| MINISTERIO DE TRANSPORTES - UNIVERSIDAD DEL CAUCA | |
|---|--------------------------------|
| CALCULO DEL COEFICIENTE 'IRI' [Método NIRA Y NIVEL] 05-1994 | |
| Delta X [250 mm] | Delta X (mm) 250.00 |
| Identificación del Tramo de Entrada Información | Número Total de Datos 241 |
| | Número de Datos Analizados 241 |
| Calculo del IRI | % de Análisis 100.0 |
| Imprimir Información | Z1 71.11 |
| | Z2 45.87 |
| | Z3 38.09 |
| | Z4 37.77 |
| | V 24.41 |
| | σ MS1 986.22M |
| | IRI Calculado (m/km) 4.1692 |

Figura 45. IRI Calculado para el Km 116 460-520 (IRI regular = 4.11 m/km)
Fuente: SOFTWARE INPACO

| MINISTERIO DE TRANSPORTES - UNIVERSIDAD DEL CAUCA | |
|---|--------------------------------|
| CALCULO DEL COEFICIENTE 'IRI' [Método NIRA Y NIVEL] 05-1994 | |
| Delta X [250 mm] | Delta X (mm) 250.00 |
| Identificación del Tramo de Entrada Información | Número Total de Datos 241 |
| | Número de Datos Analizados 241 |
| Calculo del IRI | % de Análisis 100.0 |
| Imprimir Información | Z1 -7.75 |
| | Z2 155.46 |
| | Z3 8.67 |
| | Z4 256.40 |
| | V -7.81 |
| | σ MS1 1307.36M |
| | IRI Calculado (m/km) 5.4423 |

Figura 46. IRI Calculado para el Km 116 760-820 (IRI malo = 5.45 m/km)
Fuente: SOFTWARE INPACO

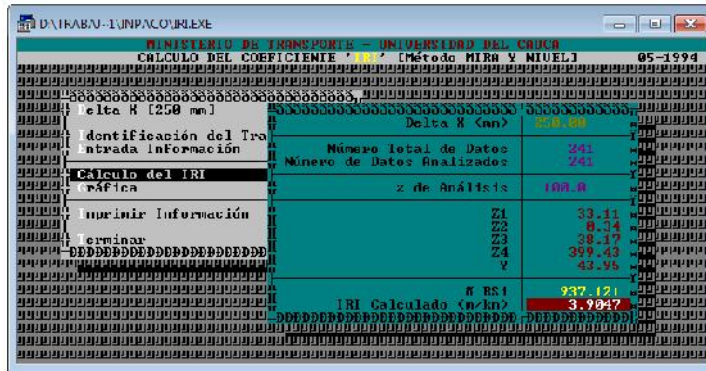


Figura 47. IRI Calculado para el Km 117 520-580 (IRI regular = 3.9 m/km)
Fuente: SOFTWARE INPACO

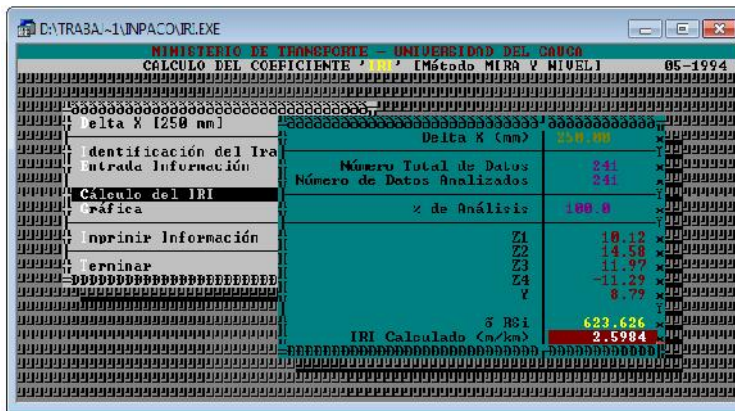


Figura 48. IRI Calculado para el Km 117 920-980 (IRI bueno = 2.60 m/km)
Fuente: SOFTWARE INPACO



Figura 49. IRI Calculado para el Km 119 800-860 (IRI malo = 6.73 m/km)
Fuente: SOFTWARE INPACO



Figura 50. IRI Calculado para el Km 122 100-160 (IRI bueno = 2.21 m/km)
Fuente: SOFTWARE INPACO

Teniendo en cuenta estos resultados se clasificaron los tramos medidos de la siguiente manera:

Tabla 13. Índice de rugosidad internacional (IRI) obtenido en los Tramos seleccionados sobre la doble calzada sentido Duitama-Tunja

| TRAMOS SELECCIONADOS | | | | |
|----------------------|----------|-----------------------------------|------|---------|
| Km | Abscisas | Índice de rugosidad internacional | | |
| 1 | 122 | 120-160 | 2,21 | Bueno |
| 2 | 119 | 800-860 | 6,73 | Malo |
| 3 | 117 | 920-980 | 2,60 | Bueno |
| 4 | 117 | 520-580 | 3,90 | Regular |
| 5 | 116 | 760-820 | 5,45 | Malo |
| 6 | 116 | 460-520 | 4,11 | Regular |

Fuente. Elaboración propia

5.1.3. Composición del tránsito

Todos los vehículos según clasificación del INVIAS Autos, Buses y Camiones (C1, C2, C3, C4 y C5); se agruparon en dos categorías así:

Automóviles: los vehículos pequeños como camionetas, colectivas y automóviles.
Comerciales: vehículos medianos y grandes como camiones, buses, dobleroques y tractocaminones.

Los datos obtenidos para esta variable a partir del conteo por observación directa de los videos grabados, corresponden al total de vehículos que pasaron en cada periodo de (5) cinco minutos por cada tramo y el carril sentido Duitama – Tunja.

Las motocicletas no se incluyeron en ninguna categoría por considerar que el ruido que generan no obedece a la fricción del neumático con el pavimento.

5.1.4. Velocidades promedio

La velocidad promedio por tipo de vehículo se obtiene a partir de la velocidad de aquellos a los cuales se pudo medir con el radar y calculando la media aritmética de dichos valores. Es una medida aproximada por cuanto no fue posible medir a todos de forma simultánea con otros vehículos, pero se puede asumir una buena aproximación por cuanto no había grandes diferencias en las velocidades entre ellos. Para el procesamiento de la información se clasificaron las velocidades de los vehículos livianos (V) y vehículos comerciales (VC). Las unidades de medida son kilómetros por hora (Km/h).

5.1.5. Base de datos obtenidos en el estudio

La base de datos usada para la caracterización y modelación del ruido vehicular – Leq, se muestra en la Tabla 14, está conformada por las variables del volumen vehicular y la velocidad promedio para los dos tipos de los vehículos, medidos en cada abscisa en cada periodo de (5) cinco minutos. En total son ciento cuarenta y cuatro (144) registros que corresponden a veinticuatro (24) periodos de observación en cada una de los seis (6) tramos.

Tabla 14.Base de datos de las variables medidas.

| ABSCISA | PERIODO | | IRI (m/Km) | nA | nC | VA (Km/H) | VC (Km/H) | L eq (dBA) |
|----------------|---------|-------|---------------|----|----|--------------|--------------|---------------|
| | | | | | | | | |
| Km 116 460-520 | 11:00 | 11:05 | 4,11 | 14 | 5 | 80,2 | 56,7 | 70,25 |
| Km 116 460-520 | 11:05 | 11:10 | 4,11 | 15 | 3 | 84,2 | 69,3 | 70,36 |
| Km 116 460-520 | 11:10 | 11:15 | 4,11 | 13 | 5 | 80,7 | 78,0 | 71,14 |
| Km 116 460-520 | 11:15 | 11:20 | 4,11 | 7 | 4 | 82,9 | 71,5 | 66,71 |
| Km 116 460-520 | 11:20 | 11:25 | 4,11 | 22 | 5 | 80,1 | 59,3 | 69,49 |
| Km 116 460-520 | 11:25 | 11:30 | 4,11 | 13 | 2 | 83,7 | 77,5 | 72,07 |
| Km 116 460-520 | 11:30 | 11:35 | 4,11 | 19 | 10 | 77,0 | 77,7 | 74,44 |
| Km 116 460-520 | 11:35 | 11:40 | 4,11 | 16 | 5 | 91,3 | 73,5 | 71,86 |
| Km 116 460-520 | 11:40 | 11:45 | 4,11 | 9 | 2 | 87,7 | 95,0 | 66,75 |
| Km 116 460-520 | 11:45 | 11:50 | 4,11 | 12 | 5 | 87,0 | 63,8 | 73,72 |
| Km 116 460-520 | 11:50 | 11:55 | 4,11 | 17 | 9 | 72,5 | 68,3 | 74,80 |
| Km 116 460-520 | 11:55 | 12:00 | 4,11 | 12 | 6 | 95,8 | 68,3 | 71,25 |
| Km 116 460-520 | 4:00 | 4:05 | 4,11 | 34 | 18 | 71,0 | 63,7 | 76,51 |
| Km 116 460-520 | 4:05 | 4:10 | 4,11 | 32 | 14 | 73,7 | 77,0 | 78,43 |
| Km 116 460-520 | 4:10 | 4:15 | 4,11 | 37 | 6 | 85,2 | 62,8 | 76,73 |
| Km 116 460-520 | 4:15 | 4:20 | 4,11 | 21 | 15 | 77,9 | 58,5 | 76,93 |
| Km 116 460-520 | 4:20 | 4:25 | 4,11 | 33 | 14 | 75,3 | 69,1 | 78,45 |
| Km 116 460-520 | 4:25 | 4:30 | 4,11 | 45 | 15 | 82,3 | 68,4 | 79,65 |
| Km 116 460-520 | 4:30 | 4:35 | 4,11 | 46 | 11 | 74,6 | 77,3 | 76,10 |
| Km 116 460-520 | 4:35 | 4:40 | 4,11 | 53 | 13 | 79,9 | 66,2 | 77,86 |
| Km 116 460-520 | 4:40 | 4:45 | 4,11 | 39 | 24 | 76,1 | 69,8 | 78,42 |
| Km 116 460-520 | 4:45 | 4:50 | 4,11 | 38 | 10 | 75,2 | 72,0 | 74,84 |
| Km 116 460-520 | 4:50 | 4:55 | 4,11 | 26 | 10 | 81,3 | 59,4 | 75,08 |
| Km 116 460-520 | 4:55 | 5:00 | 4,11 | 25 | 9 | 76,8 | 68,8 | 76,37 |
| Km 116 760-820 | 9:00 | 9:05 | 5,45 | 22 | 11 | 95,0 | 69,8 | 78,31 |
| Km 116 760-820 | 9:05 | 9:10 | 5,45 | 25 | 14 | 88,7 | 82,1 | 77,56 |
| Km 116 760-820 | 9:10 | 9:15 | 5,45 | 29 | 8 | 81,0 | 92,3 | 76,65 |
| Km 116 760-820 | 9:15 | 9:20 | 5,45 | 30 | 10 | 86,6 | 71,2 | 74,96 |
| Km 116 760-820 | 9:20 | 9:25 | 5,45 | 21 | 13 | 86,6 | 66,4 | 77,18 |
| Km 116 760-820 | 9:25 | 9:30 | 5,45 | 21 | 6 | 83,5 | 68,3 | 74,80 |
| Km 116 760-820 | 9:30 | 9:35 | 5,45 | 30 | 8 | 81,8 | 69,3 | 75,87 |
| Km 116 760-820 | 9:35 | 9:40 | 5,45 | 23 | 7 | 92,3 | 77,8 | 76,90 |
| Km 116 760-820 | 9:40 | 9:45 | 5,45 | 26 | 8 | 92,0 | 77,5 | 76,78 |
| Km 116 760-820 | 9:45 | 9:50 | 5,45 | 16 | 8 | 78,1 | 69,3 | 79,44 |
| Km 116 760-820 | 9:50 | 9:55 | 5,45 | 27 | 13 | 85,8 | 68,9 | 75,92 |
| Km 116 760-820 | 9:55 | 10:00 | 5,45 | 19 | 4 | 81,5 | 77,3 | 74,19 |
| Km 116 760-820 | 2:00 | 2:05 | 5,45 | 25 | 21 | 79,0 | 74,0 | 78,66 |

Tabla 14. (Continuación) Base de datos de las variables medidas

| ABSCISA | PERIODO | IRI (m/Km) | nA | nC | VA (Km/H) | VC (Km/H) | L eq (dBA) | L eq (dBA) |
|----------------|---------|---------------|------|----|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Km 116 760-820 | 2:05 | 2:10 | 5,45 | 16 | 10 | 75,8 | 66,8 | 75,58 |
| Km 116 760-820 | 2:10 | 2:15 | 5,45 | 37 | 13 | 87,8 | 66,6 | 77,66 |
| Km 116 760-820 | 2:15 | 2:20 | 5,45 | 22 | 11 | 86,8 | 77,2 | 76,16 |
| Km 116 760-820 | 2:20 | 2:25 | 5,45 | 35 | 18 | 81,4 | 68,6 | 77,51 |
| Km 116 760-820 | 2:25 | 2:30 | 5,45 | 29 | 8 | 90,7 | 81,8 | 76,10 |
| Km 116 760-820 | 2:30 | 2:35 | 5,45 | 29 | 21 | 86,5 | 75,4 | 78,00 |
| Km 116 760-820 | 2:35 | 2:40 | 5,45 | 19 | 7 | 88,0 | 72,6 | 75,51 |
| Km 116 760-820 | 2:40 | 2:45 | 5,45 | 38 | 9 | 80,2 | 77,2 | 74,99 |
| Km 116 760-820 | 2:45 | 2:50 | 5,45 | 37 | 10 | 86,5 | 80,5 | 79,92 |
| Km 116 760-820 | 2:50 | 2:55 | 5,45 | 20 | 9 | 85,1 | 78,0 | 75,25 |
| Km 116 760-820 | 2:55 | 3:00 | 5,45 | 25 | 11 | 87,1 | 67,4 | 77,61 |
| Km 117 520-580 | 11:00 | 11:05 | 3,9 | 20 | 15 | 83,3 | 68,3 | 77,83 |
| Km 117 520-580 | 11:05 | 11:10 | 3,9 | 16 | 7 | 64,0 | 61,5 | 72,96 |
| Km 117 520-580 | 11:10 | 11:15 | 3,9 | 15 | 9 | 70,0 | 75,2 | 74,92 |
| Km 117 520-580 | 11:15 | 11:20 | 3,9 | 21 | 12 | 69,6 | 67,4 | 75,55 |
| Km 117 520-580 | 11:20 | 11:25 | 3,9 | 24 | 10 | 61,0 | 56,5 | 74,60 |
| Km 117 520-580 | 11:25 | 11:30 | 3,9 | 20 | 9 | 80,2 | 60,5 | 75,65 |
| Km 117 520-580 | 11:30 | 11:35 | 3,9 | 18 | 11 | 69,3 | 54,7 | 78,60 |
| Km 117 520-580 | 11:35 | 11:40 | 3,9 | 19 | 17 | 71,2 | 65,1 | 75,72 |
| Km 117 520-580 | 11:40 | 11:45 | 3,9 | 22 | 16 | 64,2 | 66,2 | 75,10 |
| Km 117 520-580 | 11:45 | 11:50 | 3,9 | 18 | 12 | 79,3 | 62,7 | 75,44 |
| Km 117 520-580 | 11:50 | 11:55 | 3,9 | 19 | 10 | 72,5 | 76,8 | 80,87 |
| Km 117 520-580 | 11:55 | 12:00 | 3,9 | 23 | 16 | 69,9 | 65,1 | 79,09 |
| Km 117 520-580 | 4:00 | 4:05 | 3,9 | 25 | 12 | 65,0 | 63,1 | 75,34 |
| Km 117 520-580 | 4:05 | 4:10 | 3,9 | 27 | 10 | 73,4 | 65,4 | 82,37 |
| Km 117 520-580 | 4:10 | 4:15 | 3,9 | 19 | 13 | 77,4 | 73,3 | 76,43 |
| Km 117 520-580 | 4:15 | 4:20 | 3,9 | 29 | 13 | 72,3 | 71,4 | 77,40 |
| Km 117 520-580 | 4:20 | 4:25 | 3,9 | 23 | 11 | 81,1 | 71,3 | 75,39 |
| Km 117 520-580 | 4:25 | 4:30 | 3,9 | 37 | 12 | 70,1 | 80,2 | 76,46 |
| Km 117 520-580 | 4:30 | 4:35 | 3,9 | 30 | 21 | 68,6 | 67,0 | 78,62 |
| Km 117 520-580 | 4:35 | 4:40 | 3,9 | 24 | 17 | 70,5 | 73,8 | 80,46 |
| Km 117 520-580 | 4:40 | 4:45 | 3,9 | 32 | 13 | 69,9 | 64,5 | 77,75 |
| Km 117 520-580 | 4:45 | 4:50 | 3,9 | 21 | 12 | 77,5 | 62,2 | 78,43 |
| Km 117 520-580 | 4:50 | 4:55 | 3,9 | 13 | 9 | 77,0 | 76,3 | 77,52 |
| Km 117 520-580 | 4:55 | 5:00 | 3,9 | 22 | 13 | 76,7 | 67,7 | 77,77 |
| Km 117 920-980 | 9:00 | 9:05 | 2,6 | 25 | 8 | 85,0 | 76,5 | 76,25 |
| Km 117 920-980 | 9:05 | 9:10 | 2,6 | 24 | 11 | 68,2 | 73,2 | 76,09 |
| Km 117 920-980 | 9:10 | 9:15 | 2,6 | 21 | 8 | 74,3 | 70,5 | 76,71 |
| Km 117 920-980 | 9:15 | 9:20 | 2,6 | 22 | 8 | 79,8 | 71,7 | 75,88 |
| Km 117 920-980 | 9:20 | 9:25 | 2,6 | 33 | 11 | 70,9 | 70,5 | 78,82 |
| Km 117 920-980 | 9:25 | 9:30 | 2,6 | 32 | 8 | 81,8 | 70,8 | 76,10 |

Tabla 14. (Continuación) Base de datos de las variables medidas

| ABSCISA | PERIODO | IRI (m/Km) | nA | nC | VA (Km/H) | VC (Km/H) | L eq (dBA) | L eq (dBA) |
|----------------|---------|---------------|------|----|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Km 117 920-980 | 9:30 | 9:35 | 2,6 | 16 | 7 | 74,6 | 75,4 | 73,58 |
| Km 117 920-980 | 9:35 | 9:40 | 2,6 | 19 | 11 | 75,3 | 68,3 | 76,54 |
| Km 117 920-980 | 9:40 | 9:45 | 2,6 | 26 | 11 | 81,7 | 61,8 | 76,13 |
| Km 117 920-980 | 9:45 | 9:50 | 2,6 | 26 | 8 | 84,1 | 66,4 | 75,34 |
| Km 117 920-980 | 9:50 | 9:55 | 2,6 | 27 | 12 | 77,7 | 74,1 | 76,35 |
| Km 117 920-980 | 9:55 | 10:00 | 2,6 | 17 | 7 | 90,7 | 73,3 | 74,55 |
| Km 117 920-980 | 2:00 | 2:05 | 2,6 | 19 | 9 | 77,0 | 83,8 | 74,68 |
| Km 117 920-980 | 2:05 | 2:10 | 2,6 | 20 | 10 | 74,4 | 67,5 | 73,96 |
| Km 117 920-980 | 2:10 | 2:15 | 2,6 | 30 | 10 | 75,7 | 73,8 | 76,48 |
| Km 117 920-980 | 2:15 | 2:20 | 2,6 | 24 | 5 | 70,6 | 72,6 | 74,08 |
| Km 117 920-980 | 2:20 | 2:25 | 2,6 | 27 | 7 | 82,8 | 73,4 | 76,22 |
| Km 117 920-980 | 2:25 | 2:30 | 2,6 | 20 | 9 | 78,7 | 72,8 | 74,60 |
| Km 117 920-980 | 2:30 | 2:35 | 2,6 | 15 | 12 | 72,4 | 69,1 | 76,71 |
| Km 117 920-980 | 2:35 | 2:40 | 2,6 | 29 | 13 | 82,5 | 80,0 | 77,97 |
| Km 117 920-980 | 2:40 | 2:45 | 2,6 | 24 | 8 | 77,6 | 74,5 | 75,63 |
| Km 117 920-980 | 2:45 | 2:50 | 2,6 | 25 | 9 | 80,5 | 63,1 | 75,70 |
| Km 117 920-980 | 2:50 | 2:55 | 2,6 | 19 | 11 | 76,9 | 64,3 | 75,78 |
| Km 117 920-980 | 2:55 | 3:00 | 2,6 | 31 | 14 | 78,7 | 71,1 | 78,12 |
| Km 119 800-860 | 11:00 | 11:05 | 6,73 | 15 | 7 | 70,7 | 61,0 | 75,36 |
| Km 119 800-860 | 11:05 | 11:10 | 6,73 | 10 | 10 | 79,0 | 53,9 | 76,00 |
| Km 119 800-860 | 11:10 | 11:15 | 6,73 | 16 | 9 | 86,1 | 66,4 | 75,01 |
| Km 119 800-860 | 11:15 | 11:20 | 6,73 | 13 | 11 | 76,0 | 62,6 | 76,15 |
| Km 119 800-860 | 11:20 | 11:25 | 6,73 | 17 | 16 | 75,1 | 59,6 | 76,81 |
| Km 119 800-860 | 11:25 | 11:30 | 6,73 | 17 | 10 | 86,4 | 59,7 | 75,68 |
| Km 119 800-860 | 11:30 | 11:35 | 6,73 | 12 | 7 | 87,4 | 59,6 | 74,56 |
| Km 119 800-860 | 11:35 | 11:40 | 6,73 | 18 | 5 | 83,5 | 66,3 | 73,15 |
| Km 119 800-860 | 11:40 | 11:45 | 6,73 | 19 | 6 | 84,9 | 45,8 | 77,27 |
| Km 119 800-860 | 11:45 | 11:50 | 6,73 | 12 | 7 | 88,8 | 69,0 | 79,99 |
| Km 119 800-860 | 11:50 | 11:55 | 6,73 | 19 | 11 | 87,3 | 58,1 | 76,10 |
| Km 119 800-860 | 11:55 | 12:00 | 6,73 | 21 | 11 | 79,5 | 52,6 | 77,53 |
| Km 119 800-860 | 4:00 | 4:05 | 6,73 | 13 | 11 | 69,0 | 67,8 | 76,61 |
| Km 119 800-860 | 4:05 | 4:10 | 6,73 | 17 | 10 | 80,0 | 65,4 | 75,77 |
| Km 119 800-860 | 4:10 | 4:15 | 6,73 | 18 | 8 | 87,8 | 56,1 | 76,44 |
| Km 119 800-860 | 4:15 | 4:20 | 6,73 | 28 | 7 | 78,1 | 59,6 | 75,07 |
| Km 119 800-860 | 4:20 | 4:25 | 6,73 | 21 | 11 | 85,7 | 45,0 | 77,08 |
| Km 119 800-860 | 4:25 | 4:30 | 6,73 | 14 | 7 | 81,2 | 58,0 | 74,85 |
| Km 119 800-860 | 4:30 | 4:35 | 6,73 | 22 | 8 | 80,0 | 62,3 | 77,79 |
| Km 119 800-860 | 4:35 | 4:40 | 6,73 | 20 | 8 | 87,8 | 68,3 | 75,06 |
| Km 119 800-860 | 4:40 | 4:45 | 6,73 | 13 | 10 | 82,7 | 51,3 | 80,39 |

Tabla 14. (Continuación) Base de datos de las variables medidas

| ABSCISA | PERIODO | IRI (m/Km) | nA | nC | VA (Km/H) | VC (Km/H) | L eq (dBA) | L eq (dBA) |
|----------------|---------|---------------|------|----|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Km 119 800-860 | 4:45 | 4:50 | 6,73 | 15 | 13 | 65,7 | 58,0 | 81,18 |
| Km 119 800-860 | 4:50 | 4:55 | 6,73 | 9 | 11 | 81,0 | 59,9 | 79,44 |
| Km 119 800-860 | 4:55 | 5:00 | 6,73 | 22 | 5 | 77,3 | 50,3 | 74,75 |
| Km 122 100-160 | 9:00 | 9:05 | 2,21 | 20 | 4 | 73,9 | 70,7 | 75,98 |
| Km 122 100-160 | 9:05 | 9:10 | 2,21 | 17 | 7 | 81,4 | 72,6 | 76,16 |
| Km 122 100-160 | 9:10 | 9:15 | 2,21 | 10 | 7 | 78,3 | 62,1 | 75,28 |
| Km 122 100-160 | 9:15 | 9:20 | 2,21 | 16 | 6 | 75,0 | 76,7 | 73,67 |
| Km 122 100-160 | 9:20 | 9:25 | 2,21 | 14 | 6 | 68,9 | 68,0 | 75,36 |
| Km 122 100-160 | 9:25 | 9:30 | 2,21 | 16 | 5 | 86,3 | 73,8 | 72,84 |
| Km 122 100-160 | 9:30 | 9:35 | 2,21 | 20 | 5 | 73,7 | 64,2 | 73,32 |
| Km 122 100-160 | 9:35 | 9:40 | 2,21 | 15 | 10 | 75,0 | 64,2 | 76,17 |
| Km 122 100-160 | 9:40 | 9:45 | 2,21 | 25 | 6 | 84,7 | 76,8 | 76,34 |
| Km 122 100-160 | 9:45 | 9:50 | 2,21 | 21 | 11 | 82,4 | 71,4 | 75,92 |
| Km 122 100-160 | 9:50 | 9:55 | 2,21 | 10 | 7 | 81,6 | 70,0 | 74,50 |
| Km 122 100-160 | 9:55 | 10:00 | 2,21 | 17 | 4 | 87,1 | 63,3 | 75,75 |
| Km 122 100-160 | 2:00 | 2:05 | 2,21 | 18 | 10 | 80,0 | 69,5 | 74,93 |
| Km 122 100-160 | 2:05 | 2:10 | 2,21 | 26 | 12 | 93,9 | 72,3 | 76,44 |
| Km 122 100-160 | 2:10 | 2:15 | 2,21 | 19 | 9 | 85,3 | 75,0 | 74,14 |
| Km 122 100-160 | 2:15 | 2:20 | 2,21 | 17 | 11 | 84,0 | 75,9 | 76,15 |
| Km 122 100-160 | 2:20 | 2:25 | 2,21 | 18 | 10 | 78,0 | 71,9 | 75,40 |
| Km 122 100-160 | 2:25 | 2:30 | 2,21 | 18 | 9 | 73,7 | 71,6 | 73,10 |
| Km 122 100-160 | 2:30 | 2:35 | 2,21 | 36 | 8 | 79,2 | 67,3 | 73,24 |
| Km 122 100-160 | 2:35 | 2:40 | 2,21 | 12 | 11 | 73,7 | 76,3 | 76,62 |
| Km 122 100-160 | 2:40 | 2:45 | 2,21 | 25 | 8 | 78,9 | 72,2 | 74,16 |
| Km 122 100-160 | 2:45 | 2:50 | 2,21 | 20 | 5 | 70,5 | 74,5 | 72,94 |
| Km 122 100-160 | 2:50 | 2:55 | 2,21 | 16 | 5 | 81,1 | 79,5 | 74,00 |
| Km 122 100-160 | 2:55 | 3:00 | 2,21 | 25 | 12 | 81,5 | 64,1 | 75,79 |

Fuente. Elaboración propia.

5.2 ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS DE LAS VARIABLES

Para la consolidación de la base de datos y el análisis estadístico se usa Excel y SPSS. El proceso de análisis se diseña de manera que permita obtener y mostrar el modelo que explique el ruido vehicular en función de las demás variables medidas.

5.2.1. Identificación de valores atípicos

La variable dependiente que se quiere caracterizar en el estudio es el nivel de ruido L_{eq} es logarítmica, entonces se hace un análisis exploratorio para verificar su comportamiento. El análisis gráfico de la variable ruido vehicular, L_{eq} , indica que se distribuye aproximadamente normal con una variabilidad pequeña y algunos valores que pueden ser atípicos, como se ve en la figura 51.

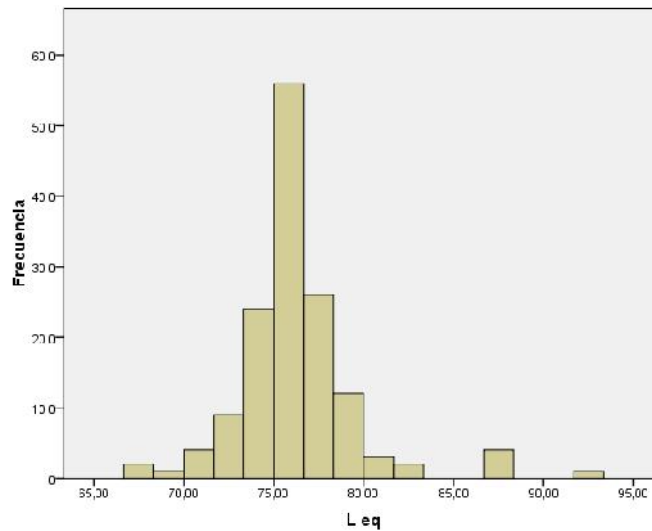


Figura 51. Histograma de frecuencias para los valores obtenidos de L_{eq} .

Se hace un diagrama de caja (*boxplot*) agrupada por el valor del IRI y se identifican algunos valores extremos en tres de las abscisas, como se muestra en la gráfica de la Figura 52.

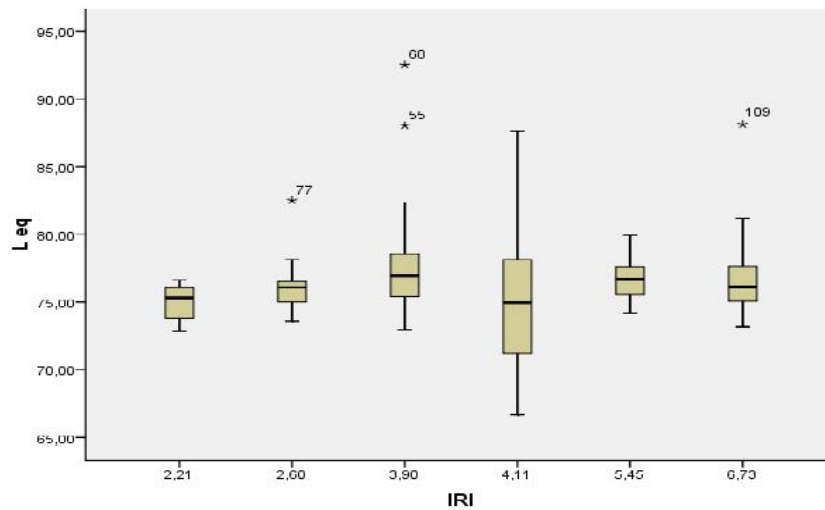


Figura 52. *Boxplot* del ruido para cada valor de IRI con valores atípicos.
FUENTE. Elaboración propia.

Con la identificación de los registros número 77, 55, 68 y 109, se procede a revisar los videos y establecer por qué el sonómetro pudo haber tomado valores muy altos. En todos los casos se comprobó que corresponden al sonido de bocinas de algún vehículo, que alteraba considerablemente la medición. Teniendo en cuenta que se pretende verificar la relación del ruido con el IRI, ese ruido se considera una perturbación. Por tal razón, se procedió a realizar la imputación estadística de dichos datos, sustituyéndolos por la mediana de los valores obtenidos en cada uno de los periodos respectivos. Los nuevos valores se encuentran resaltados en la tabla 14.

La figura 53 muestra la distribución de L_{eq} una vez se corrigieron los valores extremos. En la tabla 15 se muestran los estadísticos descriptivos asociados con cada nivel de IRI. Es importante resaltar que, por la naturaleza logarítmica de la variable, no se utilizan la media y la distribución estándar para caracterizar la tendencia central y dispersión, respectivamente, sino que se usan la mediana y el rango.

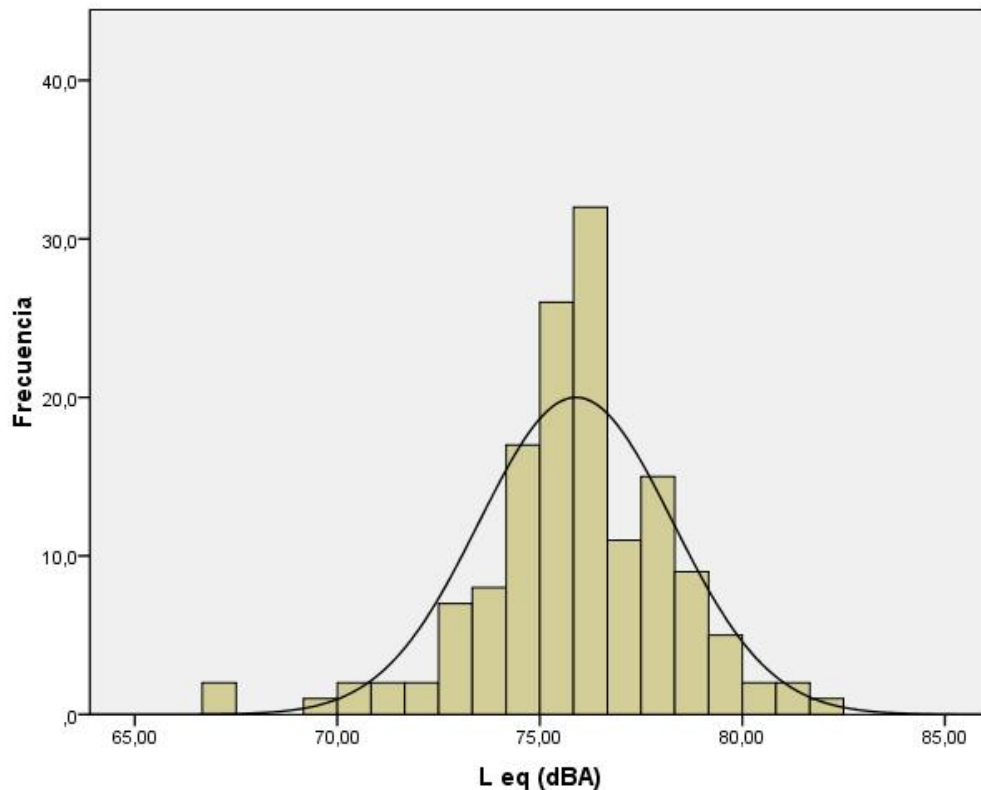


Figura 53. Histograma de frecuencia ruido sin valores atípicos.
FUENTE. Elaboración propia.

Tabla 15. Estadísticas descriptivas para el Leq para cada IRI.
 FUENTE. Elaboración propia.

| L eq (dBA) | | | | | |
|------------|-----|---------|--------|--------|-------|
| IRI | N | Mediana | Mínimo | Máximo | Rango |
| 2,21 | 24 | 75.32 | 72,84 | 76,62 | 3,78 |
| 2,60 | 24 | 76.10 | 73,58 | 78,82 | 5,24 |
| 3,90 | 24 | 76.93 | 72,96 | 82,37 | 9,41 |
| 4,11 | 24 | 74.82 | 66,71 | 79,65 | 12,94 |
| 5,45 | 24 | 76.72 | 74,19 | 79,92 | 5,73 |
| 6,73 | 24 | 76.13 | 73,15 | 81,18 | 8,03 |
| Total | 144 | 75.99 | 66,71 | 82,37 | 15,66 |

5.2.2. Estadísticas descriptivas para los volúmenes vehiculares

En la Figura 54 se muestran las distribuciones de los volúmenes vehiculares de automóviles y comerciales mediante un diagrama de caja (*boxplot*). Se puede ver que la mediana (línea media de la caja) es menor en los camiones que en los automóviles. Los valores extremos están explicados por periodos en los cuales pasa un número mayor de ellos, lo cual es perfectamente válido. Este comportamiento también se verifica con los resultados de la tabla 16, donde el promedio de automóviles que pasan en un periodo de cinco segundos es de 22,1 comparado con 9,8 vehículos comerciales.

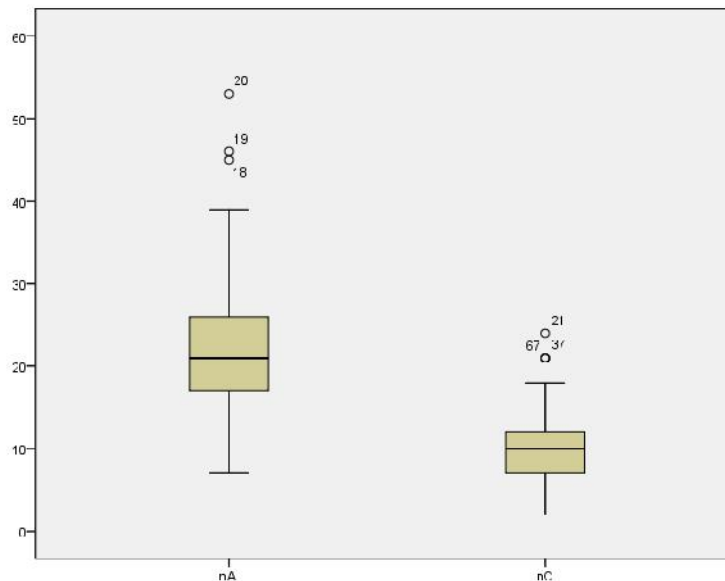


Figura 54. *Boxplot* del número de automóviles y el número de comerciales.
 FUENTE. Elaboración propia.

Tabla 16. Estadísticos descriptivos para la composición vehicular.

| Resúmenes de casos | | | | | |
|--------------------|-----|-------|------------|--------|--------|
| | N | Media | Desv. típ. | Mínimo | Máximo |
| nA | 144 | 22,1 | 7,93 | 7 | 53 |
| nC | 144 | 9,8 | 3,84 | 2 | 24 |

FUENTE. Elaboración propia.

5.2.3. Estadísticas descriptivas de las velocidades promedio

Las velocidades promedio son mayores en valor y más homogéneas para los automóviles que para los vehículos comerciales, según se observa en la figura 55 y la tabla 17.

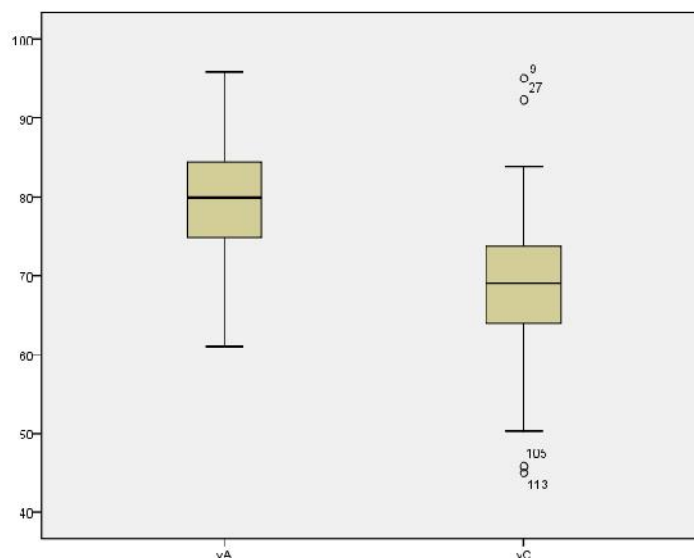


Figura 55. *Boxplot* de las velocidades promedio según tipo de vehículos.

FUENTE. Elaboración propia.

Tabla 17. Estadísticos descriptivos de las velocidades por tipo de vehículo.

| Resúmenes de casos | | | | | |
|--------------------|-----|-------|------------|--------|--------|
| | N | Media | Desv. típ. | Mínimo | Máximo |
| vA | 144 | 79,4 | 6,82 | 61,0 | 95,8 |
| vC | 144 | 68,8 | 7,92 | 45,0 | 95,0 |

FUENTE. Elaboración propia.

5.3 MODELO DE GENERACIÓN DE RUIDO

Se usa la regresión lineal múltiple para explorar el modelo que explique al ruido vehicular promedio en función de las variables medidas. Mediante el análisis de los resultados se verifica la significación de las variables y los supuestos del modelo: normalidad de los residuales, homocedasticidad, multicolinealidad. Por la forma como se diseñó el estudio, se garantiza que los valores de ruido son independientes para cada periodo.

5.3.1. Modelo de Leq en función de todas las variables medidas

Tabla 18. Resumen modelo regresión de Leq en función de todas las variables medidas.

Resumen del modelo^b

| Modelo | R | R cuadrado | R cuadrado corregida | Error típ. de la estimación | Durbin-Watson |
|--------|-------------------|------------|----------------------|-----------------------------|---------------|
| 1 | ,639 ^a | ,408 | ,387 | 1,86718 | 1,422 |

a. Variables predictoras: (Constante), IRI, nA, vA, vC, nC

b. Variable dependiente: L eq (dBA)

Tabla 19. Coeficientes del modelo con todas las variables medidas.

Coeficientes^a

| Modelo | Coeficientes no estandarizados | | Coeficientes tipificados | t | Sig. |
|---------------|--------------------------------|------------|--------------------------|--------|------|
| | B | Error típ. | Beta | | |
| 1 (Constante) | 72,916 | 2,369 | | 30,785 | ,000 |
| nA | ,049 | ,022 | ,162 | 2,173 | ,031 |
| nC | ,317 | ,048 | ,511 | 6,632 | ,000 |
| vA | -,006 | ,026 | -,018 | -,253 | ,801 |
| vC | -,023 | ,022 | -,078 | -1,058 | ,292 |
| IRI | ,219 | ,115 | ,144 | 1,912 | ,058 |

a. Variable dependiente: L eq (dBA)

De la tabla 19 se observa que las variables, vA y vC no son significativas, por lo tanto, no se tendrán en cuenta en el modelo. Para que una variable sea significativa en el modelo, deberá tener un p -valor inferior a 0.05. En consecuencia, la velocidad de los vehículos livianos y los vehículos comerciales no son significativos en el modelo. Adicionalmente, se evidencia una inconsistencia teniendo en cuenta los valores negativos de los coeficientes del modelo. Lo anterior debido a que no fue posible determinar la velocidad de la totalidad de los vehículos por las altas velocidades y la simultaneidad en el paso de los mismos.

5.3.2. Modelo de Leq en función del IRI y la composición vehicular

Tabla 20. Resumen modelo regresión de Leq en función del IRI y la composición vehicular.

Resumen del modelo^b

| Modelo | R | R cuadrado | R cuadrado corregida | Error típ. de la estimación | Durbin-Watson |
|--------|-------------------|------------|----------------------|-----------------------------|---------------|
| 1 | ,634 ^a | ,403 | ,390 | 1,86302 | 1,391 |

a. Variables predictoras: (Constante), nC, IRI, nA

b. Variable dependiente: L eq (dBA)

Tabla 21. Coeficientes del modelo con el IRI y la composición vehicular.

Coeficientes^a

| Modelo | Coeficientes no estandarizados | | Coeficientes tipificados | t | Sig. |
|---------------|--------------------------------|------------|--------------------------|---------|------|
| | B | Error típ. | Beta | | |
| 1 (Constante) | 70,676 | ,667 | | 106,028 | ,000 |
| IRI | ,251 | ,101 | ,165 | 2,492 | ,014 |
| nA | ,044 | ,022 | ,145 | 1,991 | ,048 |
| nC | ,327 | ,045 | ,527 | 7,226 | ,000 |

a. Variable dependiente: L eq (dBA)

A partir de las Tablas 20 y 21, se puede ver que estas variables son significativas en el modelo, por lo cual se procede a verificar los supuestos del modelo de regresión múltiple.

No hay multicolinealidad porque todas las variables son independientes entre sí. La normalidad de los datos se puede ver por el histograma de frecuencia de los residuos estandarizados de C, Figura 56; la autocorrelación de los datos según los datos de la tabla 20, el valor del estadístico de Durbin – Watson de 1,391 (debe estar entre 1,5 y 2,5), no se cumple.

Sin embargo, al ver la gráfica de la regresión parcial de Leq en función del volumen de vehículos comerciales de la Figura 57, se nota por la dispersión de los puntos que no hay ajuste a una línea recta, sino que debe transformarse la variable para linealizarla. Se procede a obtener una nueva variable como logaritmo en base 10 para las variables originales del volumen vehicular, Log (nA) y Log (nC) para verificar si el modelo tiene un mejor ajuste.

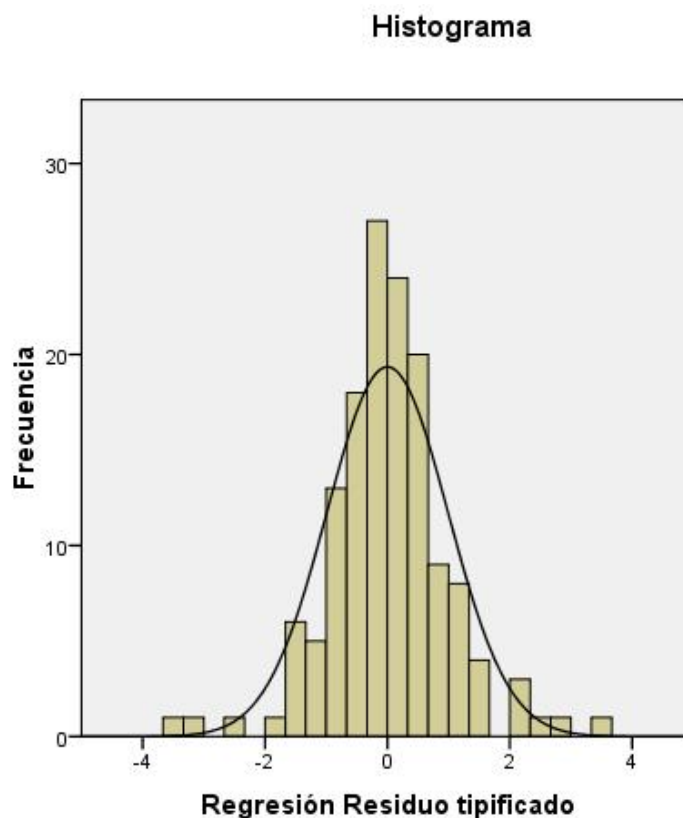


Figura 56. Histograma de frecuencias de los residuos estandarizados para el modelo de Leq en función del IRI y la composición vehicular.

FUENTE. Elaboración propia.

Gráfico de regresión parcial

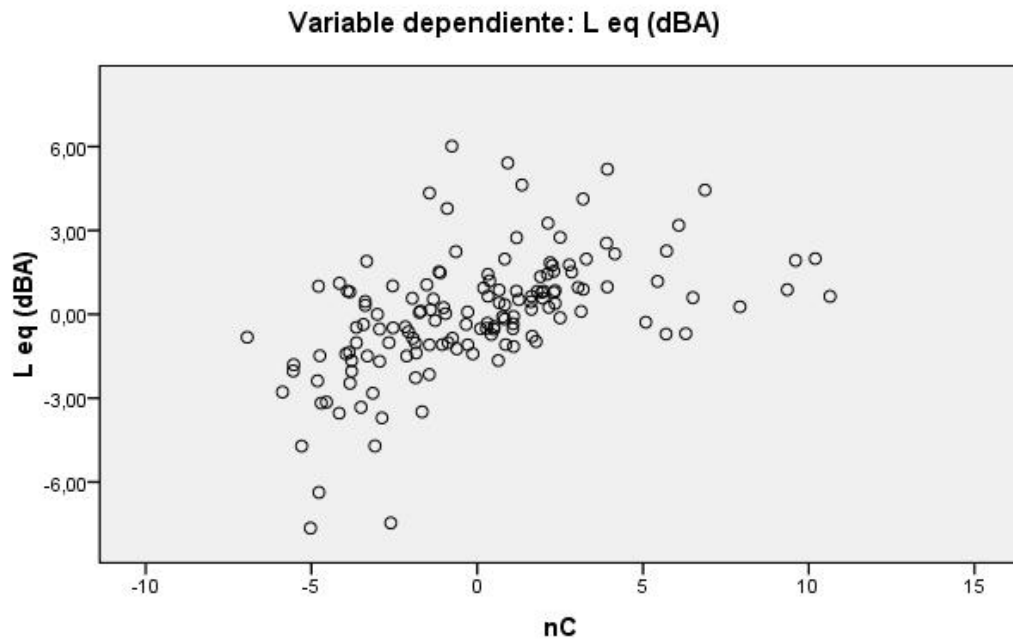


Figura 57. Gráfico de dispersión del ruido en función del número de vehículos comerciales.

FUENTE. Elaboración propia.

5.3.3. Modelo que mejor describe el comportamiento del ruido vehicular en función del IRI

Se corrió el modelo incluyendo como variables independientes los logaritmos de las variables iniciales, pero no era significativo para los logaritmos del IRI y de las velocidades promedio. Por eso se corrió con el IRI y los logaritmos de la composición vehicular.

De la tabla 22 se puede ver que el $R^2 = 0,488$ lo cual significa que casi el 50% de la variabilidad está explicada por las tres variables incluidas en el modelo.

Tabla 22. Coeficientes del de Leq con el IRI y los logaritmos del número de vehículos.

Resumen del modelo^b

| Modelo | R | R cuadrado | R cuadrado corregida | Error típ. de la estimación | Durbin-Watson |
|--------|-------------------|------------|----------------------|-----------------------------|---------------|
| 1 | ,698 ^a | ,488 | ,477 | 1,72493 | 1,586 |

a. Variables predictoras: (Constante), Log(nA), IRI, Log(nC)

b. Variable dependiente: L eq (dBA)

Tabla 23. Tabla ANOVA para el modelo de Leq en función del IRI y los logaritmos del número de vehículos.

ANOVA^b

| Modelo | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|-------------|-------------------|-----|------------------|--------|-------------------|
| 1 Regresión | 396,787 | 3 | 132,262 | 44,452 | ,000 ^a |
| Residual | 416,556 | 140 | 2,975 | | |
| Total | 813,343 | 143 | | | |

a. Variables predictoras: (Constante), Log(nA), IRI, Log(nC)

b. Variable dependiente: L eq (dBA)

Tabla 24. Coeficientes del modelo de Leq en función del IRI y los logaritmos del número de vehículos.

Coeficientes^a

| Modelo | Coeficientes no estandarizados | | Coeficientes tipificados | t | Sig. |
|---------------|--------------------------------|------------|--------------------------|--------|------|
| | B | Error típ. | Beta | | |
| 1 (Constante) | 64,634 | 1,347 | | 47,994 | ,000 |
| IRI | ,246 | ,094 | ,161 | 2,622 | ,010 |
| Log(nC) | 7,826 | ,897 | ,598 | 8,720 | ,000 |
| Log(nA) | 2,090 | 1,061 | ,135 | 1,971 | ,051 |

a. Variable dependiente: L eq (dBA)

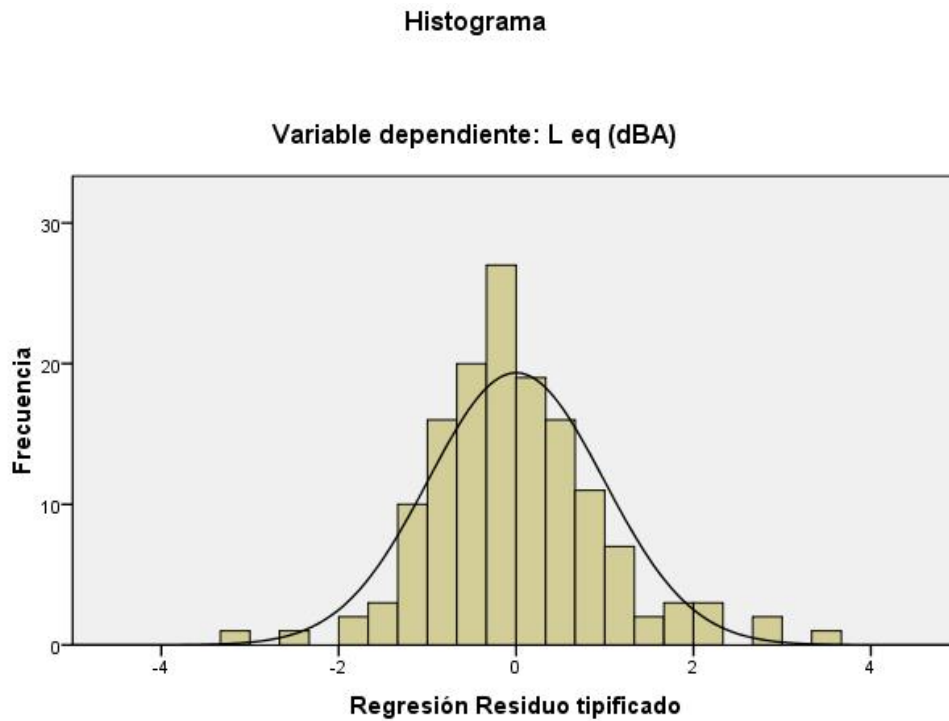


Figura 58. Histograma de los residuos normalizados para el modelo de Leq en función del IRI y el logaritmo del número de vehículos.
FUENTE. Elaboración propia.

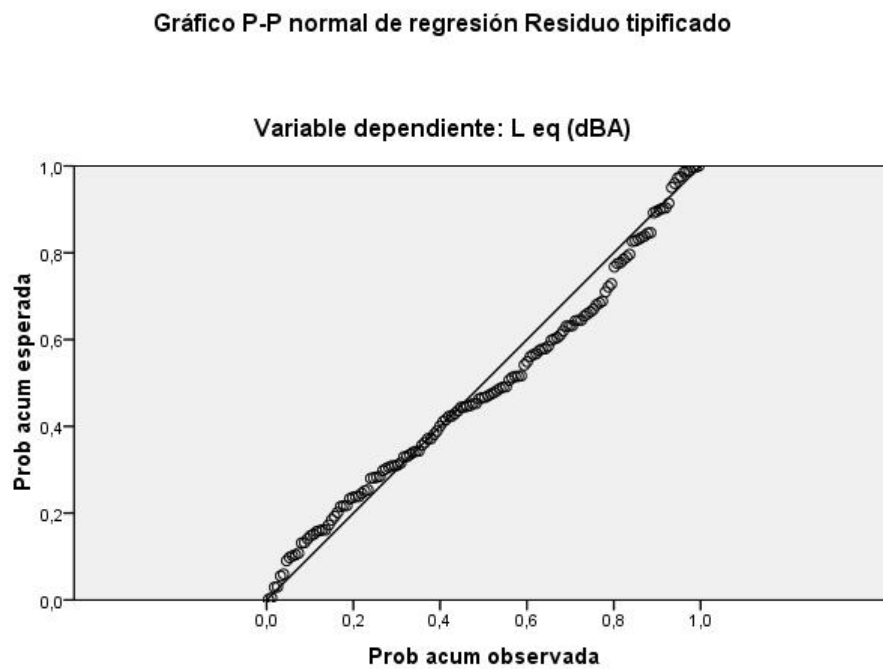


Figura 59. Gráfico de probabilidad para verificar normalidad del modelo.
FUENTE. Elaboración propia.

A partir de las figuras 58 y 59, se puede verificar las condiciones de normalización de los residuos con promedio nulo. Las variables no están correlacionadas por lo cual se puede afirmar que no hay multicolinealidad. El Valor del estadístico de Durbin – Watson es de 1,586, como está en el rango de 1,5 a 2,5 se puede afirmar que los errores no están autocorrelacionados.

Por todo lo anterior se puede concluir que el modelo que explica mejor el ruido vehicular en las condiciones y con las variables medidas es de la forma:

$$Leq X C_0 \Gamma C_1 IRI \Gamma C_2 Log_{10}(nA) \Gamma C_3 Log_{10}(nC)$$

Reemplazando los valores de la Tabla 24 para los coeficientes de las variables del modelo se tiene,

$$Leq X 64,634 \Gamma 0,246 IRI \Gamma 2,090 Log_{10}(nA) \Gamma 7,826 Log_{10}(nC)$$

En donde:

Leq X Promedio de ruido equivalente Leq en decibeles A (dBA) para un periodo de cinco minutos

IRI X Índice de rugosidad internacional del tramo de estudio

nC X Número de vehículos comerciales que pasan en un periodo de cinco minutos

nA X Número de automóviles o vehículos livianos que pasan en un periodo de cinco minutos

5.3.4. Análisis de sensibilidad del ruido vehicular en función del IRI y el flujo del tráfico

Una vez obtenida la expresión que más se ajusta al comportamiento del ruido vehicular en función del IRI y el flujo del tráfico, se realizó un análisis de sensibilidad para diferentes valores de IRI, cantidad de vehículos livianos y cantidad de vehículos comerciales.

Para el análisis se tomaron valores de IRI Muy buenos (cercaos a 1 m/km), buenos (cercaos a 2 m/km), regulares (cercaos a 4 m/km), malos (cercaos a 6 m/km) y muy malos (cercaos a 8 m/km), de acuerdo al tránsito promedio de la vía, con el fin de evaluar la incidencia del IRI en la generación de ruido para los diferentes valores.

Se identificaron los mayores y menores volúmenes de vehículos livianos y comerciales que pasaron durante los periodos de 5 minutos, para los diferentes tramos de estudio, obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 25. Análisis de sensibilidad del ruido en función del IRI, vehículos livianos y vehículos comerciales

| ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL RUIDO EN FUNCIÓN DEL IRI, VEHÍCULOS LIVIANOS Y VEHÍCULOS COMERCIALES | | | | | |
|---|----------------------------|---|--|---|-------|
| Cantidad de vehículos que transitan en un periodo de cinco minutos | Altos volúmenes de tráfico | Bajos volúmenes de tráfico | Altos volúmenes de vehículos livianos (nA) | Altos volúmenes de vehículos comerciales (nC) | |
| Numero de vehículos livianos (nA) | 53 | 7 | 53 | 7 | |
| Numero de vehículos comerciales (nC) | 24 | 2 | 2 | 24 | |
| CARACTERÍSTICA DEL IRI | m/Km | Valores de ruido equivalente Leq (dBA) con diferentes volúmenes de tráfico $Leq = X 64,634 \Gamma 0,246 IRI \Gamma 2,090 \log_{10}(nA) \Gamma 7,826 \log_{10}(nC)$ | | | |
| <i>Muy Bueno (Teórico)</i> | 1 | 79,28 | 69,00 | 70,83 | 77,44 |
| BUENO | 2 | 79,52 | 69,24 | 71,07 | 77,68 |
| REGULAR | 4 | 80,00 | 69,72 | 71,55 | 78,16 |
| MALO | 6 | 80,48 | 70,20 | 72,03 | 78,64 |
| <i>Muy malo (supuesto alto deterioro)</i> | 8 | 80,96 | 70,68 | 72,51 | 79,12 |

Fuente. Elaboración propia.

De acuerdo al análisis de sensibilidad podemos inferir los siguientes aspectos:

- La diferencia entre el ruido equivalente entre un IRI Bueno y un IRI Malo es aproximadamente de un (1) decibel dB(A)
- El aumento en el ruido vehicular por cada unidad de IRI es de 0.24 dBA.
- La diferencia en el ruido equivalente al paso de altos volúmenes de tráfico, con respecto al paso con muy bajos volúmenes de tráfico es de aproximadamente 10 dBA.
- La variable que más incide en la generación de ruido vehicular es el número de vehículos comerciales.
- La variable que menor incidencia tiene en la generación de ruido vehicular es el índice de rugosidad internacional.

- La incidencia del paso altos volúmenes de vehículos livianos con respecto al paso de muy bajos volúmenes de tráfico es muy baja, obteniendo valores máximos de alrededor de 2 dBA.

5.4 VALORACIÓN ECONÓMICA DE LOS IMPACTOS DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA: COSTOS DE MITIGACIÓN

Teniendo en cuenta que el ruido es una externalidad a la cual no es posible determinar la magnitud del impacto de forma directa o en precios del mercado, encontramos que una de las formas de saberlo es a través de la técnica de costos de mitigación, que implica saber cuánto costaría mitigar el impacto y éste sería su valor, para el caso de estudio se tuvieron en cuenta los costos de implementación de barreras acústicas y mantenimiento vial.

El objetivo de esta sección es valorar el impacto del ruido asociado con el flujo de tráfico, el cual se centra en la valoración económica de la contaminación acústica generada por el ruido vehicular en del tramo de la doble calzada (BTS), que pasa por zona sub urbanas como el municipio de Villapinzón, Cundinamarca y Paipa Boyacá.

De esta manera, en primera instancia se exponen tanto las características generales de la población afectada, así como algunas de las externalidades que causan en ésta, la presencia de perturbaciones exteriores generadas por ruido vehicular.

Finalmente, se plantea cuantificar el costo real que acarrearía la implementación de medidas de mitigación propuestas: barreras acústicas viales o mantenimiento de vía; considerando la distribución del costo de ajuste de acuerdo con la vida útil prevista para las pantallas y para las correcciones sobre la capa de rodadura (IRI); y considerar esos costos para la población afectada, de forma que se obtiene un valor en pesos por cada decibelio, por cada hora por personas.

5.4.1. Localización y población del entorno de referencia

Para esta investigación se seleccionó una de las principales vías del departamento de Boyacá, se estudia la doble calzada (BTS) que hace parte de la Concesión Briceño-Tunja-Sogamoso (BTS), la cual es una vía nacional que hace parte de la ruta 55, que une a la zona industrial de Boyacá con Bogotá, presta grandes beneficios a los viajeros ya que reduce su tiempo de desplazamiento en carretera y genera un impacto ambiental considerable, puesto que, muchas de las poblaciones que están cerca de su trazado, están expuestas tanto a la polución causada por los vehículos, como al ruido que estos producen cuando son conducidos a altas velocidades.

) **Localización general:** La doble calzada (BTS) cuenta con muchas poblaciones cercanas al trazado de la vía, para el caso de estudio se seleccionaron las poblaciones sub urbanas de Paipa y Villapinzón. Se tomó como referencia el carril externo de la vía PAIPA-TUNJA-VILLAPINZÓN (en el sentido de circulación Paipa – Villapinzón).

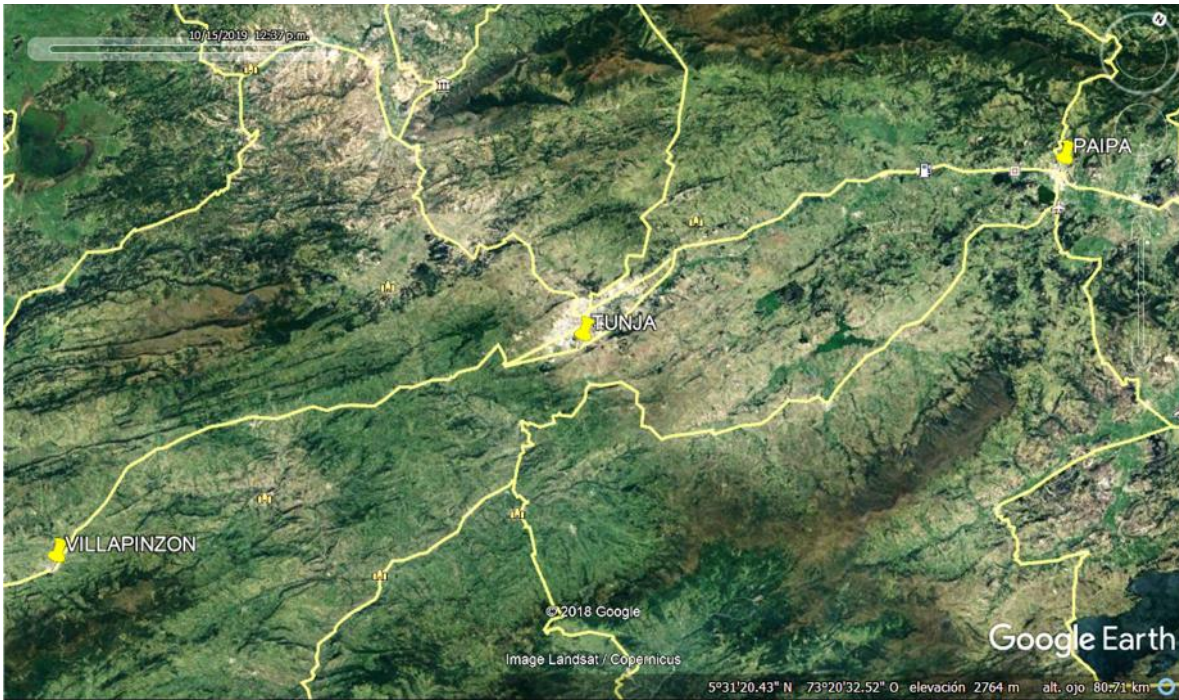


Figura 60. Localización vía de interés Paipa-Tunja-Villapinzón
Fuente: Google Earth Pro. 2019. [Adaptación propia]

) **Localización Paipa (Boyacá):** a continuación, se muestra el área afectada de la población de Paipa tomando como referencia el carril derecho de la calzada en sentido Paipa-Tunja



Figura 61. Zona de Población Afectada de Paipa
Fuente: Google Maps. 2016. [Adaptación propia]

) **Localización Villapinzón (Cundinamarca):** a continuación, se muestra el área afectada de la población de Villapinzón tomando como referencia el carril derecho de la calzada en sentido Tunja-Villapinzón



Figura 62. Zona de Población afectada de Villapinzón.
Fuente: Google Maps. 2016. [Adaptación propia]

) **Población Afectada:** La población analizada es la correspondiente a la zona encontrada 100m desde el carril externo de la vía, debido a que es la distancia máxima a la cual pueden llegar las ondas del sonido generado por el tránsito vehicular y sentido de análisis a Paipa y Villapinzón.

Considerando la información poblacional proporcionada por el Departamento nacional de Planeación, para el año actual (2019) Paipa y Villapinzón cuentan con una población de 31 868 y 21 049 habitantes respectivamente, igualmente en forma respectiva, cada municipio tiene un área poblada de 395 Km² o 395.000.000 m² y 235 Km² o 235.000.000m² (DNP, 2018).

Partiendo de una medición hecha con ayuda de herramientas informáticas, fue posible delimitar el área de la población afectada, demarcando el sector contiguo a la doble calzada, en las zonas de estudio. Como se observa en la siguiente Tabla:

Tabla 26. Determinación de la población afectada por kilómetro de vía para las áreas suburbanas de estudio.

| DATOS POR MUNICIPIO | PAIPA | VILLAPINZÓN |
|--|--------------|--------------------|
| ÁREA TOTAL (KM2) | 395 | 235 |
| POBLACIÓN TOTAL (Proyección 2019) | 31868 | 21049 |
| ÁREA URBANA MUNICIPAL (KM2) | 3,32 | 1,12 |
| POBLACIÓN URBANA (Hab) | 20202 | 6993 |
| DENSIDAD POBLACIONAL ÁREA URBANA (Hab/KM2) | 6085 | 6244 |
| ÁREA AFECTADA (FRANJA DE 100 M PARALELOS A LA VÍA) (KM2) | 0,338 | 0,275 |
| POBLACIÓN AFECTADA POR EL RUIDO VEHICULAR DE LA CALZADA DE ESTUDIO (Hab/KM2) | 2069 | 1686 |
| LONGITUD URBANA SOBRE LA VÍA (KM) | 3,36 | 2,17 |
| HABITANTES AFECTADOS POR KM DE VÍA | 616 | 777 |

Fuente. Elaboración propia. Datos de población tomados de (DNP, 2018, pág. terridata 15516 y 25873)

En consecuencia, se determina para Paipa una franja con un área de 0.338 Km², en donde la población afectada se estima en 616 habitantes por kilómetro de vía y para Villapinzón una franja con un área de 0.275 Km², en donde la población afectada se estima en 777 habitantes por kilómetro de vía.

5.4.2. Identificación de las externalidades generados por el ruido vehicular

Las externalidades ambientales están asociadas al impacto de cualquier actividad sobre el medio ambiente y el bienestar de la población, una de sus características más importantes es que no se reflejan en los precios del mercado. La contaminación acústica es una externalidad ambiental causada en este caso por el tráfico vehicular.

El ruido se considera como una externalidad negativa, teniendo en cuenta, su efecto en el precio de las viviendas y los posibles efectos que se evidencian sobre la salud humana.

) **Efectos sobre el precio de las viviendas:** En Colombia son pocos los estudios orientados a la determinación de un porcentaje de devaluación de los predios por decibel de contaminación acústica, sin embargo, existen numerosas investigaciones realizadas en otros países, que sirven como referencia para hacer una cuantificación aproximada de la desvalorización del mercado inmobiliario, en función de la exposición al ruido por tráfico vehicular, en donde en la mayoría de los casos se estiman valores menores al 1% de desvalorización del inmueble por cada dBA.

) **Efectos sobre la salud humana:** inicialmente se hace una comparación entre los niveles de ruido medidos en cada uno de los tramos de estudio con los estándares máximos permisibles establecidos en la resolución 627 del 07 de abril de 2006.

Tabla 27. Comparación de los niveles de ruido promedio en las seis zonas de estudio con la normativa.

| Tramo | Sector | Subsector | Nivel de ruido promedio generado por flujo de tráfico vehicular dB(A) | | Estándares máximos permisibles de niveles de emisión de ruido en dB(A) |
|----------------|---|------------------------------|---|-------|--|
| | | | Mañana | Tarde | |
| Km 116 460-520 | Sector D. Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado | Residencial suburbana | 71,74 | 77,34 | 55 |
| Km 116 760-820 | | | 76,42 | 76,95 | |
| Km 117 520-580 | | | 76,94 | 78,31 | |
| Km 117 920-980 | | | 76,19 | 75,85 | |
| Km 119 780-860 | | | 75,60 | 76.16 | |
| Km 122 100-160 | | | 75,25 | 74,92 | |

Fuente: Elaboración propia

De esta manera es posible confirmar que, para todos los tramos de interés, tanto en horas de la mañana como en horas de la tarde, la exposición de ruido a la que está

sometida la población afectada, supera en todos los casos a los niveles tope expuestos en la norma; entonces, resulta apropiado tratar como una externalidad negativa, a la molestia que ocasiona en el bienestar de los individuos la prolongada exposición a ruido vehicular.

En la siguiente tabla se relacionan algunos de los efectos que el ruido causa en la salud humana, según los decibeles dB(A) a los que se está expuesta la persona.

Tabla 28. Efectos del ruido sobre la salud humana

| Efectos | Niveles de riesgo | Comentarios |
|-------------------------------|--------------------------|--|
| Pérdida de capacidad auditiva | >75 dBA | Niveles frecuentes en muchos lugares de trabajo. |
| Reacción de estrés | >85 dBA >65 dBA | El riesgo está condicionado a la existencia de otros factores personales y ambientales. |
| Interferencia con el sueño | >45 dBA | Este efecto mantenido a largo plazo puede provocar alteraciones permanentes de la salud. |
| Interferencia con actividades | >65 dBA | Muy relacionado con la sensación de molestia y la reacción de estrés. |
| Molestia subjetiva | >65 dBA | A la larga puede producir alteraciones de salud por la reacción de estrés mantenida. |

Fuente: Adaptada del autor con base en Contaminación Acústica (García, 1988)

Siendo así, es acertado afirmar que el ruido ambiental asociado con el flujo de tráfico, puede generar problemas de salud en la población aledaña a las vías suburbanas del departamento de Boyacá y de Cundinamarca (Paipa y Villapinzón, respectivamente); ya que, sus habitantes pueden presentar dificultades fisiológicas en cuanto a pérdida de audición y complicaciones psicológicas, relacionadas con estrés e irritabilidad exagerada.

5.4.3. Descripción y cuantificación de las técnicas de mitigación planteadas

Una vez conocidas las externalidades a las cuales están expuestas las poblaciones de las franjas trazadas sobre los municipios de Villapinzón, Cundinamarca y de Paipa, Boyacá; se procede a definir y describir las técnicas de mitigación que se plantean implementar para atenuar los efectos negativos que les ocasionan a los habitantes cercanos a la doble calzada (BTS) sentido Duitama-Tunja, la alta exposición a ruido vehicular.

La primera alternativa consiste en localizar barreras de ruido entre la vía y la población más cercana a ella y la segunda va orientada más hacia el mantenimiento directo de la vía.

5.4.3.1 Barreras de ruido

Las barreras de ruido, también conocidas como pantallas acústicas son estructuras verticales lineales, apoyadas por acción de la gravedad sobre el suelo, y cuya altura es considerablemente mayor a su espesor; se ubican justo en medio de un foco generador de ruido y un receptor, ya que, su objetivo principal es comportarse como obstáculo que difracte las ondas sonoras provenientes del foco, y que cree una sombra que atenúe los niveles de ruido a los que está expuesto el receptor.

) **Determinación del costo de barreras acústicas viales**

En Colombia no es usual encontrar barreras de ruido instaladas cerca de las vías, quizá porque en el país el ruido aún no se considera como un problema relevante; no obstante, la afectación a la población sigue estando presente y resulta interesante conocer en qué medida estas barreras reducirían los niveles de ruido y qué precio acarrearía llegar a implementar esta alternativa como solución a los impactos negativos ya mencionados.

Pese a que en el país la mayoría de las empresas dedicadas al diseño y construcción de barreras acústicas se enfocan específicamente en temas industriales; fue posible contactar a dos de estas empresas, quienes propusieron una cotización aproximada del costo de una barrera acústica, bajo un predimensionamiento parcial; el cual se tuvo en cuenta para efectos de la investigación, ya que, un estudio concienzudo respecto a un diseño y a una cotización formal, acarrearía altos costos adicionales.

Inicialmente se tuvo que suministrar datos de entrada para que los ingenieros acústicos trabajarán en el predimensionamiento de la barrera, y dependiendo de esto, pudiesen calcular un costo por metro cuadrado.

Tabla 29. Datos iniciales suministrados a las empresas

| | |
|--|-----------------------------|
| Fuente de contaminación | Ruido por tráfico vehicular |
| Niveles de contaminación acústica | 70-75 (dBA) |
| Ubicación 1 | Paipa (Boyacá) |
| Ubicación 2 | Villapinzón (Cundinamarca) |
| Distancia de los receptores al foco | Apróx 15 m |
| Longitud de la barrera | 1 Km |

Fuente: Elaboración Propia

La distancia que se estipuló respecto a la ubicación de la población afectada, se determinó a través de una inspección visual realizada en las zonas de estudio a través de google earth. Y la longitud de la barrera se asumió como un 1 Km lineal, teniendo en cuenta que se busca llevar a cabo un ejercicio representativo en comparación con la realidad actual, vivida por la población aledaña a la doble calzada (sentido Duitama- Tunja) en los municipios de Paipa y de Villapinzón.

La siguiente tabla resume la información más relevante de cada cotización, ambas empresas propusieron dimensiones relativamente parecidas en cuestión de altura y de espesor, la única variación significativa es el material de relleno de la barrera, puesto que, los dos diseños proponen paneles tipo sándwich.

Tabla 30. Cotización Barrera Acústica Vial en Colombia

| Empresa | Dimensiones | | Material | Sombra Acústica (dBA) | Precio por m ² (\$) |
|---------|-------------|-------------|---|-----------------------|--------------------------------|
| | Altura (m) | Espesor (m) | | | |
| 1 | 2.4 | 0,04 | Panel tipo sándwich rellenos con poliuretano | 15 | 1.500.000 |
| 2 | 4 | 0,05 | Panel tipo sándwich rellenos de lana mineral de roca densidad 60Kg/m ³ . | 15 | 2'150.000 |

Fuente: Elaboración propia

Para determinar el costo por decibel reducido se trabaja con una franja de un metro lineal de barrera es decir con el valor de 2.4 y de 4 metros cuadrados por barrera, respectivamente, y obtenidos estos datos, se procede a dividir por el nivel promedio de reducción que ofrece la sobra acústica, es decir por 15 (dBA).

Teniendo en cuenta las recomendaciones de la OCDE para los criterios de diseño de barreras acústicas, se toma como referencia 15 años de vida útil o de durabilidad, siendo éste el menor valor estimado. Teniendo en cuenta el posible deterioro por las acciones del viento, el tráfico y la estabilidad a largo plazo en nuestro entorno.

Se estima un tiempo de diez (10) horas tiempo en que se asume que podría estar afectada una persona y así poder determinar el costo del ruido por día y por hora de afectación, obteniendo:

Tabla 31. Determinación del costo por decibelio por día y por cada hora, para implementación de barreras de ruido.

| Empresa | | Cotización empresa 1 | Cotización empresa 2 |
|---------------------------------|------------------------------------|--|--|
| Dimensiones | Altura (m) | 2,4 | 4 |
| | Espesor (m) | 0,04 | 0,05 |
| Material | | Panel tipo sándwich rellenos con poliuretano | Panel tipo sándwich rellenos de lana mineral de roca densidad 60Kg/m3. |
| Sombra Acústica (dBA) | | 15 | 15 |
| Precio por m2 (\$) | | 1.500.000 | 2.150.000 |
| Precio por KM de barrera (\$) | | 3.600.000.000 | 8.600.000.000 |
| Precio por dBA/km (\$) | | 240.000.000 | 573.333.333 |
| Tiempo de vida útil (años) | | 15 | 15 |
| Tiempo de vida útil (días) | | 5.475 | 5.475 |
| Precio por dBA/km por día (\$) | | 43.836 | 104.718 |
| Precio por dBA/km por hora (\$) | [Tomando como referencia 10 horas] | 4.384 | 10.472 |

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al análisis de costos de mitigación con barreras de ruido, obtenemos que para una barrera de 2.4 metros de altura y espesor de 4cm, con rellenos de poliuretano que disminuye el ruido en aproximadamente 15 dBA, el costo por decibel dBA reducido por cada kilómetro de vía durante el tiempo de vida útil es de \$43.836 pesos/dBA x día, en consecuencia, el costo por decibel para un kilómetro de vía por cada hora es de \$4.384; mientras que para la barrera de 4 metros de altura y espesor de 5cm con relleno en lana mineral y roca densa cuya disminución de ruido se estima en promedio de 15 dBA, el costo por decibel dBA reducido por cada kilómetro de vía durante el tiempo de vida útil es de \$104.718 pesos/dBA x día, por lo tanto el costo por decibel para un kilómetro de vía por cada hora es de \$10.472.

A partir de la información obtenida de población afectada y el costo por decibel por cada hora, es posible determinar el costo por decibelio por hora por persona para las poblaciones de Paipa y Villapinzón, de esta manera obtenemos:

Tabla 32. Determinación del costo por decibelio por cada hora por habitante, para barreras de ruido, en los entornos de referencia de estudio.

| MUNICIPIO | PAIPA | VILLAPINZÓN |
|---|--------------|--------------------|
| Habitantes afectados por km de vía | 616 | 777 |
| Precio por dBA/km por hora (\$) Cotización 1 | 4.384 | 4.384 |
| Precio por dBA/km por hora (\$) Cotización 2 | 10.472 | 10.472 |
| Costo de mitigación dBA/Hora por habitante (\$) Cotización 1 | 7 | 6 |
| Costo de mitigación dBA/Hora por habitante (\$) Cotización 2 | 17 | 13 |

Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior podemos observar que el costo de mitigación por decibel (dBA) / hora por habitante es de siete pesos (\$7) para el municipio de Paipa y seis pesos (\$6) para el municipio de Villapinzón, para una barrera de 2.4 metros de altura y espesor de 4cm, con rellenos de poliuretano; igualmente, el costo de mitigación por decibel (dBA) / hora por habitante es de diecisiete pesos (\$17) para el municipio de Paipa y trece pesos (\$13) para el municipio de Villapinzón, para una barrera de 4 metros de altura y espesor de 5cm con relleno en lana mineral y roca densa.

En consecuencia, el costo de mitigación para los habitantes de Paipa es de dos mil cien pesos (\$2.100) mensuales o veinticinco mil doscientos pesos (\$25.200) anuales. Igualmente, para los habitantes de Villapinzón el costo es de (\$1.800) mensuales o (\$21.600) anuales.

De esta manera es posible concluir que los costos de mitigación con barreras acústicas en las zonas de estudio, resulta parecer una alternativa bastante costosa, pero como se acaba de observar la acción sobre cada persona puede causar un impacto de gran trascendencia.

5.4.3.2 Mantenimiento vial

El mantenimiento vial es otra de las alternativas propuestas, con esta técnica de mitigación se busca aumentar el nivel de funcionabilidad de la doble calzada, justamente en los tramos que colindan con la población de Paipa y de Villapinzón; lo anterior con el objetivo de atenuar los niveles de contaminación acústica a la que está sometida la población de estudio. Como el punto clave dentro de la investigación es el estado superficial del pavimento, el mantenimiento propuesto se enfocará hacia el control del IRI (Índice de Rugosidad Internacional).

Para el caso de estudio se tendrá en cuenta la actividad de recuperación de la carpeta, por lo tanto, se determina el costo de las actividades de Fresado de la vía, imprimación e instalación de carpeta asfáltica. En consecuencia, se realiza el presupuesto estimado para la recuperación de la carpeta asfáltica de un carril de la calzada en un tramo de un kilómetro (1Km). Se toma un ancho de calzada de 3.5 metros.

Los precios unitarios se tomaron del listado de precios de referencia del Instituto Nacional de Vías para el año 2019, para el Departamento de Boyacá.

Tabla 33. Presupuesto general para la recuperación de la carpeta asfáltica un tramo de 1 Km

| PRESUPUESTO ESTIMADO | | | | | |
|--|---|---------------|----------|-----------------|--------------------------|
| TRABAJO DE GRADO | | | | | |
| DETERMINACION DE LA RELACION ENTRE EL INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL IRI Y LA GENERACION DE RUIDO VEHICULAR | | | | | |
| ITEM | DESCRIPCIÓN | UNIDAD | CANT | V/UNITARIO | V/PARCIAL |
| 1 | MANTENIMIENTO VIAL | | | | |
| 1.1 | OBRA CIVIL | | | | \$ 409.862.600,00 |
| 101 | FRESADO DE UN PAVIMENTO ASFALTICO EN ESPESOR DE 10 CM | M2 | 3.500,00 | \$ 4.579,00 | \$ 16.026.500,00 |
| 102 | IMPRIMACION CON EMULSION ASFALTICA | M2 | 3.500,00 | \$ 3.860,00 | \$ 13.510.000,00 |
| 103 | Mezcla Densa en Caliente tipo MDC-25 | M3 | 350,00 | \$ 1.086.646,00 | \$ 380.326.100,00 |
| TOTAL COSTOS DIRECTOS | | | | | \$ 409.862.600,00 |
| Administración OBRA CIVIL | | 23,50% | | | \$ 96.317.711,00 |
| Imprevistos | | 2,5% | | | \$ 10.246.565,00 |
| Utilidad | | 4,0% | | | \$ 16.394.504,00 |
| Valor total A.I.U. | | 30% | | | \$ 122.958.780,00 |
| Valor Total de la Obra | | | | | \$ 532.821.380,00 |
| Ajuste al Peso | | | | | \$ - |
| Valor Total de la Obra (Ajustado al Peso) | | | | | \$ 532.821.380,00 |

Fuente: Elaboración Propia

De la anterior tabla observamos que el precio para la recuperación de un carril de la calzada de (3.5) metros de ancho, en una longitud de un (1) kilometro es de QUINIENTOS TREINTA Y DOS MILLONES OCHOCIENTOS VEINTE UN MIL

TRESCIENTOS OCHENTA PESOS (\$532'821.380), tomando un AIU del 30%. En consecuencia, éste sería el costo estimado para mejorar las condiciones de rodadura en un carril de vía, de un IRI malo o regular a un IRI bueno.

Teniendo en cuenta las recomendaciones de la Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras de INVIAS, tomado como refuerzo de la estructura del pavimento las obras de recuperación de la carpeta, debe tomarse un periodo de diseño de 12 años, de acuerdo a las características de la vía y la categoría del tránsito que para este caso es NT3.

Al igual que para las barreras de ruido, se estima un tiempo de diez (10) horas tiempo en que se asume que podría estar afectada una persona y así poder determinar el costo del ruido por día y por hora de afectación, obteniendo:

Tabla 34. Determinación del costo por decibelio por día y por cada hora, para recuperación de la carpeta asfáltica.

| Recuperación de carpeta asfáltica para 1 KM de vía | | Recuperación de un carril ancho 3,5m | Recuperación de un carril ancho 7,0m |
|---|---|---|---|
| Actividades contempladas | | Fresado de la vía, imprimación e instalación de carpeta asfáltica | Fresado de la vía, imprimación e instalación de carpeta asfáltica |
| Precio de la recuperación de la carpeta asfáltica por KM por carril (\$) | | 532.821.380 | 1.065.642.760 |
| Precio por dBA/km (\$) | | 532.821.380 | 1.065.642.760 |
| Tiempo de vida útil (años) | | 12 | 12 |
| Tiempo de vida útil (días) | | 4.380 | 4.380 |
| Precio por dBA/km por día (\$) | | 121.649 | 243.297 |
| Precio por dBA/km por hora (\$) | [Tomando como referencia 10 horas] | 12.165 | 24.330 |

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al análisis de costos de mitigación con la recuperación de la carpeta asfáltica con el fin de mejorar las condiciones de IRI, obtenemos que para la recuperación de un carril de la calzada de 3.5 metros de ancho que disminuye el ruido en aproximadamente 1 dBA, el costo por decibel dBA reducido por cada kilómetro de vía durante el tiempo de vida útil es de \$121.649 pesos/dBA x día, en consecuencia, el costo por decibel para un kilómetro de vía por cada hora es de \$12.165; mientras que para recuperación de la calzada completa de 7.0 metros de ancho que disminuye el ruido en aproximadamente 1 dBA, el costo por decibel dBA

reducido por cada kilómetro de vía durante el tiempo de vida útil es de \$243.297 pesos/dBA x día, por lo tanto el costo por decibel para un kilómetro de vía por cada hora es de \$24.330.

Finalmente, a partir de la información obtenida de población afectada y el costo por decibel por cada hora para el mantenimiento vial, es posible determinar el costo por decibelio por hora por persona para las poblaciones de Paipa y Villapinzón, de esta manera obtenemos:

Tabla 35. Determinación del costo por decibelio por cada hora por habitante, para el mantenimiento vial, en los entornos de referencia de estudio.

| MUNICIPIO | PAIPA | VILLAPINZÓN |
|--|-----------|-------------|
| Habitantes afectados por km de vía | 616 | 777 |
| Precio por dBA/km por hora (\$) ancho de carril 3,5 m | 12.165 | 12.165 |
| Precio por dBA/km por hora (\$) ancho de carril 7,0 m | 24.330 | 24.330 |
| Costo de mitigación dBA/Hora por habitante (\$) ancho de carril 3,5 m | 20 | 16 |
| Costo de mitigación dBA/Hora por habitante (\$) ancho de carril 7,0 m | 39 | 31 |

De la tabla anterior podemos observar que el costo de mitigación por decibel (dBA) / hora por habitante es de veinte pesos (\$20) para el municipio de Paipa y dieciséis pesos (\$16) para el municipio de Villapinzón, para el mantenimiento vial de un kilómetro de vía en un carril de calzada de 3.5m; igualmente, el costo de mitigación por decibel (dBA) / hora por habitante es de treinta y nueve pesos (\$39) para el municipio de Paipa y treinta y un pesos (\$31) para el municipio de Villapinzón, para el mantenimiento vial de un kilómetro de vía en una calzada de 7.0m.

En consecuencia, teniendo en cuenta que la reducción estimada es de 1 decibelio, el costo de mitigación para los habitantes Paipa es de seis mil pesos (\$6.000) mensuales o setenta y dos mil pesos (\$72.000) anuales. Igualmente, para el municipio de Villapinzón los costos de mitigación son de (\$4.800) mensuales o (\$57.600) anuales.

De esta manera, es posible concluir que los costos de mitigación estimados para la alternativa del mantenimiento vial aparentemente son altos, sin embargo, se toma la valoración del ruido desde la óptica de unas obras de mitigación, sin considerarse otros beneficios de las obras de mejoramiento de la carpeta como son la seguridad, los tiempos de viaje por aumentos de la velocidad, los ahorros de costos de operación por la transitabilidad de la vía, entre otros.

6. CONCLUSIONES

-) El impacto del ruido del tráfico es una de las externalidades más reconocidas en el sector transporte, siendo uno de los aspectos a tener en cuenta a la hora de diseñar una carretera, el ruido vehicular causa problemas en la sociedad y más que una molestia, se reconoce como un impacto que produce dificultades fisiológicas en cuanto a pérdida de audición; y psicológicas relacionadas con estrés e irritabilidad exagerada que a su vez puede generar afectación del sistema cardiovascular, el cual puede convertirse en una enfermedad crónica, con consecuencias críticas sobre la productividad, el absentismo y la vida misma.
-) El ruido vehicular en la zona en estudio, que es la vía doble calzada Briceño - Tunja – Sogamoso, supera los niveles máximos permitidos por la resolución 625 de 2006 del Minambiente para este tipo de vías en más de 20 (dBA), medido a una distancia de 1.5m del carril externo de la calzada.
-) Teniendo en cuenta que los niveles de ruido obtenidos ascienden a los 75 dB (A) en la mañana y en la tarde para todos los casos, se infiere que el ruido ambiental asociado con el flujo de tráfico, puede generar problemas de salud en la población aledaña a las vías suburbanas del departamento de Boyacá y de Cundinamarca (Paipa y Villapinzón, respectivamente); ya que, sus habitantes pueden presentar dificultades fisiológicas en cuanto a pérdida de audición y complicaciones psicológicas, relacionadas con estrés e irritabilidad exagerada.
-) Se pudo establecer un modelo que relaciona el nivel de ruido vehicular – Leq (decibelios) en función del Índice de Rugosidad Internacional – IRI, el volumen de vehículos livianos y de vehículos comerciales. Es un modelo que, según el coeficiente de determinación R^2 , el 49% de la variación observada en los niveles de ruido se pueden atribuir a cambios en las variables del modelo.
$$Leq = 64,634 + 0,246IRI + 2,090Log_{10}(nA) + 7,826Log_{10}(nC)$$
-) El IRI de acuerdo a los análisis estadísticos es significativo en la generación de ruido vehicular, obteniendo un aumento de 0,24 dBA por cada unidad

incrementada en el valor del IRI. Sin embargo, el ruido vehicular está representado en mayor medida por el tráfico vehicular, principalmente por el volumen de vehículos comerciales en donde se presentan variaciones de hasta 10 dBA aproximadamente de acuerdo al análisis de sensibilidad realizado.

-) Los costos de mitigación estimados para la implementación de barreras acústicas son de \$2.100 mensuales o \$25.200 anuales por persona por decibelio. Por otra parte, los costos de mitigación, para la recuperación vial de un carril de la calzada es de \$6.000 mensuales o \$72.000 anuales por cada habitante, sin embargo, los costos de mitigación estimados para la alternativa del mantenimiento vial son aparentemente altos, sin embargo, se toma la valoración del ruido desde la óptica de unas obras de mitigación, sin considerarse otros beneficios de las obras de mejoramiento de la carpeta como son la seguridad, los tiempos de viaje por aumentos de la velocidad, los ahorros de costos de operación por la transitabilidad de la vía, entre otros.
-) La sociedad debe encontrar los mecanismos para el financiamiento de las obras como éstas de mitigación, para disminuir el impacto en la afectación en la salud y la calidad de vida de las personas que habitan en áreas aledañas a las vías de estudio.

7. COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES

Si bien este estudio se realizó de la manera más rigurosa posible, se presentaron algunos aspectos que influyeron en la precisión de los datos. Sin embargo, es un estudio que brinda elementos importantes para el diseño y realización de estudios futuros que podrían ser mejorados teniendo en cuenta, entre otros, las siguientes recomendaciones:

-) Seleccionar abscisas con las mismas características a las de este estudio, pero sin que el ruido de la calzada contraria influya en la medición, puede ser que tenga un separador con barrera natural o que esté suficientemente alejado. Si no es posible, se debería hacer una doble medición simultánea en los dos carriles.
-) Tener en cuenta la composición de motocicletas, por cuanto son una fuente importante de ruido que no es debido a la fricción con el pavimento sino a la explosión del motor.
-) Evitar al máximo que los conductores cambien su marcha normal porque vean el radar; y de esta forma poder establecer la contribución de las velocidades de los vehículos al incremento del ruido, por fricción de sus neumáticos en el pavimento.
-) Para hacer la valoración económica de forma más precisa, aplicar encuestas a los residentes y trabajadores de la zona para cuantificar el impacto del ruido vehicular. También se podría complementar con información de los sistemas de salud de la zona si está disponible, sobre problemas de salud asociados con el ruido.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la rugosidad del pavimento medida a través del IRI asociado con el flujo del tráfico describen el comportamiento del ruido en un 49%, es decir que el 49% de la variabilidad se debe al modelo y el resto a factores que en campo no se pueden controlar, teniendo en cuenta que el ruido es multifactorial, a pesar de controlar variables como el clima, la pendiente de la vía, velocidades superiores a 60 Km/h, áreas sin obstáculos que afectaran la

propagación del ruido, entre otras. Existen variables que son difíciles de controlar y que afectan la medición del ruido, como el tráfico que cruza por la calzada opuesta, las hojas de los árboles en presencia de fuertes vientos, el paso de motocicletas con motores antiguos, el uso de la bocina de algunos vehículos, el uso eventual del freno de motor en vehículos de carga, el desplazamiento del aire por la velocidad de los vehículos, entre otros.

De acuerdo al análisis de costos de mitigación con barreras de ruido, obtenemos que la implementación es bastante costosa, ocasionando la búsqueda de alternativas que generen menos impacto visual y económico en la población.

Recomendaciones adicionales para trabajos futuros

Es importante evaluar y controlar el mayor número de variables posibles, además de las variables que se controlaron en el presente estudio como las condiciones de clima, la pendiente de la vía, las velocidades mayores a los 60 Km/h, espacios abiertos, entre otros; es importante medir variables como la determinación del tránsito que circula por el carril opuesto, la composición de motocicletas que transitan en la vía y la medición de las velocidades de la totalidad de los vehículos; las cuales podrían medirse con equipos de medición de ruido y equipos tecnológicos como drones, cámaras de alta precisión, radares de alta precisión, entre otros. Determinando el mayor número de variables que puedan describir e influir en el comportamiento del ruido del tráfico.

Se podría implementar un proyecto en similares condiciones y sitios de estudio, teniendo en cuenta que en algunos de los tramos se han realizado mantenimientos y reposición de carpeta asfáltica por parte de la concesión encargada.

Se podrían determinar los niveles de ruido y realizar la valoración económica de forma más precisa, aplicando encuestas a las poblaciones de referencia con el fin de implementar métodos como el de precios hedónicos para determinar la disponibilidad a pagar por la externalidad del ruido y determinar posibles afectaciones de salud relacionadas con el ruido en las poblaciones aledañas.

Teniendo en cuenta que la variable que genera mayor influencia en la generación de ruido vehicular es el número de vehículos comerciales, se podría implementar un estudio en donde se determine si el modelo (año de fabricación) de los vehículos comerciales y su configuración aerodinámica influye en la generación de ruido vehicular. Se podría determinar con los equipos de medición de ruido, la ayuda de herramientas audiovisuales y la consulta en el Registro Único Nacional de Tránsito.

BIBLIOGRAFÍA

- Barrantes Jiménez, R., Badilla Vargas, G., & Sibaja Obando, D. (2009). Definición de rangos para la clasificación estructural y funcional de la red vial de Costa Rica. *Ingeniería*, 20((1 y 2)), 109-119. Obtenido de <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/24325>
- Serrano Pérez, M., Abad Toribio, L., Magro Andrade, R., & García Martín, T. (Junio de 2009). *Estudio de la tipología de las pantallas acústicas. Normativa y estado del arte*. Obtenido de Revista Tecnología y Desarrollo. Universidad Alfonso X el Sabio: http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECMAD09_002.pdf
- Alegre, D., & Domínguez, J. (s.f.). *Materiales para Pantallas Antiruido*. Obtenido de Soluciones tipo más usuales: http://www3.uah.es/tiscar/Complem_EIA/tipos-pantallas-acusticas.pdf
- Asamblea de Boyacá. (31 de mayo de 2016). *Ordenanza número 007. Por la cual se adopta el Plan de Desarrollo de Boyacá - Creemos en Boyacá, tierra de paz y libertad. 2016-2019*. Obtenido de Gobernación de Boyacá: <http://www.boyaca.gov.co/images/planes/plan-de-desarrollo/pdd-creemos-en-boyaca.pdf>
- Associates in Acoustics Inc. (Enero de 2009). *Manual del Estudiante. Ruido-Madición y sus Efectos*. Obtenido de © 2009 Associates in Acoustics, Inc, BP International Limited and the University of Wollongong : <http://www.ohlearning.com/Files/Student/JC22%20v1-0%2009Apr10%20W503%20Manual%20del%20estudiante%201.pdf>
- Badilla Vargas, G., Elizondo Arrieta, F., & Barrantes Jiménez, R. (noviembre de 2008). *Determinación de un procedimiento de ensayo para el calculo del IRI*. Obtenido de <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/publicaciones/ui-03-08.pdf>
- Bateman, I., Day, B., Lake, I., & Lovett, A. (Enero de 2001). *The Effect of Road Traffic on Residential Property Values: A Literature Review and Hedonic Pricing Study*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/265483928_The_Effect_of_Road_Traffic_on_Residential_Property_Values_A_Literature_Review_and_Hedonic_Pricing_Study
- Casado-García, M. E. (s.f.). *Redes de ponderación acústica*. Obtenido de https://www.academia.edu/34849204/Redes_de_Ponderaci%C3%B3n_Ac%C3%B3stica
- Chávez Miranda, J. R. (abr-jun de 2006). Ruido: Efectos Sobre la Salud y Criterio de su Evaluación al interior de recintos. *Ciencia y Trabajo*, 8(20), 42-46.

- Comunidad Andina. (2007). Sobre la Valoración Económica Ambiental. *Revista de la Integración*, 40-43. Obtenido de http://www.comunidadandina.org/StaticFiles/2011102418157revista_integracion_1.pdf
- DANE. (2005). *Proyecciones de población*. Obtenido de Estimaciones y proyecciones de población: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
- DNP. (2018). *Terridata. Sistema de Estadísticas Territoriales*. Obtenido de Departamento Nacional de Planeación. Gobierno de Colombia : <https://terridata.dnp.gov.co/index-app.html#/descargas>
- Domingo, R. B. (2013). *Acustica Medioambiental Vol. II (Vol. 2)*. San Vicente (Alicante): Editorial Club Universitario. Obtenido de <https://play.google.com/books/reader?id=cfAtDwAAQBAJ&hl=es&pg=GBS.PA279>
- ECl. (junio de 2019). *Laboratorio de condiciones de trabajo. Ruido*. Obtenido de Escuela Colombiana de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Industrial: http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/7863_ruido.pdf
- El ruido.com. (s.f.). *Enfermedades auditivas*. Obtenido de Ubicación de la patología orgánica: <http://www.elruido.com/portal/web/guest/enfermedades-auditivas>
- García, A. (1988). *La contaminación acústica*. Valencia : Universitat de Valencia Servicio de Publicaciones .
- GTZ. (2000). *El ruido y su mitigación. Módulo 5c. Transporte sostenible: Texto de referencia para formuladores de políticas públicas en ciudades de desarrollo*. Obtenido de Proyecto de Transporte Urbano Sostenible GIZ - GIZ SUTP: https://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/A_Sourcebook/SB5_Environment%20and%20Health/GIZ_SUTP_SB5c_Noise-and-its-Abatement_ES.pdf
- INVIAS . (2012). *Normas y Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras* . Obtenido de Instituto Nacional de Vías- INVIAS: <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>
- INVIAS . (2014). *Evaluación de Corredores Viales de Mantenimiento Integral* . Obtenido de Secretaria General Técnica: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/servicios-al-ciudadano/proyectos-invias/606-nuevas-evaluaciones-de-los-corredores-viales/file>
- INVIAS. (11 de abril de 2013). *Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras*. Obtenido de Colombia. Instituto Nacional de Vías - INVIAS: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/986-guia-metodologica-para-el-diseno-de-obras-de-rehabilitacion-de-pavimentos-asfalticos-de-carreteras>
- INVIAS. (2013). *Norma I.N.V. E – 790 – 13. Determinación del Índice Internacional de Rugosidad (IRI) para medir la rugosidad (irregularidades de la superficie) de los*

- pavimentos*. Obtenido de Colombia. Instituto Nacional de Vías - INVIAS:
[ftp://ftp.ani.gov.co/Licitaci%C3%B3n%20VJVGCLP%20001-2016-M-1/Normas%20de%20Ensayo%20de%20materiales%20para%20carreteras/SECCIONES%20700%20Y%20800%20\(segunda%20parte\)mod_2013-NOV-15.pdf](ftp://ftp.ani.gov.co/Licitaci%C3%B3n%20VJVGCLP%20001-2016-M-1/Normas%20de%20Ensayo%20de%20materiales%20para%20carreteras/SECCIONES%20700%20Y%20800%20(segunda%20parte)mod_2013-NOV-15.pdf)
- Lavaud, P. (2011). *Importancia del índice de la regularidad superficial (iri) en la construcción de pavimentos asfálticos en caliente*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/castilloaroni/importancia-del-ndice-de-rugosidad-internacional-iri-en-la-construccin-de-pavimentos>
- Marrades, D. M. (marzo-abril de 2008). *Medidas correctoras de impacto acústico en infraestructuras (I/II)*. Obtenido de Pantallas acústicas y otros dispositivos reductores de ruido para carreteras y ferrocarriles:
https://www.ica.es/contenidos/publicaciones/anales_get.php?id=1504
- Minambiente. (18 de Diciembre de 2003). *Metodología para la Valoración Económica de Bienes, Servicios Ambientales y Recursos Naturales*. Obtenido de Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial:
http://tramitesccu.cra.gov.co/normatividad/admon1202/files/RESOLUCION_MAVDT_1478_DE_2003.pdf
- Minambiente. (7 de abril de 2006). *Resolución 627 de 2006. Por la cual se establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental*. Obtenido de Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial:
http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/norma_ruido/Resolucion_627_de_2006_-_Norma_nacional_de_emision_de_ruido.pdf
- Minsalud. (4 de agosto de 1983). *Resolución 8321 de 1983. Por la cual se dictan normas sobre Protección y conservación de la Audición de la Salud y el bienestar de las personas, por causa de la producción y emisión de ruidos*. Obtenido de Colombia. Ministerio de Salud:
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=6305>
- Minsalud. (02 de Marzo de 2015). *Ruido excesivo en entornos, una de las principales causas para pérdida auditiva*. Obtenido de Ministerio de Salud y Protección Social : <https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Ruido-excesivo-en-entornos-una-de-las-principales-causas-para-perdida-auditiva.aspx>
- MinTransición Ecológica-España. (s.f.). *Conceptos Básicos del ruido ambiental*. Obtenido de Gobierno de España - Ministerio para la Transición Ecológica : https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/contaminacion_acustica_tcm30-185098.pdf
- Miyara, F. (s.f.). *Acústica y sistemas de sonido*. Recuperado el 2019, de https://www.academia.edu/12454207/Acustica_y_sistemas_de_sonido_Federico_Miyara
- Miyara, F. (s.f.). *Niveles sonoros*. Recuperado el 2019, de Biblioteca virtual. Universidad Nacional de Rosario: <https://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/niveles.htm>

- OCDE y MOPTMA . (1995). *Reducción del ruido en el entorno de las carreteras*. Obtenido de España. Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente: https://www.fomento.es/recursos_mfom/1410400_0.pdf
- OMS. (1999). *Guía para el ruido urbano*. (B. Berglund, T. Lindvall, & D. H. Schwela, Edits.) Obtenido de Organización Mundial de la Salud: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/965/course/section/1090/Guias%2520para%2520el%2520ruido%2520urbano.pdf>
- OPS. (2010). *Defensa del transporte público seguro y saludable. Fomento de la participación del Sector Sanitario en un marco multisectorial*. Obtenido de Organización Panamericana de la Salud: http://iris.paho.org/xmlui/bitstream/handle/123456789/28274/9789275331408_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Orozco y Orozco, J. M., Téllez Gutiérrez, R., Solorio Murillo , R., Pérez Salazar , A., Sánchez Loo , M. A., & Torras Ortiz , S. (2004). *Sistema de evaluación de pavimentos. Versión 2.0*. Obtenido de México. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt245.pdf>
- Ortiz, J. G. (2010). *208042 – ACUSTICA Y FUNDAMENTOS DEL SONIDO (E-Learning)* . Obtenido de UNAD- Escuela de Ciencias Basicas, Tecnologia e Ingenieria : https://www.arauacustica.com/files/publicaciones_relacionados/pdf_esp_377.pdf
- Osorio Múnera, J. D., & Correa Restrepo, F. (enero-junio de 2004). Valoración Económica de Costos Ambientales: Marco Conceptual y Métodos de Estimación. *Semestre Económico*, 7(13), 159-193. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1650/165013657006.pdf>
- RAE. (febrero de 2019). *Real Academia Española de la Lengua*. Obtenido de <https://dle.rae.es/?id=YMV5Hqd>
- Ramírez Gonzalez, A., & Domínguez Calle, E. A. (Diciembre de 2011). El ruido vehicular urbano: problemática agobiante de los países en vía de desarrollo. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias* , 35(137), 509 - 530.
- Roa, M. M., Torres, H. E., Chaparro, A. V., & Cristancho, C. E. (14 de Octubre de 2009). *Costos de Mitigación*. Obtenido de Fundación Universitaria de Sangil: <http://es.slideshare.net/guest972511/costos-de-mitigacion>
- Rodríguez P., M. (2000). Sonido y ruido, ¿Salud o enfermedad? *Gaceta Universitaria*, 24.
- Romero, J. A., & Lozano, A. (1995). *LA RESPUESTA DINAMICA DE UN CUARTO DE CARRO Y EL INDICE INTERNACIONAL DE RUGOSIDAD*. Obtenido de Instituto Mexicano de Transporte. Secretaria de Comunicaciones y Transporte: <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt67.pdf>
- Ruiz Padillo, D. P. (s.f.). *Comentarios sobre los distintos tipos de sonómetros, sus especificaciones técnicas y usos*. Recuperado el Febrero de 2019, de Universidad de Granada: https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2016-08-06_03-45-28135944.pdf

- Safety Instruments. (s.f.). *Safety Instruments Ltda.* Recuperado el mayo de 2019, de http://www.safetyinstruments.com.co/?option=com_virtuemart&view=productdetails&virtuemart_product_id=51&virtuemart_category_id=31&Itemid=123
- Sandoval, A. M. (Junio de 2005). *Ruido por tráfico urbano: conceptos, medidas descriptivas y valoración económica.* Obtenido de Revista de Economía y Administración. Universidad Autónoma de Occidente: http://www.uao.edu.co/sites/default/files/RUIDO_0.PDF
- SDA. (julio de 2019). *Información general sobre la problemática de ruido.* Obtenido de Secretaría Distrital de Ambiente. Alcaldía Mayor de Bogotá.: : <http://ambientebogota.gov.co/web/sda/ruido>
- UCR. (julio de 2014). *CIRCULAR NÚMERO LM-PI-C1. Estudios técnicos realizados para la aplicación del Índice de Regularidad Internacional (IRI) en Costa Rica.* Obtenido de Universidad de Costa Rica. Programa de infraestructura de transporte: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1369/LM-PI-C1%20Investigaciones%20en%20Infraestructura%20del%20transportes.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ANEXOS

-) Base de datos de las variables IRI, Volumen vehicular, Velocidade y Ruido
-) Datos de IRI
-) Base de daros volumen vehicular