

RAE

1. **TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO DE SONIDO.
2. **TÍTULO:** ESTUDIO DE NORMATIVA Y PROPUESTA DE PROTOCOLO DE MEDICIÓN PARA RUIDO FERROVIARIO.
3. **AUTORES:** Andrés Felipe González Lozano.
4. **LUGAR:** Bogotá, D.C
5. **FECHA:** Noviembre de 2017
6. **PALABRAS CLAVE:** Acústica, Mediciones Acústicas, Ruido, Control de Ruido, Trenes, Tráfico Rodado, Normativa Internacional, Normativa Nacional.
7. **DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** El objetivo principal de este proyecto es el planteamiento de un protocolo de medición para ruido ferroviario que pueda ser aplicado al tren de La Sabana de Bogotá, teniendo como base para su desarrollo distintas normativas de uso actual a nivel internacional. Demostrando a su vez la importancia de plantear una metodología que cumpla con las características específicas de movilidad férrea en Colombia.
8. **LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN:** Línea de Investigación de la USB: Tecnologías actuales y sociedad. Sub línea de Facultad de Ingeniería: Medición de ruido ferroviario. Programa: Acústica Ambiental.
9. **METODOLOGÍA:** Es de carácter mixta debido a que se va a realizar una medición de ruido cuyos valores van a ser analizados e interpretados de acuerdo al protocolo que se propone.
10. **CONCLUSIONES:** La disimilitud que hay entre las mediciones y simulaciones cuyo resultado es distinto entre sí fue causada por las variaciones que hubo en los niveles de ruido de fondo principalmente, ya que el tiempo de medición de ruido de fondo debió ser igual al tiempo de medición del evento sonoro definido, es decir de 1 hora. Por otra parte, se concluyó que el orden correcto para calibrar un software de simulación, es primero realizar la medición en campo y luego de esto, debido a la considerable cantidad de parámetros modificables, se calibra el software de simulación teniendo como referencia los resultados que se obtienen en la práctica. Al modificar dentro del software los valores de emisión de ruido que interactúan en el punto de evaluación, a 7,5m de la vía del tren, se logra la aproximación deseada entre los resultados de las prácticas de campo y las simulaciones.

**ESTUDIO DE NORMATIVA Y PROPUESTA DE PROTOCOLO DE MEDICIÓN PARA
RUIDO FERROVIARIO**

ANDRÉS FELIPE GONZÁLEZ LOZANO

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA DE SONIDO

BOGOTÁ 2017

**ESTUDIO DE NORMATIVA Y PROPUESTA DE PROTOCOLO DE MEDICIÓN PARA
RUIDO FERROVIARIO**

ANDRÉS FELIPE GONZÁLEZ LOZANO

**Trabajo presentado como requisito parcial para optar por el título de profesional en
Ingeniería de Sonido**

Asesor: Máster en Ingeniería Acústica

Luis Jorge Herrera Fernández

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA

BOGOTÁ 2017

Tabla de contenido

	3
Lista de Ecuaciones	6
Lista de Figuras	7
Lista de Tablas	8
1. Introducción.	10
2. Planteamiento del problema	12
2.1 Antecedentes	12
2.2 Descripción y formulación del problema	15
2.3. Objetivos	16
2.3.1 Objetivo general	16
2.3.2 Objetivos específicos	16
2.4. Justificación	16
3. Marco teórico	18
4. Marco legal	23
4.1 UNE-EN ISO 3095: 2014. Aplicaciones ferroviarias. Medición del ruido emitido por vehículos que circulan sobre ferrocarriles. (ISO, 2014)	23
4.2 (Reken-Meetvoorschrift Railverkeerslawai (RMR), 1996)	24
4.3 Método de cálculo para ruido por trenes de Londres de 1995. (Transporte, 1995)	24
4.4 Agencia de Protección Ambiental – Australia (Environmental Protection Agency, EPA, por sus siglas en inglés) en la “Guía para la evaluación del ruido a partir de las infraestructuras férreas”. (EPA)	25
4.5 (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)	25
4.6 (Norma alemana para la predicción del ruido Schall 03, 2006)	26
5. Metodología	26
5.1 Tipo de investigación	27
5.1.1 Alcance investigativo	27
5.1.2 Alcance temporal	27
5.2 Recolección de información.	28
5.2.1 Variables	28
Variables independientes. Variables que no se pueden controlar y por tanto los resultados pueden variar.	28
Variables dependientes. Aquellas que pueden ser controladas.	28
5.2.2 Población y muestra	28
5.2.3 Tipo de enfoque	28
5.2.4 Instrumentos para la recolección de datos	28
5.3 Alcances y limitaciones	29
5.3.1 Alcances	29
5.3.2 Limitantes	29
6. Desarrollo ingenieril	30
6.1 Descripción de la normativa	30

6.2 Definiciones	47
6.3 Instrumento de medida y calibración	52
6.4 Campo de aplicación	53
6.5 Distancia a la fuente y altura del medidor	54
6.6 Condiciones atmosféricas	57
6.7 Número de mediciones	58
6.8 Unidad de medida	60
6.9 Correcciones	65
6.10 Tratamiento de datos	69
7. PLANTEAMIENTO DEL PROTOCOLO DE MEDICIÓN PARA RUIDO FERROVIARIO	73
7.1 Instrumentación y calibración.	73
7.2 Entorno acústico y definiciones	75
7.3 Sitio de medición	76
7.4 Correcciones	76
7.5 Incertidumbres de medición	77
7.6 Procedimiento de medición	77
7.6.1 Metodología para trenes a velocidad constante	78
7.6.2 Metodología para trenes en estado estacionario	81
7.7 Informe de la medición	82
8. Resultados y análisis	83
8.1 Aplicación del protocolo de medición	83
8.2 Sitio de medición	86
8.3 Estado de la vía	86
8.4 Condiciones del entorno acústico	87
8.5 Medición del tren a velocidad constante	87
8.6 Medición de la mañana. Ruido a velocidad constante en sentido sur - norte	88
8.7 Medición de la tarde. Ruido emitido a velocidad constante del tren en sentido norte - sur	95
8.8 Mediciones del tren en estado estacionario. Carrera 9 con calle 171.	101
8.9 Mediciones complementarias.	106
8.9.1 Medición del tren al momento de frenado. Carrera 9 con calle 171.	106
8.9.2 Medición del tren en aceleración desde reposo. Carrera 9 con calle 171.	108
8.10 Simulación en software CadnaA.	111
9. Conclusiones	119
10. Recomendaciones	121
11. Lista de referencias y bibliografía	122
12. Anexo 1.	123
13. Anexo 2.	136

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Nivel sonoro con ponderación A para vagones modernos circulando sobre vías de traviesas y balasto a cielo abierto	21
Ecuación 2. Ecuación incertidumbre típica combinad	43
Ecuación 3. Ecuación incertidumbre expandida	43
Ecuación 4. Ecuación cálculo de L_{Aeq} según el método simplificado de los países bajos RMR	59
Ecuación 5. Ecuación para el valor de emisión según el método simplificado de los países bajos RMR	60
Ecuación 6. Ecuación para determinar los valores de emisión estándares en función de la categoría del tren. (método simplificado de los países bajos RMR	60
Ecuación 7. Ecuación para determinar los valores de emisión estándares en función de la categoría del tren. (método simplificado de los países bajos RMR	60
Ecuación 8. Corrección por reflexiones	61
Ecuación 9. Corrección por distancia	61
Ecuación 10. Corrección por aire	61
Ecuación 11. Corrección por efecto del suelo	62
Ecuación 12. Corrección por efectos atmosféricos	62
Ecuación 13. Corrección por absorción del aire	64
Ecuación 14. Corrección por distancia entre la fuente y el medidor	64
Ecuación 15. Corrección por cambio de nivel y estructuras	65
Ecuación 16. Corrección por la cama de balasto	65
Ecuación 17. Corrección por efectos meteorológicos	65
Ecuación 18. Corrección por distancia entre medidor y fuente	65
Ecuación 19. Efecto del aire	66
Ecuación 20. Ecuación para conversión de velocidad de tránsito a velocidad de referencia según el método Schall 03	66
Ecuación 21. Ecuación para determinar el nivel que genera un vagón o locomotora según la norma UNE-EN ISO 3095	102
Ecuación 22. Ecuación incertidumbre típica combinad	126
Ecuación 23. Ecuación incertidumbre expandida	126

Lista de Figuras

Figura 1. Evolución de la presión sonora total P_T en función del tiempo en un punto cualquiera del espacio.	18
Figura 2. Red de ponderación A.	19
Figura 3. Categorías de los distintos tipos de trenes según la Norma RMR	59
Figura 4. Representación gráfica del proceso para hallar la corrección por distancia como lo sugiere el método inglés	65
Figura 5. Representación del punto de medición.	78
Figura 6. Parqueadero Gimnasio Los Pinos. Sitio de medición del ruido generado por el tren a velocidad constante	83
Figura 7. Sitio de medición para mediciones complementarias. Carrera 9 # 171	84
Figura 8. Estado de las vías	85
Figura 9. Sitio de medición	87
Figura 10. Resultados y espectro del nivel de ruido de fondo	89
Figura 11. Resultados y espectro del nivel de ruido producido por el tren a velocidad constante	90
Figura 12. Registro fotográfico de la medición al nivel de ruido producido por el tren a velocidad constante.	90
Figura 13. Resultados y espectro del nivel de ruido por el tren a velocidad constante	91
Figura 14. Niveles de ruido de fondo registrados con ambos sonómetros, Rion NA-27 y Brüel 2250	95
Figura 15. Registro fotográfico del paso del tren a velocidad constante por el punto de medición	96
Figura 16. Nivel de ruido a velocidad constante	97
Figura 17. Comparación del nivel de ruido de fondo (Rf.) y el nivel de ruido del tren a velocidad constante (Vel. cte.) con ambos sonómetros en horas de la tarde	98
Figura 18. Sitio de medición.	101
Figura 19. Puntos de medición antes (izq.) y después del arribo del tren (der.)	102
Figura 20. Estado de la vía.	107
Figura 21. Posicionamiento sonómetros Rion Na-27 (izq.) y Brüel 2250 (der.)	107
Figura 22. Aplicación del método de nivel máximo de la UNE-EN ISO 3095	110
Figura 23. Configuración de los parámetros de cálculo para ruido ferroviario de CadnaA	112
Figura 24. Configuración del tiempo o periodo de referencia. D (día), E (tarde), N (noche) de CadnaA.	112
Figura 25. Representación del sitio de medición en CadnaA	113
Figura 26. Nivel de ruido de fondo	115
Figura 27. Nivel continuo equivalente registrado durante 1 hora de medición que incluye el paso del tren	116
Figura 28. Nivel de ruido de fondo vs. nivel equivalente registrado durante 1 hora	117
Figura 29. Representación del punto de medición	131
Figura 30. Especificaciones del sonómetro Brüel 2250 por parte del fabricante indicando que es un sonómetro de clase 1	139
Figura 31. Especificaciones del sonómetro Rion Na-27 por parte del fabricante indicando que es un sonómetro de clase 1	139

Figura 31. Especificaciones del sonómetro Brüel 2250 por parte del fabricante indicando que es un sonómetro de clase 1	143
Figura 33. Especificaciones del sonómetro Rion Na-27 por parte del fabricante indicando que es un sonómetro de clase 1	143

Lista de Tablas

Tabla 1. Efecto de los niveles sonoros en dB(A).	20
Tabla 2. Niveles máximos de exposición recomendados en dB(A)	20
Tabla 3. Criterio de descripción de cada norma.	30
Tabla 4. Ejemplos de los valores posibles de los componentes y de las incertidumbres pertinentes para la incertidumbre de medición relativa a las mediciones de ruido emitido por los vehículos ferroviarios.	41
Tabla 5. Criterio de definiciones	46
Tabla 6. Criterio de instrumentación de medida y calibración	51
Tabla 7. Criterio de campo de aplicación	52
Tabla 8. Criterio de las condiciones atmosféricas	56
Tabla 9. Criterio del número de mediciones	57
Tabla 10. Valores estándar de emisión en función de la categoría del tren	60
Tabla 11. Término de corrección C_{b,c} en función de la categoría del tren y el tipo de vía.	61
Tabla 12. Coeficientes de velocidad por banda del factor b. (cálculo realizado por banda de tercio de octava)	66
Tabla 13. Criterio de tratamiento de datos	68
Tabla 14. Guía para llevar a cabo las mediciones.	79
Tabla 15. Resultados y espectro del nivel de ruido de fondo	89
Tabla 16. Resultados y espectro del nivel de ruido producido por el tren a velocidad constante	90
Tabla 17. Resultados y espectro del nivel de ruido de fondo vs. el nivel de ruido producido por el tren a velocidad constante.	91
Tabla 18. Nivel real de la fuente sonora, calculado por diferencia logarítmica con el nivel de ruido de fondo	92
Tabla 19. Cálculo de la incertidumbre de medición	93
Tabla 20. Niveles de ruido de fondo registrados con ambos sonómetros, Rion NA-27 y Brüel 2250	95
Tabla 21. Nivel de ruido a velocidad constante con ambos sonómetros, Rion NA-27 y Brüel 2250	97
Tabla 22. Comparación del nivel de ruido de fondo (R_f) y el nivel de ruido del tren a velocidad constante (Vel. cte.) con ambos sonómetros en horas de la tarde	98
Tabla 23. Cálculo de la incertidumbre de medición	99
Tabla 24. Posición 1 de medición. Brüel 2250. Ubicado frente a la locomotora	103
Tabla 25. Posición 2 de medición. Rion NA-27. Ubicado frente al segundo vagón	104

Tabla 26. Cálculo de la incertidumbre de medición	105
Tabla 27. Niveles registrados durante el momento de frenado del tren	108
Tabla 28. Nivel de ruido de fondo	115
Tabla 29. Nivel continuo equivalente registrado durante 1 hora de medición que incluye el paso del tren	116
Tabla 30. Nivel de ruido de fondo vs. Nivel equivalente registrado durante 1 hora	117
Tabla 31. Guía para realizar las mediciones	133

1. Introducción.

En grandes ciudades como Bogotá, se encuentra una gran problemática de carácter ambiental siendo el ruido, según la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, “considerado uno de los impactos ambientales que más afectan a la población en forma directa, causando problemas auditivos y extra auditivos.” (Secretaría Distrital de Ambiente). Colombia posee normativas y protocolos de medición para la emisión de ruido de fuentes fijas, inmisión de ruido y ruido laboral, sin embargo, respecto a la obtención de niveles de presión sonora emitidos por fuentes en movimiento como los trenes, desafortunadamente no hay ningún protocolo nacional aplicable.

Entidades como El Parlamento Europeo y El Consejo de la Unión Europea sugieren el uso del método de cálculo de los Países Bajos, publicado en Reken-Meetvoorschrift Railverkeerslawai en 1996, conocido como ‘RMR’ para el cálculo de los niveles de ruido que emiten los trenes. (Europea, 2002) Sin embargo, la aplicación de este método extranjero ignora las condiciones de movilidad propias del país ya que su modo de aplicación se encuentra basado en la comparación del tren que desea ser evaluado con los vehículos que transitan en vías férreas holandesas gracias al uso de información referente a mediciones realizadas a estos vehículos anteriormente. Además de esto, es una normativa válida únicamente para el modelado del tren, es decir, se evalúa teóricamente el ruido que este genera más no de forma práctica en el campo. Se debe aclarar que esta recomendación es válida para los países pertenecientes a la UE, pero puede observarse también, que en países como Estados Unidos, Inglaterra y Australia cuentan con un método de cálculo propio para determinar los niveles de ruido que emiten los trenes.

Es por lo anterior que este proyecto tiene como propósito realizar una metodología de medición que se aplique inicialmente al distrito capital que considere las cualidades más

relevantes del tren de la Sabana de Bogotá para proporcionar los lineamientos que permitan realizar la medición práctica del nivel de ruido que genera su paso. El análisis y planteamiento de dicha propuesta tendrá como base distintas normas internacionales de medición de ruido emitido por trenes y vehículos que circulan por vías férreas. Se evaluará su aplicación en el sitio idóneo acústicamente según lo propuesto y para finalizar, se procederá a validar los resultados obtenidos por medio del software de simulación CadnaA (DataKustik) dónde se hace uso del modelo de simulación alemán Schall 03.

2. Planteamiento del problema

2.1 Antecedentes

Una vez realizada la revisión bibliográfica en diferentes bases de datos se encontraron antecedentes de investigaciones tanto en el ámbito nacional como internacional referentes al proyecto propuesto en este documento y que a continuación son detalladas:

En la Universidad de Medellín, se diseñó un “PROTOCOLO PARA LA MEDICIÓN DE EMISIÓN DE RUIDO, RUIDO AMBIENTAL Y REALIZACIÓN DE MAPAS DE RUIDO” (Medellín, 2009), donde se exponen los métodos que se recomiendan para realizar la medición a distintos tipos de fuentes sonoras y se menciona el uso del Método Nacional de Cálculo de los Países Bajos, RMR 96 como referente para las mediciones de los niveles de ruido que emiten los trenes.

En diciembre del año 2004, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial presentó una investigación bajo el nombre de “GUÍA DE GESTIÓN AMBIENTAL SUBSECTOR FÉRREO” (Ministerio de Ambiente, 2004) dando a conocer las regulaciones que a la fecha organizaban la actividad férrea del país teniendo en cuenta leyes que van desde la constitución de la empresa Ferrovías hasta el establecimiento del valor de las tarifas de los peajes férreo e incluso el nombramiento de un grupo policíaco especial para el tránsito ferroviario, pero no existe registro acerca de una normativa que indique la manera en que se realice la medición, el control y la regulación del nivel de ruido que generan las vías y vehículos férreos en el país.

De manera similar que el documento descrito en el párrafo anterior, el Servicio Nacional de Aprendizaje, SENA, realiza un estudio titulado “CARACTERIZACIÓN OCUPACIONAL. TRANSPORTE FÉRREO” (Servicio Nacional de Aprendizaje, 2006) donde se informa acerca de la normatividad Nacional vigente del transporte férreo y se encuentra que no existe una

normativa o resolución que indique cómo realizar la medición, control y regulación del nivel de ruido que generan las vías y vehículos férreos.

En mayo del 2011, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial mediante la Resolución número 0941, apoyado en el informe presentado por la empresa de Ferrocarriles del Norte de Colombia – FENOCO (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2011). Indica que no existe una normativa específica para ruido ferroviario y que es necesario hacer una propia interpretación de la Resolución 0627 del año 2006 para mantener los niveles que genera el paso del tren dentro de las especificaciones que allí se indican.

El Ministerio de Transporte de Colombia, realiza un informe ejecutivo que se titula “ESTUDIO PARA LA ELABORACIÓN DEL MARCO NORMATIVO FÉRREO COLOMBIANO ENFOCADO EN FACTORES TÉCNICOS DE DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, MANTENIMIENTO, OPERACIÓN, CONTROL Y ASPECTOS DE SEGURIDAD” (EPYPSA-ARDANUY, 2012) en el cual no se tiene en cuenta el impacto ambiental que causa el ruido producido por los vehículos ferroviarios en Colombia. De igual manera, como el título de este informe lo indica, vale la pena resaltar el interés por mantener en un estado de buena calidad y óptimas condiciones las vías férreas del país.

A nivel internacional, en el año 2011 se realiza el “Mapa de ruido del municipio de Almería” (Almería, 2011) donde se emplea el protocolo de medición RMR para el cálculo de ruido férreo y se desarrolla una simulación por medio del software de predicción de ruido CadnaA de la situación que se vive en este municipio. El objetivo de este trabajo fue “estimar el grado de protección del medio ambiente y la salud de los habitantes frente al ruido ambiental” (p.4).

En el año 2011 también se realizó una adaptación del método de predicción de ruido RMR a las condiciones ferroviarias que se presentan en Letonia. “ADAPTATION OF RMR NOISE

PROPAGATION METHOD FOR RAILWAY CONDITIONS” (Baranovskii, 2011). Consiste en un estudio realizado que basa su desarrollo en la problemática de adaptar el método de predicción holandés a las condiciones de Letonia ya que su sistema férreo en general es diferente concluyendo que su aplicación tiene como resultado grandes diferencias entre la medición realizada al sistema férreo lituano y la predicción del método RMR advirtiendo a su vez que dicho método (RMR) debe ser modificado antes de ser aplicado al sistema ferroviario de Letonia.

En el año 2013, se destaca la tesis de máster “MODELADO ACÚSTICO DEL RUIDO DEL TREN DE CERCANÍAS GRAO DE GANDÍA – VALENCIA” (Hernandez, 2013) realizada por Alberto Hernández Peña en la Universidad Politécnica de Valencia, donde el autor expone la necesidad de crear un protocolo propio de medición para ruido ferroviario, debido a que en España se manejan distintos límites de velocidad, distintos tipos de rieles y trenes a los que se encuentran en Holanda a pesar de que el gobierno español sugiere que se haga uso del Método de los Países Bajos para este tipo de mediciones. El autor aborda dicha problemática desde el modelado acústico del tren en la distancia que cubre Cercanías de Gandía y Valencia (España) ofreciendo así, el análisis de distintas variables para la creación y planteamiento de un nuevo modelo de medición para los trenes españoles donde se concluye finalmente que la elaboración de dicho modelo es necesario pero que a su vez, es importante determinar los procedimientos para evaluar el momento de frenado, arranque, el tipo de vía y sus discontinuidades.

También para el año 2013, se realiza el estudio en República Checa, “NOISE MEASUREMENTS ON VARIOUS RAILWAY SUPERSTRUCTURE CONSTRUCTIONS” (Neubergova, Tyfa, Vasica, & Ladys, 2013) donde se evalúan los niveles de presión sonora en la construcción de la superestructura férrea y el material rodante utilizado, así como también se

encuentran las diferencias que existen entre las vías actuales y las que se modernizan con dichas construcciones para poder determinar posibles correcciones para la disminución del ruido. Por otro lado, el documento estipula claramente que la propagación del ruido depende únicamente de las condiciones ambientales y del tipo de superficies que rodee el área de tránsito del tren.

2.2 Descripción y formulación del problema

En la actualidad, Colombia no cuenta con una normativa o resolución cuyo propósito sea la evaluación del ruido que generan los trenes dentro y fuera del sector urbano, lo cual provoca el desconocimiento del aporte que hacen los trenes a los niveles de ruido, además de la falta de elementos de control y regulación de estos niveles ya que los mismos pueden llegar a afectar la salud del ser humano.

Tal como se ha mencionado en la Introducción, entidades como El Parlamento Europeo y El Consejo de la Unión Europea sugieren el uso del método de cálculo de los Países Bajos, 'RMR', para el cálculo de los niveles de ruido que emiten los trenes, y aunque sea una recomendación para los países miembros de la UE y llegara a tenerse en cuenta en Colombia, esta es una normativa que propone el modelado teórico del ruido generado por el tren sin realizar la medición en campo.

En razón a la anterior problemática, es imperativo proponer una metodología de medición local donde puedan ser evaluados los niveles de ruido que genera el paso del tren de forma práctica dentro del sector urbano, en cuyo caso, el tren a evaluar es aquel que transita por los ferrocarriles de La Sabana, conocido con este mismo nombre, La Sabana, o Cercanías.

Partiendo del marco anterior se establece el siguiente interrogante: ¿qué procedimiento se debe seguir para realizar una medición de los niveles de ruido generados por el tren de La Sabana?

2.3. Objetivos

2.3.1 Objetivo general

Desarrollar e implementar una propuesta de protocolo de medición para el ruido generado por el tren de La Sabana mediante el análisis y comparación de las normativas internacionales especializadas para dicho fin.

2.3.2 Objetivos específicos

-Proponer un protocolo de medición de ruido generado por trenes mediante el análisis y comparación de normativa internacional.

-Determinar la utilidad del protocolo propuesto mediante su implementación en una medición de ruido emitido por el tren de La Sabana en dos puntos que satisfagan las condiciones establecidas en dicho documento.

-Realizar un análisis comparativo y validación de la medición realizada con una simulación de ruido emitido por el tren de La Sabana mediante su modelado con un software especializado que contemple el ruido férreo.

2.4. Justificación

Según la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, las fuentes móviles (tráfico rodado, tráfico aéreo, perifoneo) aportan el 60% de la contaminación auditiva (Secretaría Distrital de Ambiente) Sin embargo, en Colombia existe únicamente una legislación nacional vigente en lo que respecta a la medición de emisión de ruido que es la Resolución 0627 del año 2006.

Para la medición de tráfico rodado, existe un método de evaluación conocido como “NMPB-Routes-96 (SETRA-CERTULCPC-CSTB)” el cual es francés, y, como se mencionó, el método de cálculo holandés ‘RMR’ es uno de los que más se recomienda para la predicción del ruido generado por trenes.

Tal como se indicó anteriormente, Colombia aún no dispone de una normativa o legislación nacional cuya aplicación sea la medición y evaluación de los niveles de ruido producidos por trenes o vehículos ferroviarios, y llegar a aplicar normativa extranjera sería un claro desconocimiento de la realidad colombiana ya que ignora las características propias de las vías y vehículos férreos del país puesto que la mayor parte de estas normativas extranjeras basan su elaboración en caracterizaciones previamente realizadas a las vías y trenes de cada país definiendo así factores de corrección para cada uno de ellos utilizados en sus métodos de cálculo.

Es por los anteriores razonamientos que mediante la presente propuesta se busca disponer de una metodología para la medición de ruido ferroviario que permita el control y monitoreo de los niveles de ruido y la realización de mapas de ruido y mapas estratégicos de ruido para la ciudad de Bogotá.

3. Marco teórico

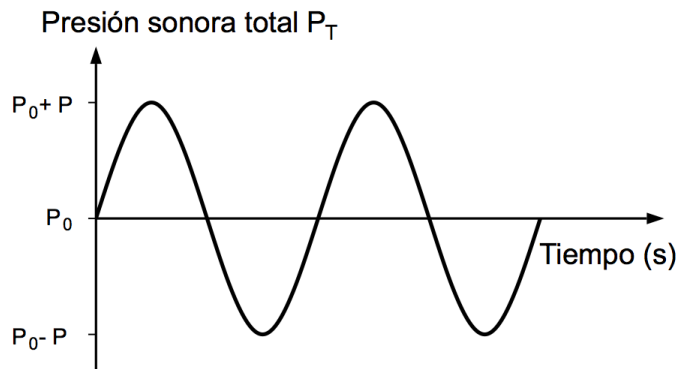
Dado que la mira central de este análisis estará en el ruido que generan los trenes, será necesario plantear algunos parámetros que sirvan como ejes conceptuales sobre los que apoyar la lectura interpretativa del contenido del presente documento. Para empezar, entenderemos el concepto de sonido como se conoce habitualmente:

- “Vibración mecánica que se propaga a través de un medio material elástico y denso (habitualmente aire), y que es capaz de producir una sensación auditiva. De dicha definición se desprende que, a diferencia de la luz, el sonido no se propaga a través del vacío y, además, se asocia con el concepto de estímulo físico.
- Sensación auditiva producida por una vibración de carácter mecánico que se propaga a través de un medio elástico y denso.” (Carrión, 1998)

De acuerdo a como lo escribe Carrión en su libro *Diseño de Espacios Arquitectónicos*, “el elemento generador del sonido se denomina fuente sonora (tambor, cuerda de violín, cuerdas vocales, etc.). La generación del sonido tiene lugar cuando dicha fuente entra en vibración. Dicha vibración es transmitida a las partículas de aire adyacentes a la misma que, a su vez, la transmiten a nuevas partículas contiguas”.

“La manera más habitual de expresar cuantitativamente la magnitud de un campo sonoro es mediante la presión sonora, o fuerza que ejercen las partículas de aire por unidad de superficie. En la Figura 1 se observa la evolución de la presión P_T , en función del tiempo, en un punto situado a una distancia cualquiera de la fuente sonora. Dicha presión se obtiene como suma de la presión atmosférica estática P_0 y la presión asociada a la onda sonora p .” (Carrión, 1998)

Figura 1. Evolución de la presión sonora total P_T en función del tiempo en un punto cualquiera del espacio. Fuente. (Carrión, 1998)



El valor máximo de la oscilación respecto a P_0 recibe el nombre de amplitud de la presión asociada a la onda sonora, y en el caso de la Figura 1 se representa por la letra P .

El número de oscilaciones por segundo de la presión sonora se denomina frecuencia del sonido y se mide en hertzios (Hz) o ciclos por segundo (c/s).

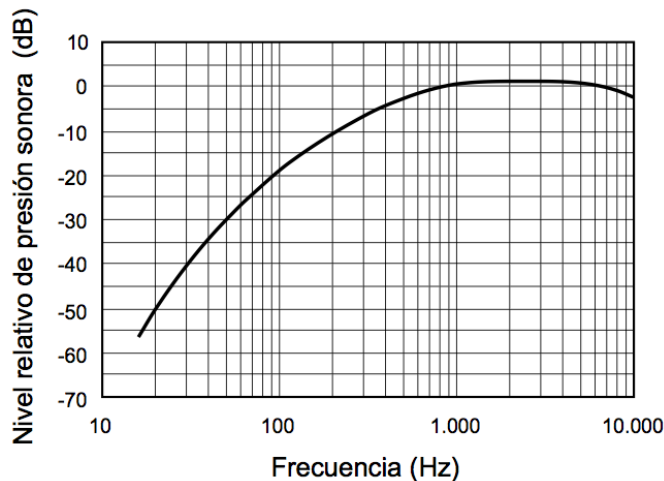
“Para representar la presión sonora se hace uso de una escala logarítmica. Dicha escala se expresa en valores relativos a un valor de referencia. Se trata de la presión eficaz correspondiente al umbral de audición, a 1kHz (2×10^{-5} Pa). En tal caso, se habla de nivel de presión sonora SPL o L_p . La unidad utilizada es el decibelio (dB).” (Carrión, 1998).

Para el registro de los eventos sonoros se hace uso del sonómetro. Éste es un aparato electrónico que mide exclusivamente niveles de presión sonora. “Su unidad de procesado permite realizar medidas globales, o bien por bandas de frecuencias, con diferentes respuestas temporales (respuestas “Fast”, “Slow”, “Impulse” o “Peak”).” (Carrión, 1998)

Según Antoni Carrión respecto a la red de ponderación A, indica que “debido a la diferente sensibilidad del oído a las distintas frecuencias, los valores obtenidos haciendo uso de la escala lineal (SPL o L_p) no guardan relación directa con la sonoridad del sonido en cuestión. Con objeto de que la medida realizada sea más representativa de la sonoridad asociada a un sonido cualquiera, los sonómetros incorporan la llamada red de ponderación A. En la Figura 2 se

representa la curva de respuesta correspondiente a dicha red de ponderación. Obsérvese que la frecuencia de 1 kHz queda inalterada y, por tanto, se puede considerar de referencia, y que para frecuencias anteriores existe una imponente atenuación de nivel.

Figura 2. Red de ponderación A. Fuente. (Carrión, 1998)



Los niveles de presión sonora medidos con la red de ponderación A se representan con las letras L_A y se expresan en dBA o dB(A).”

Los niveles que se obtienen de las mediciones de eventos sonoros a causa de vehículos que transitan por ferrocarriles se expresan en dB(A). Así se entiende también que (Jaramillo, 2007) “la ponderación A acerca más los valores medidos físicamente a los estímulos auditivos que estos producen. Los dB(A) son ampliamente utilizados para estudios de ruido y salud auditiva. A continuación vemos dos tablas acerca de los daños auditivos producidos por la exposición a altos niveles de ruido:

Tabla 1. Efecto de los niveles sonoros en dB(A). Fuente (Jaramillo, 2007)

150 dB(A)	Causa pérdida inmediata de la audición.
120 dB(A)	Extremadamente doloroso.
100 dB(A)	Cortos períodos de exposición causan pérdida temporal de la agudeza auditiva y larga exposición causa daño irreparable a los órganos auditivos.
90 dB(A)	Muchos años de exposición causan pérdidas auditivas permanentes.
65 dB(A)	Largos períodos de exposición causan fatiga mental y física.

Tabla 2. Niveles máximos de exposición recomendados en dB(A). Fuente (Jaramillo, 2007)

Duración de la exposición en horas	Nivel sonoro máximo recomendado en dB(A)
8	90
6	92
4	95
3	97
2	100
1,5	102
1	105
0,5	110
0,25 o menos	115”

Ahora bien, en cuanto a las fuentes de ruido en los sistemas ferroviarios, del mismo modo en que es definido por (Harris, 1995).

“Las fuentes de ruido principales son: (1) la interacción entre ruedas y rieles, (2) el sistema de propulsión de vagones y locomotoras, (3) el equipamiento auxiliar y (4) en el caso de los trenes de alta velocidad, el ruido aerodinámico. Las fuentes de ruido de los sistemas ferroviarios se describen normalmente en términos de nivel de presión sonora a una distancia fija de las vías y a una altura fija sobre el terreno”. Lo que significa también que en cada locación donde se llevan a cabo prácticas ferroviarias los valores que se obtienen dependen de las condiciones acústicas del lugar y de las operaciones mismas, donde en varios casos, las entidades responsables de regular

los niveles de ruido de cada país elaboran una metodología de medición que se acople con su propia realidad de condiciones acústicas.

“El tráfico ferroviario está constituido por el paso de un número determinado de trenes aislados de distintas categorías sobre una misma vía de ferrocarril, cada una con sus características propias de emisión, y condicionado por el efecto de parámetros propios de la vía o la circulación” (Aviles & Rocío, 2017).

En distintas ocasiones se ha podido observar que los trenes urbanos suelen disponer de interiores fabricados con superficies duras fáciles de limpiar, pero incapaces de absorber el sonido y por ende el nivel dentro de los vagones, el nivel de ruido también puede aumentar con la velocidad y en el caso que el tren transite por un túnel.

Según (Harris, 1995), “el nivel sonoro con ponderación A para vagones modernos circulando sobre vías de traviesas y balasto a cielo abierto es de:

$$L_A = 70 + 15 \log_{10} \left(\frac{v}{v_0} \right) \pm 6 \text{ dB(A)} \quad (1)$$

donde v es la velocidad en km/h, y v_0 la velocidad referencia de 60 km/h. Los niveles en el interior del vagón son por lo general 7 dB(A) mayores en el interior de un túnel que a cielo abierto con la misma velocidad”.

En cuanto al aislamiento que se puede emplear hacia el ruido ferroviario consiste en “la protección de los receptores frente al ruido irradiado por ruedas, rieles, traviesas o losas flotantes, vigas, columnas, etc., por medio de una barrera resulta eficaz solamente cuando bloquea la trayectoria visual entre la superficie emisora principal y el receptor. Un aislamiento elástico entre la estructura y la barrera puede evitar que la barrera misma se convierta en una superficie emisora de ruidos”. (Harris, 1995)

Adicional a la ecuación (1) presentada, durante el desarrollo del presente documento se podrán apreciar distintas ecuaciones que son sugeridas por directivas de ruido a nivel mundial y se procederá a sugerir las indicaciones que cumplan con las características locales del tren de La Sabana.

4. Marco legal

Este proyecto de investigación tiene como base para su desarrollo el análisis de normas y manuales internacionales en los cuales se describen los procedimientos para elaborar la medición de ruido generado por trenes. En el presente capítulo se encuentra el resumen de los modelos utilizados como referencia. Para un análisis en mayor profundidad de dichas normas referirse al capítulo número 6 en el cual se expone el desarrollo ingenieril utilizado para la elaboración del protocolo de medición deseado y se describen detalladamente las condiciones de aplicación, los indicadores empleados, instrumentos de medición y otros aspectos relevantes que sugieren y aplican cada una de las normativas mencionadas al momento de medir y analizar el ruido generado por trenes.

4.1 UNE-EN ISO 3095: 2014. Aplicaciones ferroviarias. Medición del ruido emitido por vehículos que circulan sobre ferrocarriles. (ISO, 2014)

Esta normativa de uso internacional es la más completa de todas ya que brinda los lineamientos para realizar mediciones del nivel de ruido que genera el tren en distintas fases o etapas de funcionamiento como los son, el ruido generado en estado estacionario, cuando transita a velocidad constante, en el momento de frenado y en la aceleración desde el reposo. Además de esto, los métodos que esta normativa sugiere son para su aplicación en ensayos prácticos e indica la instrumentación con que se debe contar, el procedimiento para evaluar la información que se

obtiene y el cálculo de las incertidumbres de la medición, así como también el formato de presentación de dicha información.

4.2 (Reken-Meetvoorschrift Railverkeerslawai (RMR), 1996)

Partiendo de que la Directiva Europea de Ruido indica que el método de los Países Bajos es el recomendado para modelar el nivel de ruido generado por trenes, esta normativa implementa el uso de factores de corrección de referencia de vías y trenes holandeses previamente determinados para el cálculo del nivel de presión sonora equivalente final deseado. A diferencia de la Norma UNE-EN ISO 3095, esta directiva realiza únicamente el modelado de los niveles de ruido por parte del tren de forma teórica y no práctica presentando tres tipos de análisis, uno global donde no se tiene en cuenta ninguna corrección al resultado final y otros dos análisis, por bandas de octava y por bandas de tercio de octava, que sí tienen en cuenta, además de los factores propios según la vía y/o tren anteriormente mencionados, las respectivas correcciones por la influencia de las condiciones atmosféricas del sitio de medición y sus características acústicas.

4.3 Método de cálculo para ruido por trenes de Londres de 1995. (Transporte, 1995)

Este método es similar al método RMR ya que también emplea factores de corrección a los distintos tipos de trenes que transitan en Londres enfocando su metodología hacia la predicción del nivel de ruido para trenes en movimiento y también presentar el modo de cálculo para predecir los niveles de ruido que generen nuevas vías o trenes que entren en circulación. Esta metodología inglesa determina el Nivel de Exposición Sonora (SEL, Sound Exposure Level, por sus siglas en inglés), lo cual se traduce a menudo como la cantidad de ruido al que una persona está expuesta a lo largo de un período específico de tiempo. El modelo inglés presenta distintas correcciones que se aplican al valor final que se obtiene una vez este se ha convertido de SEL a

L_{Aeq} .

4.4 Agencia de Protección Ambiental – Australia (Environmental Protection Agency, EPA, por sus siglas en inglés) en la “Guía para la evaluación del ruido a partir de las infraestructuras férreas”. (EPA)

Esta guía se caracteriza principalmente por estipular los valores máximos permitidos en distintos sectores del sur de Australia como lo son el sector industrial, el sector residencial, de hospitales y de oficinas partiendo de que según la naturaleza de las operaciones ferroviarias, los niveles de ruido consisten normalmente en altos niveles de ruido durante cortos periodos de tiempo en el día y la noche, separados de largos periodos de calma así que se sugiere que estos cambios de nivel de ruido que producen las líneas férreas deben ser analizados durante las 24 horas del día. Estos criterios que se presentan en esta guía deben cumplirse al momento de construir una nueva vía férrea o realizar mejoras a una vía ya existente evaluando los niveles de ruido a distancias de 30m y 180m del eje de la vía del tren. Se determinan los valores de ruido máximo y equivalente permitidos a distintas horas del día según el sector en que se encuentre y así mismo, se indican los procesos de medición para el ruido que se transmite por aire y por suelo, que son distintos al ruido transmitido por vibraciones.

4.5 (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

Este manual tiene como referencia distintas leyes federales de los Estados Unidos para la estimación de niveles de ruido de referencia dependiendo de las operaciones que realicen los trenes. Además de evaluar los niveles de exposición del trabajador dentro de la cabina del tren y los cuartos de descanso que se encuentran en las estaciones ferroviarias principales. Este manual indica el procedimiento para el cálculo del nivel de ruido en trenes a velocidad constante, en estado estacionario, de elementos que generan señal de advertencia como las bocinas y operaciones de patio como el acople, desacople, carga y descarga de vagones, entre otras.

4.6 (Norma alemana para la predicción del ruido Schall 03, 2006)

El modelo matemático que se expone en esta normativa es el que aplica el software de predicción de ruido CadnaA. Esta norma no tiene en cuenta la influencia de las características atmosféricas del lugar. El modelo se basa en valores de referencia para realizar el cálculo del valor final del nivel de ruido. Para el caso de la velocidad, por ejemplo, se realiza una corrección por banda de octava con una velocidad de referencia de 100km/h. Además de la corrección por la vía, cada uno de estos valores depende de la frecuencia y también depende del tipo de vehículo, los cuales están divididos por el tipo de carga y por ende el nivel de ruido aproximado que generan.

5. Metodología

Las actividades que se proponen en la metodología para el desarrollo del proyecto describen la forma en que se va a llevar a cabo el cumplimiento de cada uno de los objetivos propuestos.

El primer objetivo, es la propuesta del protocolo de medición basado en la lectura de diferentes normas internacionales donde se describen protocolos de medición aplicados en diferentes países del mundo. Por tanto, las primeras tareas de este objetivo son la lectura de cada una de las normas escogidas y la elaboración de un cuadro comparativo con los diferentes protocolos que allí se exponen. Posterior a este paso, se plantea el protocolo de medición que compete al desarrollo del proyecto de grado.

El segundo objetivo, es determinar la aplicabilidad del protocolo propuesto mediante su implementación en una medición de ruido emitido por el tren de La Sabana. Las tareas para que se cumpla este objetivo son la obtención de los permisos necesarios para implementar el protocolo propuesto en el tren, realizar la medición los puntos que cumplan con las

características acústicas necesarias y señaladas en el protocolo de medición propuesto y analizar los resultados obtenidos.

Para finalizar el proyecto, es necesaria la validación de los resultados obtenidos con un software de modelado ambiental donde pueda realizarse la simulación de ruido emitido por una fuente en movimiento. El cumplimiento de este objetivo comprende tres tareas, aprender a utilizar el software de modelado ambiental escogido, modelar y concluir los resultados de la simulación con respecto a los resultados de la medición con el protocolo propuesto.

5.1 Tipo de investigación

Esta investigación es de tipo mixta debido a que se va a realizar una medición de ruido cuyos valores van a ser analizados e interpretados de acuerdo al protocolo que se propone.

5.1.1 Alcance investigativo

El alcance de investigación del proyecto aquí expuesto es de tipo exploratorio, ya que hasta la fecha no se han realizado estudios acerca de la normativa que se aplica a la medición de ruido generado por trenes en el país y tampoco se han propuesto normativas, protocolos o resoluciones locales.

5.1.2 Alcance temporal

El alcance temporal de la investigación es longitudinal, debido a que en primera instancia se va a desarrollar un protocolo de medición para la captura de niveles de ruido emitidos por el tren de La Sabana donde eventualmente los datos obtenidos son independientes del día en que el protocolo sea implementado siempre y cuando cada grupo de mediciones se realice en el mismo momento.

5.2 Recolección de información.

5.2.1 Variables

Variables independientes. Variables que no se pueden controlar y por tanto los resultados pueden variar.

-Fuente sonora (Tren de La Sabana).

-Humedad relativa.

-Velocidad y dirección del viento.

-Tiempo de paso del tren¹.

Variables dependientes. Aquellas que pueden ser controladas.

-Longitud del tren.

-Velocidad de tránsito.

5.2.2 Población y muestra

Población: Todos los trenes que posee Turistren, empresa encargada del Tren de La Sabana.

Muestra: La muestra es el tren de La Sabana que transita a las 6:00am de sur a norte y a las 5:00pm de norte a sur.

5.2.3 Tipo de enfoque

Este proyecto tiene un enfoque de investigación mixto, es decir, abarca las características del enfoque cuantitativo y cualitativo de la investigación. Se comienza con dar respuesta a la pregunta problema partiendo del análisis de normativas para luego dar paso al planteamiento del protocolo de medición y después se obtienen los datos y se observan los eventos sonoros que producen las actividades férreas en dos puntos que cumpla las especificaciones acústicas en la ciudad de Bogotá.

5.2.4 Instrumentos para la recolección de datos

- Sonómetros clase 1.

1 Depende de la velocidad del tren y de las condiciones de la vía.

- Calibrador acústico clase 1.
- Estación meteorológica o dispositivo para la recolección de datos atmosféricos.
- Flexómetro

5.3 Alcances y limitaciones

5.3.1 Alcances

-Implementar el protocolo de medición propuesto para la realización de mapas de ruido y mapas estratégicos de ruido en Bogotá.

-Guía para una futura implementación en mediciones de ruido generado por el metro y tranvía de Medellín.

5.3.2 Limitantes

-Disponibilidad del sitio de medición que cumpla con todas las características acústicas necesarias.

-Disponibilidad de equipos suficientes para cumplir con los requisitos de las mediciones.

-Disponibilidad de normatividad internacional que haga referencia al proceso de medición del nivel de ruido del tren en fases distintas a la medición de velocidad constante y momento de frenado, como los son, estado estacionario y aceleración desde reposo.

6. Desarrollo ingenieril

Para dar comienzo con el desarrollo de este proyecto, se recolectaron distintas normativas internacionales que se encuentran vigentes y se realizaron cuadros comparativos destacando parámetros que permitan seguir con el análisis y planteamiento del protocolo de medición, entre los cuales se encuentran, la descripción de las normas, incertidumbres de medición, si presenta o no definiciones, instrumentos de medida y calibración, el campo de aplicación de cada norma, la distancia que hay entre la fuente y el medidor y la altura del mismo, las condiciones atmosféricas que se tienen en cuenta o no, el número de mediciones a realizar, la unidad de medida, correcciones a los resultados obtenidos y el tratamiento de datos.

6.1 Descripción de la normativa

En la tabla 3 se presenta la descripción de las normas que se tienen en cuenta para el planteamiento del protocolo de medición donde cuatro de ellas, el método inglés, el método de los Países Bajos, los lineamientos de la EPA en Australia, y el modelo alemán Schall 03 se enfocan en el modelado del evento sonoro que producen los trenes, mientras que las normativas de la República Checa, UNE-EN ISO 3095, el estándar de regulación técnica para los ferrocarriles japoneses y el manual de instrucciones para mediciones férreas de los Estados Unidos se enfocan en la medición práctica de campo.

Tabla 3. Descripción de la normativa. Fuente: El Autor

Norma	Criterio evaluado
	Descripción de la normativa
Método inglés	Modelo de predicción de ruido para nuevos trenes y/o nuevas vías que se construyan teniendo en cuenta mediciones hechas a trenes y vías inglesas ya existentes.
Método Países Bajos, RMR	Modelado y cálculo del ruido emitido por trenes dónde se dividen en categorías de acuerdo a su sistema de frenado, al tipo de carga que transporta y al número de vagones. Detalla dos métodos distintos, uno global y otro detallado por banda de octava.
Handbook for railroad noise measurement and analysis (US)	Metodología de medición para distintas actividades que realizan los vehículos férreos con el propósito de dar cumplimiento a las leyes federales de los Estados Unidos que establecen niveles máximos de ruido para cada sector urbano.
EPA (Australia) – Guidelines for the assessment of noise from rail infrastructure	Modelo de predicción del nivel de ruido que generan los trenes y su corroboración mediante una medición en campo.
Schall 03 (Alemania)	Método de predicción del nivel de ruido que genera el tren teniendo en cuenta características de tránsito, vías y trenes alemanes previamente estipuladas.
UNE – EN ISO 3095	Aplicaciones ferroviarias. Medición de ruido emitido por vehículos que circulan sobre carriles.
Método de República Checa	Mediciones en campo sin proveer información más específica.
Estándar de regulación técnica para los ferrocarriles japoneses	Medición que se realiza a lo largo de las vías férreas para hacer constar que a 25m de la misma no se exceda un nivel de 75 dB(A).

Según la tabla anterior, se puede determinar que la finalidad de cada una de las normas evaluadas es diferente. Hay países como Holanda, Alemania e Inglaterra que sugieren que para la implementación de su protocolo se lleve a cabo la comparación del tren que desea ser evaluado con una base de datos existente dónde se tiene información pertinente a correcciones por el número de vagones, el sistema de frenado que utilizan, la velocidad de tránsito, el tipo de carga

que transportan, entre otras. De ser implementada en vías férreas colombianas desconoce los factores de corrección que corresponden al tipo de vía y tren local.

La creación del protocolo de medición que compete el desarrollo de este proyecto tiene como criterio principal para su planteamiento la información referente a las normativas cuya metodología de medición esté enfocada en la práctica, para que a su vez el protocolo propuesto sea implementado en campo y permita recopilar información real pertinente al movimiento de los trenes en Bogotá y posteriormente a nivel nacional donde se incluya también el metro de Medellín y de ser el caso, el de Bogotá.

A continuación, se profundiza en la descripción de las metodologías de las normas de medición internacionales tomadas en cuenta para el desarrollo de este proyecto:

Método de Cálculo de Ruido Ferroviario Inglés de 1995

Este método se enfoca en la predicción del ruido donde se presentan mediciones previamente realizadas a trenes ingleses cuyos valores son la base para determinar el Nivel de Exposición Sonora² (SEL, Sound Exposure Level, por sus siglas en inglés). Además de ser válida únicamente para trenes en movimiento, esta normativa indica el cálculo para realizar las predicciones a nuevos trenes que entren en circulación y/o nuevas vías que se construyan. Este modelo de predicción de ruido se divide en seis partes o etapas principales:

“Etapas 1: Se divide la vía férrea de interés en uno o varios segmentos donde la variación de ruido por segmento sea menor a 2dB(A).

- Para cada segmento se calcula lo propuesto de la Etapas 2 a la Etapa 5.

Etapas 2: Se calcula el valor del Nivel de Exposición Sonora (SEL) de referencia, es decir, SEL_{ref}, a una velocidad dada y a una distancia de 25m de la cabeza del carril más cercana para

² Cantidad de ruido al que una persona está expuesta a lo largo de un período específico de tiempo de 1s. Recuperado del Método de Cálculo de Ruido Ferroviario Inglés de 1995.

cada segmento de vía, se tiene en cuenta la longitud del tren, el tipo de vía y el tipo de soporte de la vía.

Etapa 3: Se realizan correcciones al valor de SEL_{ref} por distancia en el punto de revisión desde la vía, corrección por el suelo y el aire, efecto de pantalla por barreras, etc. y el ángulo de visión en el punto de revisión.

Etapa 4: Correcciones al valor de SEL_{ref} por efectos de reflexión en el punto de recepción.

Etapa 5: Se calcula el valor de SEL una vez se hayan realizado las correcciones a los valores de SEL_{ref} de cada segmento de vía y convertir estos valores (SEL) en valores de L_{Aeq} teniendo en cuenta el periodo de tiempo requerido y el número de trenes.

- Una vez se tienen los valores de L_{Aeq} para cada segmento de vía se hace la etapa 6:

Etapa 6: Combinar logarítmicamente los valores de L_{Aeq} por cada segmento para obtener el valor total del L_{Aeq} diurno y nocturno del ferrocarril.” (Transporte, 1995)

Como se observa el enfoque de esta normativa es hacia la predicción de los niveles de ruido que van a llegar a generar los trenes que entren en operación y las vías, si es el caso, que sean construidas. Como se ha mencionado en párrafos anteriores, el proceso de cálculo se basa en la adaptación de los vehículos que se deseen evaluar con información acerca de los niveles de exposición sonora de referencia, SEL_{ref} , ya obtenidos para los trenes ingleses. Por tanto, aplicar la normativa inglesa en Colombia no es aconsejable porque los vehículos férreos existentes a nivel local son diferentes y sería necesario hacer una profunda investigación para determinar si es posible aplicarse. Por otra parte, se destaca que los ajustes que recomienda la normativa inglesa aplicados a la absorción del suelo, por la vía de balasto, y otros, sí serán considerados dentro del planteamiento del protocolo de medición de este proyecto.

Método de los Países Bajos, RMR 96

La normativa RMR enfatiza su metodología en el modelado y cálculo del ruido emitido por el tren, también con base en datos, valores predeterminados y características de fabricación de trenes holandeses. Este método tiene como primer paso la clasificación de los diferentes tipos de trenes que se van a analizar en categorías que van de acuerdo a su funcionamiento y a su sistema de frenado, presentando un modelo de cálculo global para el valor de emisión del tren en dB(A) y dos tipos de procedimientos adicionales más detallados: El modelo estándar SRM I (método simplificado) que también estudia los niveles globales del tren y el modelo por banda de octava SRM II (método detallado).

Las categorías en las que se dividen los trenes son las siguientes:

Categoría 1. Trenes de pasajeros con sistema de frenado de pastillas.

Categoría 2. Trenes de pasajeros con sistema de frenado de pastillas y de disco.

Categoría 3. Trenes de pasajeros con sistema de frenado de disco.

Categoría 4. Trenes de carga con sistema de frenado de pastillas.

Categoría 5. Trenes a diésel con sistema de frenado de pastillas.

Categoría 6. Trenes a diésel con sistema de frenado de disco.

Categoría 7. Subterráneo urbano y tranvías con sistema de frenado de disco.

Categoría 8. Trenes intermunicipales y lentos con sistema de frenado de disco.

Categoría 9. Trenes de alta velocidad con sistema de frenado de pastillas y de disco.

Esta normativa se caracteriza, al igual que el procedimiento inglés, por presentar un gran número de tablas donde se muestran coeficientes de corrección obtenidos de estudios realizados anteriormente a los trenes que transitan por vías holandesas los cuales se encuentran ligados directamente con la categoría que le corresponda al tren que desea ser evaluado.

En el procedimiento global para el cálculo del valor de emisión se tienen en cuenta variables como el número de trenes, que tienen y no tienen su sistema de frenado activo, la velocidad promedio de los trenes cuando tienen y no tienen su sistema de frenado activo, el tipo de vía (tipo de traviesas que presenta y estado del lecho de balasto), junto con una estimación de la ocurrencia de desconexiones en la vía, el número de conexiones o juntas (por cada 100m), si presenta switches³ para cambios de vía y la longitud del tramo de vía de interés o al menos la longitud equivalente a cada una de las conexiones o juntas presentes. Además, la normativa presenta lineamientos que se utilizan si el paso del tren cruza por una estructura de concreto o de metal como un puente o paso de nivel.

El procedimiento del método global ayuda a obtener una primera aproximación del nivel de emisión sonora por parte de un tren en movimiento ya que sin tener en cuenta las correcciones que los métodos más detallados presentan, sigue abarcando un número considerable de variables para la determinación del resultado final. Por otra parte, el modelo estándar simplificado conocido como SRM I, presenta la situación de prueba como su nombre lo indica, de una manera simplificada recreando geoméricamente el área de evaluación del paso del tren, donde a partir de este método junto con el método detallado (SRM II, por banda de octava) se tienen en cuenta distintas correcciones que se ajustan al cálculo del valor de emisión en dB(A) por parte del tren de manera global o por banda de octava. Adicionalmente, la normativa RMR maneja para cada una de las categorías de trenes velocidades de referencia máximas permitidas que van desde los 100 km/h hasta los 300 km/h, lo que a su vez indica que el tipo de trenes que dispone Colombia es totalmente diferente a los holandeses ya que la velocidad de tránsito máxima permitida a nivel local es de 25 km/h sin la posibilidad de aumentar debido a que es controlada por el tiempo de

3 Elemento metálico que permite el cambio de riel

paso y de llegada en cada puesto de seguridad donde intersecta la vía férrea con las principales calles de Bogotá, sin embargo, así como ocurre con la normativa inglesa, el ajuste que se aplica por la absorción del aire al valor de emisión final será considerado dentro del protocolo propuesto.

Hacer uso de esta normativa en Colombia también desconoce factores de movilidad locales que son totalmente diferentes a los que la Norma RMR toma como referencia, por ejemplo, el hecho de que aquí los trenes se desplazan a una velocidad limitada y mucho menor a la empleada en Holanda.

Handbook Para La Medición Y Análisis De Ruido Ferroviario De Los Estados Unidos

El Handbook para la Medición y Análisis de Ruido Ferroviario de los Estados Unidos (U.S. Handbook for Railroad Noise Measurement and Analysis) presenta el uso de distintos diagramas representativos para llevar el control de las mediciones junto con el procedimiento de las mismas, donde se incluye información acerca de la configuración del instrumento de medición, su respectiva calibración, las distancias de los puntos de medición, la presencia de obstáculos que interfieran en la libre propagación del sonido, entre otros. El uso de estos diagramas en el documento facilita la comprensión de la información, permitiendo su aplicación de una manera más acertada ya que se apoya también en la ilustración de la metodología de las distintas mediciones, y de hecho, el protocolo de medición que se plantea en este documento toma como referencia una de esas tablas para facilitar el control durante el proceso de medición por parte del personal profesional a cargo. Este manual tiene como referencia distintas leyes federales para la estimación de niveles permitidos que dependen de las operaciones que realicen los trenes para determinar si su funcionamiento acata o no la ley. Esta normativa evalúa también los niveles que genera el tren en estado estacionario y los niveles de exposición del trabajador dentro de la

cabina del tren y los cuartos de descanso que se encuentran en las estaciones ferroviarias principales, haciendo de esta Norma un referente más para la medición del ruido que genera el tren en distintas etapas de su funcionamiento así que el protocolo que se plantea en este proyecto abarca las metodologías de medición para el tren cuando transita a velocidad constante y cuando se encuentra en estado estacionario. Esta normativa no presenta correcciones por la influencia atmosférica o por el tipo de suelo en que se encuentre el instrumento de medición, pero sí indica cómo debe ser el correcto manejo de los datos que se obtienen durante la práctica, cuya información se expone con detalle en los próximos párrafos.

El procedimiento y manejo de datos en esta normativa no se encuentran ligados al mismo tipo de factores de corrección por el tipo del vehículo como sucede en otras normativas. El hecho de que este Manual se encuentre unido con los niveles de ruido límite permitidos por cada zona según leyes federales sirve para enlazar de igual manera el protocolo de medición que aquí se plantea con la actual Resolución 0627 del año 2006 para mantener los niveles de ruido permitidos por la ley colombiana dentro del límite.

EPA – Guía Para La Evaluación Del Ruido A Partir De Las Infraestructuras Férreas

El criterio que maneja la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA, por sus siglas en inglés) en la “Guía Para La Evaluación Del Ruido A Partir De Las Infraestructuras Férreas” de Australia, considera que debe evaluarse la exposición al ruido durante las 24 horas del día ya que la naturaleza de las operaciones férreas indica que los niveles que se emiten junto a una vía de ferrocarril consisten normalmente en cortos periodos de tiempo de altos niveles durante el día y durante la noche, con largos periodos de tiempo donde no hay actividad férrea, es decir, no hay ruido proveniente de este tipo de fuente. Según la EPA, la mayor parte del ruido que proviene del paso del tren se genera por la combinación del sistema de

propulsión, que consiste generalmente en una locomotora eléctrica, diésel o una unidad de potencia integrada, en conjunto a la interacción del vehículo con la vía. Cuando se trata de una locomotora eléctrica, el control en la disminución de ruido es mayor puesto que son más silenciosas produciendo menos ruido mecánico y no requieren de escape, contrario el caso de una locomotora diésel que su control se complica debido a que genera un nivel de ruido de escape del motor a una altura de aproximadamente 4m.

En esta guía de trabajo se hace referencia a mediciones que se realizan del ruido que se transmite por el aire y por el suelo, el cual es distinto a las vibraciones que el mismo tren produce. Para este propósito se proponen dos tipos de mediciones, cada una con sus propias ventajas y desventajas, las cuales son las mediciones con monitoreo asistido y no asistido. Las mediciones asistidas tienen la ventaja de contar con una persona encargada de tomar datos adicionales como la velocidad y el tipo de tren, la causa de los picos máximos de nivel y cualquier característica de molestia (por la rueda o chillido en el frenado).

Sin embargo, tener a cargo personal para realizar estas mediciones, no es práctico cuando se realizan mediciones durante un largo periodo de tiempo o sobre un gran número de pasos del tren. Por otra parte, las mediciones no asistidas se realizan con un sonómetro automatizado en el lugar de la medición cuando deben tratarse largos periodos de tiempo, por lo general mayores a un día, sin embargo, este tipo de mediciones también presenta una desventaja, y es que debido a la falta de presencia de personal durante la evaluación de los eventos, no pueden detallarse los casos en que se presenten máximos de ruido ni la discriminación de los tipos de fuentes inmersas durante el paso del tren, lo cual complica su posterior análisis y evaluación.

Los puntos de medición escogidos deben ser representativos del peor de los casos en que se presenten niveles de ruido por parte del tren y deben ser suficientes puntos para cuantificar los

niveles de ruido de cada sección de vía considerada dentro de la evaluación donde pueden ser incluidos los desvíos, los pasos de nivel, rectas, curvas y áreas de aumento de velocidad. Para el caso de las mediciones que se van a realizar en el protocolo propuesto en este proyecto, se plantea un registro asistido puesto que se evaluará únicamente el evento sonoro del paso del tren y en estado estacionario y es necesario estar presente durante este proceso para identificar las fuentes inmersas en la medición.

En cuanto al criterio que se recomienda en esta Guía de Evaluación de la EPA para escoger el punto de evaluación (donde se presente la mayor sensibilidad al nivel de ruido que genera el tren por su paso), no es posible aplicarlo a las condiciones locales puesto que el punto de evaluación según el protocolo que se plantea debe cumplir con ciertos requerimientos de entorno acústico para permitir la libre propagación del sonido y no contaminar la medición. Sin embargo, en caso de querer aplicar este procedimiento, no se cuenta con el conocimiento acerca del punto crítico en la ciudad donde el paso del tren afecte negativa y significativamente la salud de la población. Y en cuanto a la cantidad de puntos de medición por evento sonoro, es posible realizar el registro del nivel de ruido únicamente a un solo lado de la vía siempre y cuando el tren sea simétrico acústicamente hablando.

Una fortaleza adicional que tiene esta normativa es que en su modelo de predicción sugiere que se haga una evaluación y seguimiento constante a las vías que se van a construir o remodelar. Para cumplir este objetivo, primero se mide el nivel de ruido actual, segundo, se predice el mismo nivel de ruido por medio de un software que permita simular la propagación del ruido que generan los trenes como, por ejemplo, SoundPlan de Braunstein + Berndt, compañía alemana, y CadnaA de DataKustik, también compañía alemana. Como tercer paso se tiene el diseño y cálculo de un sistema para la reducción de estos niveles y por último, luego de

haber sido construida la vía o el tren, se mide nuevamente para verificar el diseño y las predicciones. En caso en que las predicciones estén muy lejos del nivel real medido al momento de la verificación se procede a diseñar nuevamente la reducción. Lo anterior es considerado una fortaleza porque permite entender el compromiso existente para mantener bajos los niveles de ruido que genere el paso del tren incluso antes de comenzar la construcción de la vía. Y de igual forma mantener el seguimiento periódico a las infraestructuras para asegurar que sus actividades mantengan un nivel de ruido por debajo de lo que permite la ley.

Schall 03.

El método de predicción alemán Schall 03 es el modelo matemático que se encuentra inmerso dentro del software de simulación CadnaA. Este método realiza la evaluación de datos por bandas de octava desde 63 Hz hasta 8 kHz. Esta normativa, al igual que varias de las expuestas a lo largo del desarrollo de este proyecto, divide los trenes por el tipo de carga y acción que ejecutan, del cual surge el tipo de fuente de ruido que actúa en el momento, puesto que el movimiento del tren genera ruido aerodinámico, ruido en el material rodante, es decir, por el constante rozamiento de las ruedas con la vía, ruido en su sistema de propulsión y ruido en el equipamiento que presente, cada uno generado en alturas diferentes, 0m sobre la cabeza del carril, 4m y 5m respectivamente. En el proceso para determinar los valores de emisión que genera el paso del tren se tienen en cuenta dos valores de referencia, uno es de velocidad, equivalente a 100 km/h y el segundo, al tiempo de evaluación o registro de medición que equivale a 1 hora. Esta normativa también tiene distintos factores de corrección que son aplicados por banda de octava según el tipo de tren y vía que se empleen para la predicción de ruido, lo cual complica la aplicación de este modelo a las condiciones colombianas puesto que no se cuenta con los trenes ni vías de las mismas características. Cabe anotar también que la

finalidad principal de esta normativa es predecir los niveles de ruido a vías o trenes que vayan a ser modificados o construidos por primera vez. En cuanto a la simulación realizada, la cual se expone en capítulos posteriores, se decide realizar una medición teniendo en cuenta el valor del tiempo de integración de referencia de 1 hora y aplicar de igual forma las condiciones del protocolo propuesto. Los resultados y análisis de resultados de las mediciones también se encuentran en el capítulo de la simulación.

Norma UNE-EN ISO 3095

Esta normativa es una de las más completas que existen en cuanto a mediciones del nivel de ruido que generan los vehículos férreos, puesto que describe el procedimiento para realizar ensayos prácticos que abarcan cuatro estados importantes del tren, como lo son, medición en estado estacionario, a velocidad constante, aceleración desde reposo (aplicando dos métodos diferentes) y momento de frenado. A pesar de no tener tantas correcciones a los niveles obtenidos en la medición, presenta las incertidumbres que pueden generar las mediciones con base en varios posibles eventos como se muestra en la Tabla 4 de donde se obtienen los rangos válidos para un dispositivo conforme a la clase 1. Sabiendo la importancia del conocimiento del valor de incertidumbre en una medición de ruido, se va a incluir en el protocolo de medición que se propone el procedimiento para la obtención de este dato como lo indica la Norma UNE-EN ISO 3095. A continuación el procedimiento (extraído de la normativa): Anexo G (Informativo). Cuantificación de las incertidumbres de medición según la Norma ISO/IEC Guía 98-3:2008.

Tabla 4. Ejemplos de los valores posibles de los componentes y de las incertidumbres pertinentes para la incertidumbre de medición relativa a las mediciones de ruido emitido por los vehículos ferroviarios. Fuente. Norma UNE-EN ISO 3095.

Valor de entrada X_i	Descripciones	Intervalo de incertidumbre	Incertidumbre tipo/ corrección del valor medio $u(x_i)\Delta L_p$
L_p	Valor de la lectura	0 dB	0 dB
$\delta_{\text{calibrador, referencia}}$	Las variaciones del nivel de presión acústica del calibrador con las condiciones de referencia	$\pm 0,25$ dB	0,14 dB
$\delta_{\text{calibrador, largo plazo}}$	Las variaciones del nivel de presión acústica del calibrador desde su última calibración	$\pm 0,07$ dB	0,04 dB
$\delta_{\text{calibrador, tensión de alimentación}}$	Cambios en la tensión de alimentación	$\pm 0,10$ dB	0,06 dB
$\delta_{\text{calibrador, coeficiente de distorsión}}^a$	Aumento máximo del nivel de presión acústica debido al coeficiente de distorsión del calibrador	[-0,21 dB; 0 dB]	0,06 dB $\Delta L_p = 0,105$ dB
$\delta_{\text{sonómetro, dirección}}^b$	Dirección del ángulo de incidencia del sonido (máx. $\pm 30^\circ$)	$\pm 0,44$ dB	0,25 dB
$\delta_{\text{sonómetro, frecuencia}}^b$	Factor de transferencia que depende la frecuencia	$\pm 0,44$ dB	0,25 dB
$\delta_{\text{sonómetro, linealidad del nivel}}$	No linealidad del sonómetro a otros niveles acústicos distinto al de la calibración	$\pm 0,8$ dB	0,46 dB
$\delta_{\text{sonómetro, impulsos}}^{ac}$	Nivel de error de la evaluación rápida de los impulsos a corto plazo	[-1,5 dB; 1 dB]	0,72 dB $\Delta L_p = 0,25$ dB
$\delta_{\text{calibrador, meteorológico}}$	Influencia de las condiciones meteorológicas en el calibrador	$\pm 0,25$ dB	0,14 dB
$\delta_{\text{sonómetro, presión del aire}}$	Influencia de la presión del aire en el sonómetro	$\pm 0,9$ dB	0,52 dB
$\delta_{\text{sonómetro, temperatura}}$	Influencia de la temperatura en el sonómetro	$\pm 0,5$ dB	0,29 dB
$\delta_{\text{sonómetro, humedad}}$	Influencia de la humedad en el sonómetro	$\pm 0,5$ dB	0,29 dB
$\delta_{\text{sonómetro, parabrisas}}^a$	Amortiguación del parabrisas	[0,12 dB; 0dB]	0,03 dB $\Delta L_p = 0,06$ dB
$\delta_{\text{trípode}}$	Reflexión de la onda del trípode	$\pm 0,6$ dB	0,35 dB
$\delta_{\text{velocidad del tren}}$	Impresión de la velocidad del tren y/o del tacómetro (intervalo $\pm 8\%$)	$\pm 0,3$ dB	0,17 dB
$\delta_{\text{distancia}}$	Variación del nivel de presión sonora por inexactitudes en la distancia del micrófono de $\pm 5\%$	Para una distancia del micrófono de 25m: $\pm 0,07$ dB Para una distancia del micrófono de 7,5m: $\pm 0,23$ dB	Para una distancia del micrófono de 25m: 0,004dB Para una distancia del micrófono de 7,5m: 0,13dB
$\delta_{\text{nivel del suelo, 7,5}}^a$	Variación del nivel de la superficie del suelo entre 0m y -2m a una distancia del micrófono de 7,5m del eje de la vía	[0 dB; 1,03 dB]	0,55 dB $\Delta L_p = 0,515$ dB
$\delta_{\text{nivel del suelo, 25}}^a$	Variación del nivel de la superficie del suelo entre 0m y -2m a una distancia del micrófono de 25m del eje de la vía	[0 dB; 0,33 dB]	0,10 dB $\Delta L_p = 0,165$ dB
δ_{redondeo}	Redondeo al entero más próximo.	$\pm 0,5$ dB	0,29 dB

^a Los intervalos asimétricos $[a, b]$ se pueden considerar como intervalos simétricos que tienen en cuenta el valor medio del margen $[(a + b)/2]$. El uso de la corrección del valor medio para $\delta_{\text{sonómetro, impulsos}}$ y $\delta_{\text{sonómetro, parabrisas}}$ aumenta el nivel acústico medio.

^b Los parámetros de $\delta_{\text{sonómetro, dirección}}$ y $\delta_{\text{sonómetro, impulsos}}$ dependen del contenido de frecuencia del registro sonoro. Los valores se calculan a partir de los registros sonoros habituales que provienen de diferentes trenes. Los valores máximos determinados se indican en la tabla.

^c En el caso de los impulsos, el parámetro $\delta_{\text{sonómetro, impulsos}}$ se debe tener en cuenta. Las señales analizadas indican que el tiempo de duración de aproximadamente 1ms es razonable para las contribuciones de los impulsos. Esto se ha asumido para calcular el intervalo del valor del parámetro $\delta_{\text{sonómetro, impulsos}}$.

^d Se asumió un aumento del nivel de presión sonora en un espacio de tiempo de 2ms sobre la base de las mediciones para la estimación del

Dentro de las generalidades, según la Norma UNE-EN ISO 3095, “la incertidumbre de medición de cada una de las cantidades acústicas utilizadas se debería determinar e indicar como la incertidumbre estándar. La incertidumbre estándar combinada se calcula entonces como la suma energética de las incertidumbres estándar. El objetivo del cálculo es la incertidumbre expandida U .

Se utilizan los siguientes términos:

- mesurando Y , valor de la cantidad determinada que tiene que medirse.
- Magnitudes de entrada X_i donde el valor del mesurando Y depende, $Y = f(X_i)$;
- Estimaciones de entrada x_i ;
- Incertidumbre (de medición): parámetro, asociado al resultado de una medición que caracteriza el rango de valores que podrían atribuirse razonablemente al mesurando Y ;
- Incertidumbre estándar u : la incertidumbre del resultado de una medición expresado como una desviación estándar;
- Coeficiente de sensibilidad $\partial f / \partial x_i$: los coeficientes de sensibilidad describen cómo la estimación de salida varía con los cambios en los valores de las estimaciones de entrada x_i ;
- Incertidumbre típica combinada u_c : incertidumbre típica del resultado de una medición cuando ese resultado se obtiene a partir de los valores de un número de otras cantidades, igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos que son variaciones o covariaciones de estas últimas cantidades ponderadas en función de cómo el resultado de la medición varía con los cambios de estas cantidades;

- Factor de cobertura k : factor numérico utilizado como un multiplicador de la incertidumbre típica combinada con el fin de obtener una incertidumbre expandida;
- Incertidumbre expandida U : Cantidad que define un intervalo en torno al resultado de una medición que debe prever para abarcar una gran parte de la distribución de valores que podrían atribuirse razonablemente al mesurando.

La incertidumbre típica combinada se calcula con la fórmula siguiente:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(x_i)} \quad (2)$$

Luego de este paso, la incertidumbre expandida se obtiene multiplicando la incertidumbre combinada estándar $u_c(y)$ por el factor de cobertura k .

$$U = k u_c(y) \quad (3)$$

Según la Norma UNE-EN ISO 3095 conviene elegir 2 como el valor de k , de forma que el intervalo $[y - U; y + U]$ presente un nivel de confianza de aproximadamente 95%”.

Esta Norma no incluye las instrucciones para caracterizar puentes, pasos a nivel, agujas, ruido de impactos, ruido al inscribir la curva, etc. Cada uno de los ensayos que se realizan en los cuatro estados del tren son independientes entre sí en cuanto a su modo de aplicación, sin embargo, hay casos en que las condiciones del entorno acústico, ruido de fondo y condiciones atmosféricas y de la vía tienen los mismos requisitos.

El protocolo de medición que plantea este proyecto propone los lineamientos que deben seguirse para registrar el nivel de ruido que genera el tren en estado estacionario y a velocidad constante ya que solo dos normativas abarcan ambos temas, que son la Norma UNE-EN ISO 3095 y el Manual Para La Medición Y Análisis De Ruido Ferroviario De Los Estados Unidos y

además de esto, ninguno de estos documentos presenta en sus métodos de evaluación la aplicación de factores de corrección que dependan del tipo de tren y vía que se desee evaluar.

Las demás normativas tratan únicamente las mediciones cuando el tren transita a velocidad constante. Los ensayos referentes al momento de frenado y aceleración desde reposo al ser tratados únicamente por esta norma ISO, no serán planteados dentro del protocolo puesto que no hay otras normativas que traten el tema para poder comparar los procedimientos y plantear el adecuado. Cuando se deseen realizar dichas mediciones se recomienda referirse a la Norma UNE-EN ISO 3095.

Método de República Checa

Las Mediciones De Ruido Durante La Construcción De Superestructuras en República Checa (Noise Measurements on Various Railway Superstructure Constructions) evalúa los niveles de presión sonora en la construcción de la superestructura férrea y el material rodante utilizado con el propósito de encontrar diferencias que existen entre las vías actuales y las que se modernizan con dichas construcciones para poder determinar posibles correcciones para la disminución del ruido. Esta metodología detalla las distintas fuentes que intervienen dentro de la emisión global por parte de un tren en movimiento de la misma forma en que lo hace la Norma Schall 03, identificando el ruido pantógrafo, que se produce a una altura aproximada de 5m sobre el techo del tren; el ruido aerodinámico, el cual aumenta su nivel a medida que la velocidad de tránsito es mayor y se genera a partir del flujo de aire que golpea la parte frontal del tren, el pantógrafo y los “bogies” (rodamientos). Este tipo de ruido puede disminuirse variando la forma frontal del tren. También está el ruido causado por parte de la unidad de potencia y el ruido de rodadura. El ruido de la unidad de potencia se origina del motor, ya sea eléctrico o diésel, del engranaje y la ventilación que estos tengan. Y finalmente, el ruido de rodadura, que es causado principalmente

por el roce entre las ruedas y los rieles de la vía. Por otro lado, se estipula claramente que la propagación del ruido depende únicamente de las condiciones ambientales y del tipo de superficies que rodee el área de tránsito del tren.

Para determinar los niveles de ruido que genera el tren de La Sabana, el cual es el tren de estudio, a velocidad constante en cada una de las alturas y así caracterizarlo es necesario contar con una mayor cantidad de equipos de medición o variar las posiciones del equipo disponible pero para realizar este procedimiento, es necesario el consentimiento de la entidad encargada de regular los trenes puesto que de ser así, sería necesario que el tren pase por el punto de medición en más de una ocasión durante el tiempo estimado para la medición, sin embargo, según la teoría de las distintas fuentes que actúan dentro del movimiento del tren, se puede dar inicio a otro proyecto de investigación cuyo objetivo sea caracterizar los trenes que actualmente están en operación en Colombia.

Estándar De Regulación Técnica Para Los Ferrocarriles Japoneses

Como se observa la descripción en la Tabla 3, en esta normativa lo único que interesa es mantener un nivel de ruido a lo largo de las vías que no supere los 75 dB(A) como lo exige el Ministerio de Ambiente de dicho país. En estas regulaciones no se indica el tipo de instrumentación que debe utilizarse. Cuando se trata de mejorar una vía existente el único requisito que indica esta norma es que el nivel de ruido en la vía sea menor que el nivel de la misma antes de ser tratada. Cuando son construcciones nuevas, la normativa es más exigente puesto que de un nivel de 75 dB(A) pasa a 60 dB(A) o menos durante el día y 55 dB(A) o menos durante la noche, lo cual se considera relevante de la normativa puesto que así se tiene un mejor

control sobre los niveles de ruido que genera el tren junto con la contaminación auditiva que este produce.

Desafortunadamente en el documento oficial japonés donde se encuentra toda la información referente al sistema férreo de este país no hay indicaciones adicionales acerca del tratamiento o procedimiento de medición de los niveles de ruido que generan las actividades ferroviarias. Sin embargo, el requisito de los 75 dB(A) mencionado en el párrafo anterior no aplica a ciertos distritos industriales, bosques montañosos escasamente habitados, páramos y tierras agrícolas.

6.2 Definiciones

La siguiente tabla indica las normativas que presentan definiciones para apoyar la comprensión del desarrollo de la metodología de medición de cada una de ellas.

Tabla 5. Criterio de definiciones. Fuente. El autor.

	Criterio evaluado
Norma	Definiciones
Método inglés	Sí presenta
Método Países Bajos, RMR	Sí presenta
Handbook for railroad noise measurement and analysis (US)	Sí presenta
EPA (Australia)– Guidelines for the assessment of noise from rail infrastructure	Sí presenta
Schall 03	No especifica
UNE – EN ISO 3095	Sí presenta
Método de República Checa	No especifica
Estándar de regulación técnica para los ferrocarriles japoneses	No especifica

Como se observa en la tabla anterior, no todas las normativas presentan las definiciones necesarias para contribuir con la comprensión de los temas que tratan. El protocolo que se plantea en este proyecto llevará las definiciones que se presentan a continuación para ayudar con la comprensión del mismo. Estas definiciones son referenciadas de las mismas normativas base de estudio:

-Acoplamiento de vagones: El acto de conectar dos vehículos ferroviarios. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Amplitud: Máximo valor de una cantidad sinusoidal. Para una onda sonora, la amplitud es la diferencia entre la presión instantánea de un ciclo dado de la onda y la presión del ambiente en un lapso de tiempo determinado. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Ángulo de incidencia: Ángulo en el cual la onda sonora hace contacto con la superficie del medidor. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Ángulo de visión: Ángulo que es capaz de captar el instrumento de medición en proyección horizontal hacia la fuente sonora. (Transporte, 1995)

-Banda de octava: Intervalo frecuencial entre una frecuencia superior y otra inferior con base 2. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Banda de tercio de octava: Intervalo frecuencial entre una frecuencia superior y otra inferior con base 2 elevado a $1/3$. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Barrera: Una barrera acústica es una barrera, muro o edificación construida a propósito para cubrir la fuente sonora del punto de recepción. Comúnmente, el término “barrera” se utiliza para describir una pantalla delgada ubicada cerca de la vía con una altura aproximada de 1m a 3m. (Transporte, 1995)

-Cabeza del carril: Es la parte superior del carril que está en constante rozamiento con las ruedas del tren durante su movimiento. (Transporte, 1995)

-Decibel, dB: Unidad de medida para el nivel sonoro. Equivale a 10 veces el logaritmo con base 10 del cuadrado de la diferencia entre la presión sonora y la presión sonora de referencia de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Energía acústica: También conocida como energía sonora o solo energía. Se refiere comúnmente como el cuadrado de la diferencia entre la presión sonora, energía sonora, energía o energía acústica y la presión sonora de referencia de 2×10^{-5} Pa transmitida en las ondas sonoras al ser generadas. Algebraicamente equivale a $10^{L/10}$, siendo L el nivel sonoro expresado en decibeles. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Espectro audible: Rango de frecuencias audibles para el oído humano; teóricamente va desde 20 Hz hasta 20000 Hz. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Frecuencia: Número de ciclos o repeticiones por segundo o número de longitudes de onda que han pasado por un punto estacionario durante 1s. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Hertz, Hz: Unidad de medida de la frecuencia. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Locomotora: Es el vehículo que provee de potencia al tren en su totalidad. (Transporte, 1995)

-Longitud de onda: Distancia entre dos frentes de onda que forman un periodo de una onda sinusoidal. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Micrófono: Transductor electro acústico diseñado para representar eléctricamente una señal acústica o un cambio de presión. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Nivel de exposición sonora (SEL): Es el nivel en el punto de recepción que al mantenerse por 1s causa la misma energía con ponderación A recibida de un evento sonoro. (Transporte, 1995)

-Nivel sonoro continuo equivalente, L_{Aeq} : Para el protocolo de medición propuesto se validan las siguientes definiciones de nivel de sonido continuo equivalente.

- $L_{Aeq,T}$: Nivel sonoro de una fuente registrado en un punto y espacio durante un tiempo definido con ponderación A. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-El nivel de una cantidad es el logaritmo de la diferencia de esa cantidad con un valor de referencia del mismo tipo de cantidad. (Transporte, 1995)

-Nivel de sonido máximo: Máximo nivel registrado en el tiempo que dura la medición con ponderación A expresado como $L_{AMáx}$. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Nivel de presión sonora con ponderación A: La ponderación A atenúa las frecuencias bajas y en una menor medida las frecuencias que se encuentran por encima de los 4000 Hz. Su comportamiento es el más parecido al del oído humano. Se expresa en dB(A). (Transporte, 1995)

-Percentil L90: Unidad estadística que describe el nivel sonoro excedido el 90% del tiempo de medición. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Posición de la fuente: Es la posición en la fuente desde la cual el ruido es generado. (Transporte, 1995)

-Punto de recepción: Punto de ubicación del medidor para evaluar el nivel de presión sonora que genera la fuente. (Transporte, 1995)

-Rango dinámico: Diferencia algebraica entre el valor mayor y menor de entrada al instrumento de medición sin que produzca distorsión. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Respuesta de tiempo “Slow”: Configuración que usa un sonómetro para caracterizar un evento sonoro continuo, tomando en consideración que el filtro de respuesta rápida “fast” es preferible para aquellos sonidos impulsivos durante el intervalo de medición. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Ruido: Describe generalmente el sonido indeseado. En el caso de la industria ferroviaria, se considera como todo tipo de ruido o sonido que produce el movimiento u operación de los vehículos férreos. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Ruido de Fondo: En el caso de la industria ferroviaria, es el ruido de todas las fuentes que no se encuentran relacionadas al tren, como por ejemplo, ruido por tráfico rodado, ruido aéreo, señales de tránsito, ruido generado por las personas, etc. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Tren: Conjunto de vehículos férreos acoplados entre sí para formar una sola unidad operativa. (ISO, 2014)

-Tiempo de medición: Periodo de tiempo durante el cual se evalúa el evento sonoro. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Vagón: Vehículo ferroviario que puede tener o no potencia propia usado para transportar pasajeros o carga de algún material, liviano o pesado. (Transporte, 1995)

-Vía: Para los sistemas convencionales, consiste en dos rieles de acero paralelos soportados por traviesas de madera. (Transporte, 1995)

-Vía, lecho o cama de balasto: Se refiere a la vía o cama compuesta por piedras, granito o balasto unido para soportar la vía. También puede producir una atenuación en el nivel de ruido que genera la fuente. (Transporte, 1995)

6.3 Instrumento de medida y calibración

La siguiente tabla indica las recomendaciones que hacen las distintas normativas y métodos que se analizaron con respecto al tipo de instrumentos de medición y calibración.

Tabla 6. Criterio de instrumentación de medida y calibración. Fuente. El autor.

Norma	Criterio evaluado Tipo de instrumento de medición y calibración
Método inglés	Clase 1
Método Países Bajos, RMR	No especifica
Handbook for railroad noise measurement and analysis (US)	Clase 1
EPA (Australia)– Guidelines for the assessment of noise from rail infrastructure	Clase 1
Schall 03	No especifica
UNE – EN ISO 3095	Clase 1
Método de República Checa	Clase 1
Estándar de regulación técnica para los ferrocarriles japoneses	No especifica

Como puede observarse en la tabla anterior, no todas las normativas tienen especificaciones acerca del instrumento de medición y calibración que deba usarse durante las mediciones. Las normativas que sí presentan información al respecto recomiendan instrumentos de medición y calibración de clase 1, o en su defecto, hacer uso de una configuración especial de micrófonos que tengan características de campo libre y al igual que el sonómetro, deben usar su respectiva pantalla de protección contra el viento, hacer uso de un trípode y procurar no tener obstáculos de cualquier tipo en el trayecto directo que hay entre la fuente sonora y el instrumento de medición. Entiéndase como micrófono de campo libre aquel que sea “más adecuado para la medida de fuentes sonoras cuyas ondas llegan directamente desde la fuente al micrófono, siguiendo una única dirección”, “ya que cualquier micrófono o cuerpo extraño que se introduzca en el campo sonoro produce una perturbación, pero los micrófonos de campo libre están diseñados para compensar su propia perturbación.” (Parrondo, Velarde, González, Ballesteros, & Santolaria,

2006) El protocolo de medición que se propone en este documento sugiere hacer uso de un sonómetro y calibrador acústico de clase 1.

6.4 Campo de aplicación

Cada una de los métodos que se tomaron en cuenta tienen distintos campos de aplicación como, por ejemplo, los trenes en movimiento y toda actividad ferroviaria que se realice como el acople y desacople de vagones, entre otros. Hay normativas que se enfocan estrictamente en las nuevas vías o trenes que entran en operación como en las mejoras que se hagan a las vías ya existentes. A continuación, se detalla el campo de aplicación para cada norma y metodología de estudio:

Tabla 7. Criterio de campo de aplicación. Fuente. El autor.

	Criterio evaluado
Norma	Campo de aplicación
Método inglés	Trenes en movimiento.
Método Países Bajos, RMR	Trenes en movimiento.
Handbook for railroad noise measurement and analysis (US)	Trenes en movimiento y en estado estacionario. Se tienen en cuenta también los escenarios dentro del patio de operaciones como el acople y desacople de vagones; el momento de carga, descarga, etc. Y además de esto, dentro de la cabina del conductor y en los cuartos de descanso para operarios.
EPA (Australia)– Guidelines for the assessment of noise from rail infrastructure	Nuevos trenes o vías y mejoras de los mismos. No aplica para trenes o vías ya existentes ni bocina o campanas ni acciones en el patio de operaciones.
Schall 03	Nuevos trenes o vías o modificaciones a los que ya existen.
UNE – EN ISO 3095	Mediciones en campo de trenes a velocidad constante, estado estacionario, aceleración desde reposo y momento de frenado. No incluye instrucciones para caracterizar puentes o pasos de nivel, agujas, ruido al inscribir la curva, etc.
Método de República Checa	Trenes en movimiento.
Estándar de regulación técnica para los ferrocarriles japoneses	Trenes en movimiento.

En la Tabla 7 se puede apreciar que las normas que se tienen en cuenta para la elaboración del protocolo de medición son diversas en sus procesos metodológicos y por consiguiente también en sus campos de aplicación. La mayoría de estas normas se enfocan en los trenes en movimiento ya existentes, pero hay otras, como la EPA en Australia y el método alemán Schall 03 que sugieren ser aplicadas a los trenes y o vías nuevas que entren en operación. Además de esto, la Guía Para La Medición Y Análisis De Ruido Ferroviario de los Estados Unidos presenta por ejemplo los lineamientos necesarios para realizar las mediciones dentro del patio de operaciones de los trenes, dentro de la cabina del conductor y en los cuartos de descanso para poder evaluar el impacto que tienen estas operaciones en la salud de los trabajadores.

El campo de aplicación del protocolo que se propone en este proyecto son los trenes que se encuentren en estado estacionario y/o transiten a velocidad constante. Las mediciones con respecto al momento de frenado y aceleración desde reposo se exponen únicamente en el desarrollo de la Norma UNE-EN ISO 3095 y por tanto, para la realización de estos dos procedimientos se sugiere como referencia esta normativa ISO.

6.5 Distancia a la fuente y altura del medidor

Durante el proceso de análisis, se encontró que la distancia en que se posiciona el instrumento de medición con respecto a la fuente sonora, que en este caso es el tren, y la altura del medidor respecto a la cabeza del carril o nivel del suelo varía entre las normativas.

De la Norma UNE-EN ISO 3095 cuando en el ensayo a velocidad constante la velocidad de tránsito es mayor o igual a 200 km/h, las posiciones del medidor a la fuente son a 25m y a una altura de 3.5m sobre el nivel de la cabeza del carril, se puede concluir que la velocidad de tránsito del tren es un factor importante en la generación de los niveles de ruido, es decir, que a mayor velocidad, mayores niveles de ruido que genera el tren en su paso debido a que emplea una mayor cantidad de potencia para moverse. Esta Norma UNE-EN ISO 3095 sugiere además

de lo escrito al comienzo de este párrafo que para las demás mediciones donde las velocidades del tren sean menores a los 200 km/h se ubican los medidores a una distancia de la fuente de 7.5m y una altura, con el instrumento en dirección hacia la fuente, de 1.2m.

La metodología alemana Schall 03 recomienda también una distancia de la fuente de 25m para posicionar el medidor con una velocidad de referencia de 100 km/h. Este método describe que se usan tres distintas alturas para evaluar el ruido por el paso del tren. A 0m para la medición específica del ruido de rodadura, 4m para el ruido del equipamiento del tren y 5m sobre el nivel de la cabeza del carril para el ruido aerodinámico que se produce.

El método japonés también recomienda la distancia entre el medidor y la fuente de 25m para las mediciones sin hacer especificación de la altura del medidor a usar en esta distancia. Se indica que para medir nuevas construcciones y modificaciones de gran escala, se posiciona el medidor a una distancia de la fuente de 12.5m y a una altura de 1.2m sobre el nivel del suelo.

Las distancias que maneja la EPA en Australia de 35m y 180m entre los medidores y la fuente son distancias de referencia para diseñar los atenuadores de ruido que se aplicarán a trenes nuevos y/o vías que entren en operación ya que, según la EPA, a estas distancias en el sur de Australia hay presencia de espacios residenciales y el control de ruido debe ser garantizado. La altura que se sugiera para estas distancias es entre 1.2m y 1.5m sobre el nivel del suelo.

La normativa RMR presenta varias alturas de medición según la categoría del tren a evaluar, de modo que también depende en gran parte de las características propias de los trenes holandeses. Las alturas para las categorías de 1 a 8 para el cálculo por banda de octava son al nivel del suelo y a 0.5m según el nivel de emisión que se obtenga. Para la categoría 9 se manejan alturas de 0.5m, 2m, 4m y 5m que dependen también del nivel de emisión que se obtenga durante el proceso de cálculo.

Por otra parte, la Guía de Evaluación y Medición de Ruido Ferroviario, indica que se ubique el punto de medición a 30m de la vía con un espacio a su alrededor de radio con mismo valor libre de obstáculos con superficies reflejantes que no contaminen las mediciones y a una altura sobre el nivel del suelo de 1.2m. Un gran punto a favor que tiene esta normativa es que muestra interés por los niveles de ruido a los que se expone el conductor del tren constantemente cuando está en operación y cuando no, al plantear y sugerir mediciones dentro de la cabina de la locomotora y en los cuartos de descanso dentro del patio de operaciones ferroviarias.

Para la finalidad de este proyecto, una distancia de evaluación a 7.5m del eje de la vía es apropiada para las condiciones de movilidad local puesto que la velocidad de tránsito máxima permitida dentro y fuera del casco urbano no supera los 25 km/h (según el conductor del tren de La Sabana), y por tanto, el nivel de ruido que genera el paso del tren puede asumirse según los modelos estudiados es mucho menor que en varios países extranjeros. Así mismo, de acuerdo a las normativas, cuando se tiene una posición más cercana a la vía también se evalúa a una altura relativamente baja en comparación con la altura de los medidores que se ubican a 25m, así que para el modelo de medición que se propone en este documento a una distancia de 7.5m de la vía, el sonómetro debe estar a una altura de 1.2m sobre la cabeza del carril.

6.6 Condiciones atmosféricas

A continuación se indica si se deben tener en cuenta las condiciones atmosféricas o no, según las normativas evaluadas.

Tabla 8. Criterio de las condiciones atmosféricas. Fuente. El autor.

Norma	Criterio evaluado Condiciones atmosféricas
Método inglés	No especifica
Método Países Bajos, RMR	No especifica
Handbook for railroad noise measurement and analysis (US)	Debe registrarse la velocidad y dirección del viento.
EPA – Guidelines for the assessment of noise from rail infrastructure	Debe registrarse la humedad relativa, dirección y velocidad del viento a la altura del micrófono la cual no puede exceder los 5 m/s.
Schall 03	No son tomadas en cuenta.
UNE – EN ISO 3095	Debe registrarse la humedad relativa, dirección y velocidad del viento a la altura del micrófono la cual no puede exceder los 5 m/s.
Método de República Checa	No especifica
Estándar de regulación técnica para los ferrocarriles japoneses	No especifica

Según la mayoría de las normativas estudiadas, las condiciones atmosféricas del sitio de medición no influyen de manera significativa en los resultados de las mediciones realizadas y por eso es que no se especifica si deben registrarse valores de la velocidad y dirección del viento, la humedad relativa y la temperatura. Únicamente la Norma UNE-EN ISO 3095 y el protocolo que plantea la EPA, sugieren que la velocidad del viento a la altura del micrófono no puede exceder los 5 m/s. La Norma UNE-EN ISO 3095 declara que “las fuertes lluvias o velocidad del viento superior a 5 m/s puede afectar al ruido de fondo”.

Como se ha mencionado en párrafos anteriores, la propagación del sonido depende del medio que lo rodee, en consecuencia, no tener en cuenta las condiciones del ambiente del sitio de medición puede producir error en la lectura del medidor así que se aconseja tener registro de la información atmosférica. El protocolo de medición que se plantea en este proyecto adopta los

requisitos y condiciones atmosféricas acerca de los registros que deban cumplirse para que las mediciones no se vean afectadas, es decir, debe registrarse la humedad relativa, dirección y velocidad del viento a la altura del micrófono la cual no puede exceder los 5 m/s.

6.7 Número de mediciones

En la Tabla 9 se puede apreciar el número de mediciones que se realizan por punto de medición según cada metodología de medición.

Tabla 9. Criterio del número de mediciones. Fuente. El autor.

Norma	Criterio evaluado
	Número de mediciones
Método inglés	No especifica
Método Países Bajos, RMR	No especifica
Handbook for railroad noise measurement and analysis (US)	1 registro por punto de medición. 2 mediciones del nivel de ruido de fondo, antes y después del evento.
EPA – Guidelines for the assessment of noise from rail infrastructure	Se mide durante 24 horas.
Schall 03	No especifica
UNE – EN ISO 3095	3 registros por punto de medición.
Método de República Checa	3 registros por punto de medición.
Estándar de regulación técnica para los ferrocarriles japoneses	No especifica

El número de registros que haga el sonómetro va ligado al número de posiciones de medición y al tipo de ensayo que se realiza. Por ejemplo, según la Norma UNE-EN ISO 3095, para las mediciones del tren en estado estacionario debe realizarse una malla de medición que abarque la longitud total del tren y medir en cada punto 3 veces durante 20s cada medición; para la medición del tren a velocidad constante, por ejemplo, esta norma indica que deben hacerse los mismos tres registros, pero en un solo punto de medición a cada lado de la vía. Y las demás mediciones también sugieren de forma general que se hagan tres registros por puntos de medición.

La EPA por su parte indica que según la naturaleza de las actividades ferroviarias debe registrarse el nivel durante las 24 horas del día ya que hay cortos periodos de tiempo donde se obtiene un nivel de presión sonora máximo que es cuando el tren hace su paso y largos periodos de tiempo donde no hay actividad férrea y sólo se registra el nivel de ruido de fondo. La aplicación de esta metodología implica que la finalidad del estudio es por ejemplo, la realización de un mapa de ruido donde deben evaluarse los niveles durante todo el día por varios días, así que realizar las mediciones al nivel de ruido que genera el tren durante las 24 horas del día no es relevante porque el objetivo principal de este proyecto es plantear la metodología que debe realizarse al momento de medir el nivel de ruido que genera el tren a su paso y en estado estacionario, así que para tener un mejor criterio de evaluación, puesto que puede haber presencia de fuentes externas que no puedan controlarse aumentando el nivel de ruido de fondo durante el procedimiento, se van a emplear tres registros por punto en los ensayos a velocidad constante y estado estacionario como lo sugieren varias normativas que se estudiaron y al finalizar se promedian los niveles registrados durante cada uno de los eventos sonoros.

Para ambos casos se recomienda realizar las mediciones en ambos lados del tren y como lo recomienda la Norma UNE-EN ISO 3095, se pueden omitir las mediciones a uno de los lados siempre y cuando la fuente sea acústicamente simétrica.

6.8 Unidad de medida

Según normativa internacional la unidad de medida con que se evalúa el nivel de ruido producido por este tipo de fuente es el nivel de presión sonora continuo equivalente con ponderación A, L_{Aeq} . Este valor puede obtenerse directamente con el sonómetro o realizar un promedio energético de los niveles obtenidos en dB(A) en cada punto de medición. Algunas de las normas estudiadas varían los cálculos agregando factores de corrección que por lo general se encuentran ligados al tipo de tren en cada normativa. Por ejemplo, el método de predicción inglés obtiene el nivel L_{Aeq} a partir del nivel de exposición sonora, SEL, para el segmento total de la vía de estudio, que a su vez tiene incluida la corrección por el mismo tipo de vía, el tipo de tren, el tipo de sistema de frenos que utiliza y el tipo de carga que transporta.

De igual manera que sucede con el procedimiento de la normativa londinense, las normas internacionales RMR y Schall 03 presentan para el cálculo del valor final de L_{Aeq} distintas correcciones por absorción del aire, del suelo, de la distancia entre el punto de medición y la vía, entre otras. Estos cálculos también presentan variables específicas que relacionan el sistema de frenado del tren, la vía y el tipo de carga que transportan, variando entre normativas cada uno de estos valores de corrección de referencia ya que son específicos para cada país donde se desarrolla la normativa y por tanto, de todos los modelos matemáticos que se estudiaron en cada una, se van a tener en cuenta para la elaboración del protocolo de medición la corrección por influencia del suelo, del aire, de la distancia entre la fuente y el punto de medición y la corrección a realizar por influencia de la cama de balasto en la vía.

Para dar una mejor idea del significado de los procedimientos que se describen en los párrafos anteriores, a continuación, se presentan los primeros pasos para calcular el valor de L_{Aeq} de acuerdo al método simplificado de la Norma RMR:

$$L_{Aeq} = E + C_{reflect} - D_{dist} - D_{air} - D_{suel} - D_{meteo} \quad (4)$$

donde:

E: Valor de emisión, se calculan como se indica en la Norma, se tienen en cuenta las categorías de los trenes y sus coeficientes:

$$E = 20l g \left(\sum_{c=1}^y 10^{\frac{E_{nr,c}}{10}} + \sum_{c=1}^y 10^{\frac{E_{r,c}}{10}} \right) \quad (5)$$

donde:

$E_{nr,c}$: Término de emisión para cada categoría del tren donde no tiene activo su sistema de frenado.

$E_{r,c}$: Término de emisión para cada categoría del tren donde tiene activo su sistema de frenado.

c: Categoría del tren.

y: Número total de categorías presentes.

Los valores de emisión para cada categoría del tren se determinan de la siguiente manera:

$$E_{nr,c} = a_c + b_c \lg v_c + 10 \lg Q_c + C_{b,c} \quad (6)$$

$$E_{r,c} = a_{r,c} + b_{r,c} \lg v_c + 10 \lg Q_{r,c} + C_{b,c} \quad (7)$$

Valores de emisión estándares a_c , b_c , $a_{r,c}$ y $b_{r,c}$ se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 10. Valores estándar de emisión en función de la categoría del tren. Fuente: Norma RMR.

Categoría	Trenes con sistema de freno desactivado		Trenes con sistema de freno activado	
	a_c	b_c	$a_{r,c}$	$b_{r,c}$
1	14.9	23.6	16.4	25.3
2	18.8	22.3	19.6	23.9
3	20.5	19.6	20.5	19.6
4	24.3	20.0	23.8	22.4
5	46.0	10.0	47.0	10.0
6	20.5	19.6	20.5	19.6
7	18.0	22.0	18.0	22.0
8	25.7	16.1	25.7	16.1
9	22.0	18.3	22.0	18.3

Q_c : Cantidad promedio de trenes que no tienen su sistema de frenado activo de acuerdo a la categoría de tren. [h^{-1}];

$Q_{r,c}$: Cantidad promedio de trenes que tienen su sistema de frenado activo de acuerdo a la categoría de tren [h^{-1}];

v_c : Velocidad promedio de los trenes [km/h^{-1}];

b: Tipo de vía [-]

Tabla 11. Término de corrección $C_{b,c}$ en función de la categoría del tren y el tipo de vía. Fuente: Norma RMR.

Categoría	b=1	b=2	b=3	b=4	b=5	b=64	b=7	b=8
1	0	2	4	6	3	-	0	2
2	0	2	5	7	5	-	0	3
3	0	1	3	5	2	-	0	2
4	0	2	5	7	4	-	0	2
5	0	1	2	4	4	-	0	2
6	0	1	3	5	2	-	0	2
75	0	1	-	-	-	-	-	-
8	0	2	4	6	3	-	0	2
9	0	2	4	6	3	-	0	2

C_{reflec} :

$$C_{reflec} = 4(dr + dw) \quad (8)$$

dr: distancia entre el objeto reflejante al centro de la vía (paralelo a la vía).

dw: distancia entre el receptor y el centro de la vía.

D_{dist} :

$$D_{dist} = 10 \log(r) \quad (9)$$

r: distancia más corta del receptor al centro de la vía.

D_{air} :

$$D_{air} = 0,016r^{0.9} \quad (10)$$

D_{suel}

- 4 vías con b=6 continúan siendo estudiadas
- 5 vías de categoría 7 continúan siendo estudiadas

$D_{suel} =$

$$3(B^{0.5})(1.2(e^{-0.75(0.6hbs+0.5)} + e^{-0.9hw}) + 1.6B - 1.8 - 3(1 - B) \left(1 - e^{\left(\frac{-0.01r}{hw} + hbs + 0.4\right)}\right)) \quad (11)$$

B: factor del suelo que no esté pavimentado = 1, incluye balasto; B=0 pavimento, agua, etc. Los factores hw y hbs están relacionados con la categoría del tren.

$$D_{meteo} = 3.5 \left(1 - e^{-0.04 \left(\frac{r}{hw} + 0.6hbs + 0.5\right) - 5}\right) \quad (12)$$

si $D_{meteo} < 0$ entonces $D_{meteo} = 0$. Los factores hw y hbs están relacionados con la categoría del tren que se encuentra detallado en la página 32.

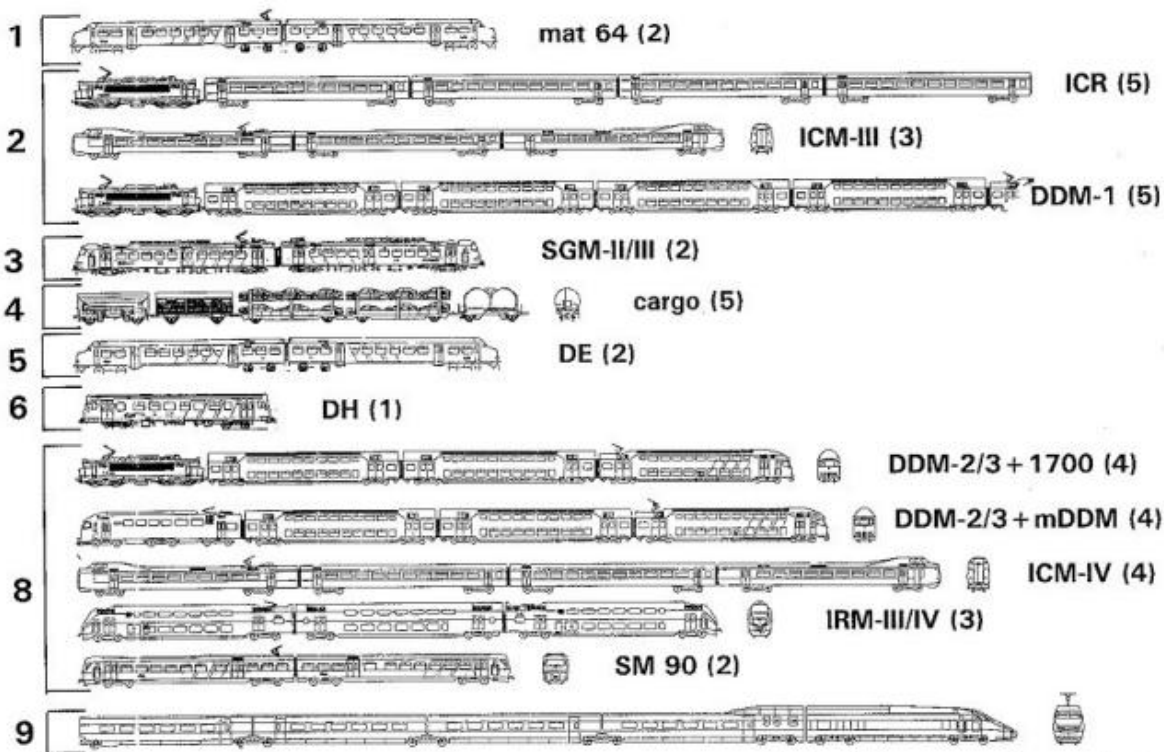
El objetivo de esta descripción es demostrar la importancia de plantear un protocolo de medición local ya que varias de estas normativas presentan factores de corrección referentes a las características de vías y trenes propias de cada país tal como se ha mencionado anteriormente.

Como puede apreciarse en el procedimiento del método simplificado de la Norma RMR, sus cálculos se encuentran directamente ligados al tipo de tren y vías disponibles en los Países Bajos, y aunque sea el caso de contar con la disponibilidad de un tren a nivel local con características parecidas a alguna de las categorías proporcionadas por esta normativa (ver Figura 3), seguir sus procedimientos puede dar como resultado variaciones en los niveles totales obtenidos con respecto a la realidad puesto que los factores de corrección se han determinado para caracterizar únicamente el tipo de trenes y vías holandesas.

Por otra parte, normativas como la Guía de los Estados Unidos, los procedimientos para el sistema férreo japonés, el protocolo propuesto por la EPA y la Norma UNE-EN ISO 3095 determinan que es válido tomar el valor de L_{Aeq} que brinda el sonómetro sin necesidad de asociar estos valores a factores de corrección específicos por tipo de tren. Para el caso específico del protocolo de la EPA, el tiempo de medición varía ya que se analiza durante todo el día el movimiento de los trenes seleccionando 15 horas para el periodo diurno y 9 horas para el periodo

nocturno. Según esta normativa cuando se utiliza el parámetro $L_{Aeq,1h}$, se hace referencia a la evaluación del peor de los casos en cuanto a los niveles de ruido que presenta el determinado sitio de medición.

FIGURA 3. CATEGORÍAS DE LOS DISTINTOS TIPOS DE TRENES SEGÚN LA NORMA RMR.



6.9 Correcciones

De acuerdo a la distintas normativas y métodos, uno de los aspectos más importantes en cuanto al tratamiento de datos son las correcciones que se realizan a los resultados obtenidos una vez se finalizan las mediciones ya que cada método presenta sus propias correcciones haciendo que el análisis de este criterio sea más exigente ya que por ejemplo, según la documentación del método que aplica la República Checa y Japón en sus ferrocarriles, no se tienen en cuenta ningún tipo de corrección a los resultados finales.

Para el caso del método inglés, se presentan 10 tipos de correcciones, dentro de las cuales se encuentran principalmente:

Corrección por la absorción del aire:

$$0.2 - 0.008d' \text{ dB}(A) \quad (13)$$

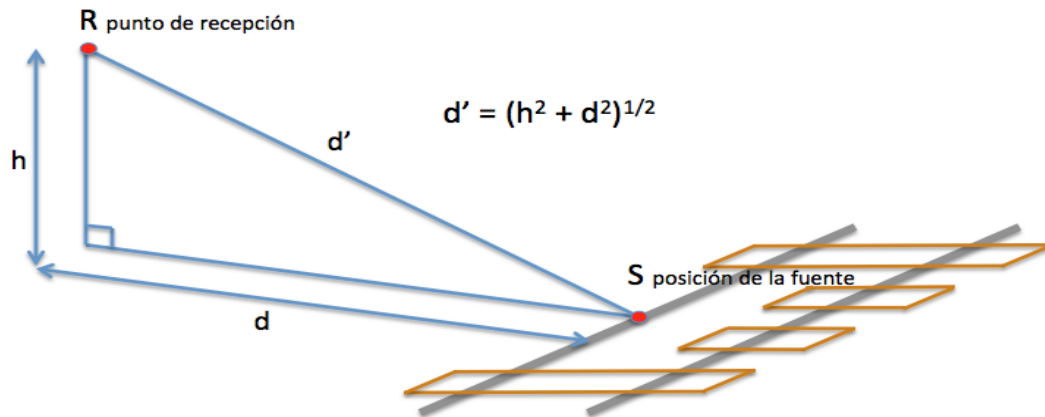
Donde, d' = distancia entre la fuente y el medidor, no aplica a locomotoras Diesel a máx. potencia);

Corrección por distancia entre la fuente y el medidor:

$$-10 \log\left(\frac{d'}{25}\right) \quad (14)$$

Donde, $d' \geq 10\text{m}$ es la hipotenusa entre la altura de las ruedas del tren y el medidor (ver Figura 4);

FIGURA 4. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL PROCESO PARA HALLAR LA CORRECCIÓN POR DISTANCIA COMO LO SUGIERE EL MÉTODO INGLÉS.



Corrección por cambio de nivel y estructuras:

$$+2.5 \text{ dB}(A) \quad (15)$$

Corrección por la cama de balasto:

$$-1.5 \text{ dB}(A) \quad (16)$$

Por otra parte, el método de los Países Bajos, RMR, es el que más correcciones presenta ya que abarca tres modelos de cálculo distintos, el modelo global, el simplificado y el detallado. A diferencia del método inglés, este modelo de cálculo tiene en cuenta distintos factores que influyen en la propagación del sonido como lo es, por ejemplo, las correcciones por efectos meteorológicos:

$$3.5(1 - e^{-0.04(\frac{r}{hw} + 0.6hbs + 0.5)})^{-5} \quad (17)$$

Donde, si el resultado es < 0 entonces se iguala a cero;

Las correcciones que se aplican por la distancia entre el medidor y la fuente:

$$3(B^{0.5})(1 - e^{-0.03r})(1.2(e^{-0.75(0.6hbs + 0.5)} + e^{-0.9hw}) + 1.6B - 1.8 - 3(1 - B)\left(1 - e^{\left(-\frac{0.01r}{hw} + hbs + 0.4\right)}\right)) \quad (18)$$

Donde, B: factor del suelo que no esté pavimentado = 1, incluye balasto; B=0 pavimento, agua, etc.;

El efecto del aire:

$$0.016r^{(0.9)} \quad (19)$$

Donde $r=d'$ en el método inglés.

Como puede observarse en las fórmulas (17), (18), (19) y también en el ejemplo del ítem 6.8, para realizar estos cálculos se tienen en cuenta distintos factores de corrección que se encuentran relacionados directamente con el tipo de vía y tren que se analiza según la categoría del mismo. El modelo de cálculo alemán Schall 03 utiliza factores de corrección propios para sus vías y trenes dentro de la fórmula general que determina el nivel de presión sonora equivalente en el punto de medición. Donde además cuenta con el procedimiento para aproximar los valores de emisión del tren cuando transita a una velocidad distinta a la velocidad de referencia que equivale a 100 km/h mediante la siguiente ecuación que se obtiene de la edición del año 2012 de la normativa. El factor b, es un factor de velocidad que depende de la frecuencia, ver tabla 12:

$$L_{v0} = L_{v,train} - b \cdot \log\left(\frac{v_{train}}{100 \text{ km/h}}\right) \quad (20)$$

Tabla 12. Coeficientes de velocidad por banda del factor b. (cálculo realizado por banda de tercio de octava). Fuente. Schall 03.

Banda de Octava - Hz	63	120	250	500	1000	2000	4000	8000
Coeficiente de velocidad, b.	-5	-5	-5	0	10	25	25	25

Esta normativa, como se ha visto anteriormente y al igual que varias de las normativas expuestas en este proyecto, divide los trenes por el tipo de carga y acción que ejecutan, del cual depende el tipo de fuente de ruido que actúa en el momento. Los niveles de emisión sonora de referencia se promedian en una hora y son registrados a una distancia de 25m del centro de la vía

y a una altura de 3,5m sobre la cabeza del carril. Este modelo alemán no tiene en cuenta las condiciones atmosféricas del lugar.

En el Manual Para La Medición Y Análisis Del Ruido Ferroviario de los Estados Unidos no se presentan correcciones por la distancia entre el medidor y la fuente ni por las condiciones atmosféricas del sitio de medición. La única indicación que hace esta normativa es referente al tratamiento de los datos cuando se comparan con los niveles de ruido de fondo obtenidos antes y después de cada uno de los grupos de mediciones.

Para el protocolo propuesto se van a tener en cuenta las siguientes correcciones que serán aplicadas al valor global obtenido tras las mediciones. Estas correcciones son tomadas en cuenta de las normativas estudiadas específicamente porque no presentan factores de corrección en su aplicación que se encuentren ligados al tipo de vía y tren:

- Absorción que realiza la cama de balasto como se indica en el método inglés,

$$-1.5 \text{ dB(A) al nivel global.} \quad (21)$$

- Corrección por la distancia que hay entre el punto de medición y la fuente,

$$+0.2 - 0.008d' \text{ dB(A);} \quad (22)$$

donde d' es la distancia que hay entre el punto de la fuente suponiendo que es sobre la cabeza del carril y el medidor, es decir, se hace uso del Teorema de Pitágoras para hallar el valor de la distancia d' , la cual sería la hipotenusa en la respectiva situación tal como lo indica el método inglés (ver Figura 2).

- Corrección por aire, se obtiene del método RMR.

$$+0.016(d'^{0.9}) \text{ dB(A)} \quad (23)$$

- Corrección por un cambio de nivel o estructura como lo sugiere el método inglés para estos casos.

$$+2.5 \text{ dB(A)} \quad (24)$$

6.10 Tratamiento de datos

Cada normativa plantea un tratamiento de datos distinto para el momento de análisis de los valores del nivel de ruido L_{Aeq} obtenidos tras las mediciones. El procesamiento de datos entre las normativas estudiadas varía entre ellas y cada una presenta un número de mediciones distinto por punto de medición al igual que sus factores de corrección. A continuación se indica el tratamiento de datos que cada normativa sugiere.

Tabla 13. Criterio de tratamiento de datos. Fuente. El autor.

Norma	Criterio evaluado
	Tratamiento de datos
Método inglés	Sumar los niveles logarítmicamente de cada sección transversal y las correcciones se suman aritméticamente.
Método Países Bajos, RMR	El tratamiento de datos para esta normativa va directamente ligado a las correcciones que se realicen en cada una de las mediciones en el proceso de obtención del valor de L_{Aeq} .
Handbook for railroad noise measurement and analysis (US)	El tratamiento de datos de esta normativa se relaciona con la calidad de las mediciones realizadas al tren y comparadas con los niveles de ruido de fondo medidos antes y después de cada grupo de estas mediciones.
EPA (Australia) – Guidelines for the assessment of noise from rail infrastructure	Se realizan las mediciones de cada evento y se promedian los valores logarítmicamente para obtener un valor global de acuerdo con cada uno de los tiempos de medición, es decir, el valor $L_{Aeq,15h}$, $L_{Aeq,9h}$, $L_{Aeq,1h}$ y L_{AMax} .
Schall 03	Se aplican los factores de corrección por bandas de octava.
UNE – EN ISO 3095	Se promedian las mediciones por cada punto. Se promedian las mediciones por cada punto y el valor mayor es el resultado final.
Método de República Checa	No especifica
Estándar de regulación técnica para los ferrocarriles japoneses	No especifica

De los modelos estudiados, la Norma UNE-EN ISO 3095 es el único que indica que de acuerdo al tipo de ensayo que se realice deben estudiarse los niveles por banda de octava o tercio

de octava. A excepción del Manual Para La Medición Y Análisis De Ruido Ferroviario De Los Estados Unidos, todas las demás normativas indican que el proceso para obtener el nivel de L_{Aeq} debe ser realizado de acuerdo al promedio aritmético de los niveles que se obtengan en cada una de las bandas de octava y si es el caso, es válido trabajar con el resultado que indica el sonómetro al final de la medición. A continuación, se presentan detalladamente las indicaciones que sugiere el Manual Para La Medición Y Análisis De Ruido Ferroviario De Los Estados Unidos para el tratamiento de datos en las mediciones en estado estacionario y a velocidad constante:

Tratamiento de datos a velocidad constante:

1. Realizar la diferencia de calibraciones (ΔCal) entre la calibración antes ($Cal_{inicial}$) y después (Cal_{final}) de los eventos sonoros:

$$\Delta Cal = Cal_{final} - Cal_{inicial} \quad (25)$$

-Si ΔCal es mayor que ± 1.0 dB, las mediciones no pueden ser usadas con propósitos oficiales.

-Si ΔCal es mayor que ± 0.3 dB pero menor o igual que ± 1.0 dB, entonces la diferencia debe ser reducida a la mitad y restada a todas las mediciones realizadas entre estas calibraciones.

2. Determinar el nivel sonoro máximo de cada medición de ruido de fondo y de cada evento sonoro.
3. Verificar que las mediciones no están contaminadas por el ruido de fondo. El nivel máximo sonoro del evento debe estar por encima de las mediciones de ruido de fondo antes y después del evento en 10 dB. Si el nivel de ruido de fondo contaminó las mediciones, éstas no pueden ser usadas con propósitos oficiales.

4. Comparar los niveles máximos de cada tren con los niveles legales estipulados para ellos. Pueden agregarse 2dB a los niveles legales debido a los efectos que tengan las variaciones en la tolerancia de los instrumentos, topología del sitio, condiciones atmosféricas, reflexiones de objetos pequeños, y el hecho de redondear los valores de las mediciones al decibel más cercano.
5. Evaluar conformidad y cumplimiento con los valores estipulados por las leyes.

Tratamiento de datos en estado estacionario:

1. Realizar la diferencia de calibraciones (ΔCal) entre la calibración antes ($Cal_{inicial}$) y después (Cal_{final}) de los eventos sonoros:

$$\Delta Cal = Cal_{final} - Cal_{inicial} \quad (26)$$

-Si ΔCal es mayor que ± 1.0 dB, las mediciones no pueden ser usadas con propósitos oficiales.

-Si ΔCal es mayor que ± 0.3 dB pero menor o igual que ± 1.0 dB, entonces la diferencia debe ser reducida a la mitad y restada a todas las mediciones realizadas entre estas calibraciones.

2. Determinar $L_{ASM\acute{a}x}$ para cada evento y cada medición de ruido de fondo.
3. Verificar que las mediciones no están contaminadas por el ruido de fondo. El nivel máximo sonoro del evento debe estar por encima de las mediciones de ruido de fondo antes y después del evento en 10 dB. Si el nivel de ruido de fondo contaminó las mediciones, éstas no pueden ser usadas con propósitos oficiales.

4. Comparar $L_{ASMáx}$ con los niveles legales estipulados para cada zona.
5. Evaluar conformidad y cumplimiento con los valores estipulados por las leyes.

Para finalizar, el tratamiento de datos que se propone en este proyecto se hará evaluando los niveles por banda de octava y promediando los valores obtenidos en las tres mediciones que se hacen en cada punto para contar con una mayor cantidad de información, descartar ruidos no deseados mediante la comparación y aumentar la precisión de los resultados que se obtengan. Para la medición de estado estacionario que es la medición que más información recupera, se promedian los valores y el mayor es el resultado final. El equipamiento es calibrado antes y después de las mediciones programadas y se asegura que se mantenga la calibración.

7. PLANTEAMIENTO DEL PROTOCOLO DE MEDICIÓN PARA RUIDO FERROVIARIO

Para el presente proyecto se han consultado los siguientes documentos tomando elementos de los mismos que son pertinentes para el medio colombiano

1. Department of Transport. (1995). Calculation Of Railway Noise. London.
2. The Netherlands. (1996). Calculation And Measurement Guidelines For Rail Transport Noise. Método De Los Países Bajos RMR 96.
3. Germany Noise Railway Method. Schall 03. (2006)
4. U.S. Department Of Transportation.; Federal Railroad Administration. (2009). Handbook For Railroad Noise Measurement And Analysis.
5. Neubergova, Kristyna.; Vasica, David. (2013) Railway Noise Measurements On Various Railway Superstructure Constructions. Czech Republic.
6. Environment Protection Authority - EPA. (2013). Guidelines For The Assessment Of Noise From Rail Infrastructure.
7. UNE-EN ISO 3095. (2014). Aplicaciones Ferroviarias. Medición Del Ruido Emitido Por Vehículos Que Circulan Sobre Carriles.

A continuación, se plantea el proceso metodológico con la finalidad de medir ruido ferroviario en Colombia cuando los trenes transitan a velocidad constante y se encuentran en estado estacionario planteando los instrumentos necesarios, el sitio de medición y sus características.

7.1 Instrumentación y calibración.

De acuerdo con las normativas que se han consultado, para realizar el protocolo de medición presente en este trabajo de grado, el equipo necesario para realizar las mediciones de la emisión

de ruido de tren debe cumplir con los requisitos de un equipo de Clase 1 para sonómetros (IEC 61672-1:2002) y calibradores Clase 1 (IEC 60942: 2003) ya que estos permiten un trabajo de campo con mayor precisión.

En caso de hacerse uso de una configuración especial de micrófonos, estos deben tener características de campo libre y al igual que el sonómetro, debe usar su respectiva pantalla de protección contra el viento y siempre hacer uso del trípode. Entiéndase como micrófono de campo libre aquel que sea “más adecuado para la medida de fuentes sonoras cuyas ondas llegan directamente desde la fuente al micrófono, siguiendo una única dirección.”, “Ya que cualquier micrófono o cuerpo extraño que se introduzca en el campo sonoro produce una perturbación, pero los micrófonos de campo libre están diseñados para compensar su propia perturbación”. (Parrondo, Velarde, González, Ballesteros, & Santolaria, 2006)

El calibrador y sistema de medición acústico de clase 1 que se utilice para las mediciones debe cumplir con los requisitos de la supervisión, la cual debe ser de carácter periódica, de manera que se pueda determinar las condiciones para certificación y calibración de los mismos, creando la hoja de vida de cada instrumento.

El sistema de medición se debe calibrar en el sitio de ensayo antes y después de cada grupo de mediciones durante 10s. Antes de realizar esta calibración, debe exponerse el instrumento de medición a las condiciones ambiente del lugar donde se vaya a realizar el ensayo para tener en cuenta la temperatura del lugar. Si los niveles de un grupo de calibraciones difieren entre sí en más de 0.5 dB, las mediciones entre estas calibraciones no serán válidas y deberán repetirse, de forma que se dé cumplimiento a los estándares de calidad y precisión según se recomienda en varias de las normativas de consulta. De esta forma, así como se recomienda en el Manual de Medición y Análisis de Ruido Ferroviario, en largos intervalos de medición, debe calibrarse cada

hora al igual que cada vez que haya un cambio en la configuración en el instrumento de medición.

Por otra parte, se recomienda que las mediciones no se lleven a cabo en caso de que esté lloviendo y siempre debe hacerse uso de una estación meteorológica con la finalidad de registrar durante la medición la dirección y velocidad del viento, que no puede ser superior a los 5m/s a la altura del micrófono de medición. Debe tenerse registro de los valores de la temperatura, la humedad relativa y la presión atmosférica.

7.2 Entorno acústico y definiciones

Una vez se ha realizado la revisión y análisis de las normas de referencia, se ha determinado que, para realizar la correcta medición, el entorno acústico debe cumplir con las siguientes recomendaciones:

-El nivel del ruido de fondo en el punto de medición debe ser relativamente bajo, es decir, mínimo 10 dB por debajo del ruido emitido por el tren en cada banda de octava y debe cerciorarse que no haya influencia de otras fuentes de ruido predominantes que puedan afectar las mediciones. Cuando no pueda cumplirse esta condición, puede realizarse una resta logarítmica entre el nivel de la fuente y el nivel de ruido de fondo para determinar el nivel real de la fuente, como lo indica el Manual de Medición y Análisis de Ruido Ferroviario (Handbook for Railroad Noise Measurement and Analysis). Por ejemplo, si se tiene un nivel sonoro con la fuente en operación (ruido de fondo + fuente) de 70 dB(A) y un nivel de ruido de fondo de 65 dB(A), se realiza una resta logarítmica entre estos niveles como se indica a continuación:

$$(L_{\text{fuente}} - L_{\text{fondo}}) = 10 \log (10^{70/10} - 10^{65/10}) \text{ [dB(A)]} = 68.3 \text{ dB(A)} \text{ (nivel real de la fuente).}$$

-Cuando no pueda determinarse con exactitud el nivel de ruido de fondo debido a que varía constantemente se hace uso del percentil L_{90} .

-La vía debe presentar una cama de balasto que se encuentre preferiblemente seca. El punto de medición puede ser ubicado sobre concreto, arena o baja vegetación, pero no debe estar sobre agua debido a que aumenta el nivel registrado por las reflexiones, ni cubierto de nieve (o granizo), si se da el caso, o donde se presente alta vegetación. La altura del punto de medición con relación a la cabeza del carril debe ser relativamente plana o que se encuentre entre 0m y -3m o 0m y +1.5m.

7.3 Sitio de medición

-El sitio de medición debe estar documentado con fotografías y un texto descriptivo tal cual se recomienda en el Manual de Medición y Análisis de Ruido Ferroviario (Handbook for Railroad Noise Measurement and Analysis) indicando, posición de la fuente, receptor, otros elementos, otras fuentes de ruido (descripción cualitativa de las fuentes de ruido).

-El micrófono debe tener visibilidad de al menos el 80% de la vía en que se esté realizando el ensayo. (Manual de Medición y Análisis de Ruido Ferroviario)

-Evitar que el punto de medición se encuentre cerca de antenas, líneas y generadores de potencia (transformadores) para no tener contaminación electromagnética de la señal. (Manual de Medición y Análisis de Ruido Ferroviario)

-El entorno del punto de medición debe permitir la libre propagación del sonido, es decir, no tener ninguna obstrucción como edificios, vallas, cobertizos y montículos en un área con un radio de al menos tres veces la distancia de medición, (UNE-EN ISO 3095).

7.4 Correcciones

De acuerdo con las normas en que se basa el desarrollo del proyecto se propone realizar las siguientes correcciones al nivel global L_{Aeq} que se obtiene:

-Corrección por balasto: -1.5 dB(A) . (Método inglés).

-Corrección por distancia: $0.2 - 0.008d'$ dB(A) ; donde d' es la distancia que hay entre el punto de la fuente suponiendo que es sobre la cabeza del carril y el medidor, es decir, se hace uso del Teorema de Pitágoras para hallar el valor de la distancia d' , la cual sería la hipotenusa en la situación. (Ver Figura 4) (Método inglés).

-Por cambio de nivel y estructuras: $+2.5 \text{ dB(A)}$. Aplica únicamente cuando se lleve la medición frente a un cambio de nivel o estructura de la vía. (Método inglés).

-Corrección por el aire: $0.016(d'^{0.9}) \text{ dB(A)}$. (Método RMR).

7.5 Incertidumbres de medición

Según las normativas que fueron estudiadas, la Norma UNE-EN ISO: 3095 es la única que presenta metodología para hallar las incertidumbres que pueden presentarse durante las mediciones al ruido férreo teniendo en cuenta distintos posibles casos que brindan distintas cantidades que se presentan en la Tabla 4 junto a su procedimiento de cálculo.

7.6 Procedimiento de medición

El procedimiento de medición que se plantea es aplicable a trenes en movimiento y trenes en estado estacionario debido a que la mayoría de las normativas internacionales que se estudiaron enfocan su proceso metodológico a los trenes en movimiento y la Norma UNE-EN ISO 3095 junto con el Manual Para Medición Y Análisis De Ruido Ferroviario son las únicas que contienen información pertinente para evaluar el tren en estado estacionario. Para las mediciones del momento de frenado y aceleración desde el reposo, se sugiere remitirse a la Norma UNE-EN ISO 3095.

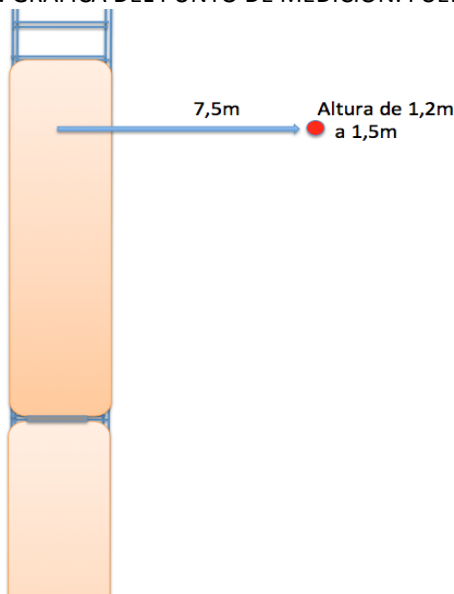
7.6.1 Metodología para trenes a velocidad constante

Una vez se tiene la instrumentación lista para la medición, se ha realizado la respectiva calibración de los medidores y el entorno acústico cumple con las condiciones adecuadas, se implementa el siguiente procedimiento:

Para evaluar el ruido ferroviario registrado por el paso del tren se emplea el criterio de Nivel de Presión Sonora Equivalente $L_{Aeq,T}$. Donde T, es el tiempo de paso total del tren por el punto de medición, entendiendo por paso total la condición temporal en la cual no se perciba el ruido del tren, es decir, cuando el nivel sonoro es debido al ruido de fondo. El anterior es un criterio usado por las normativas internacionales responsables de la evaluación de ruido ambiental. De manera similar se calcula el Nivel de Presión Sonora Máximo, $L_{AMáx}$ para el paso del tren, usando la configuración de respuesta de tiempo “slow” y con ponderación frecuencial “A” en el sonómetro y comenzando a registrar el nivel de ruido cuando el tren se encuentre a 20m del punto de medición, evaluando su espectro por banda de octava en un rango de frecuencia de 16 Hz a 8000 Hz.

Las posiciones de medición se deben situar a una distancia de 7,5m del eje de la vía a una altura entre 1,2m y 1,5m por encima de la cabeza del carril (Figura 5) como es sugerido por la Norma UNE-EN ISO 3095 y el Manual de Medición y Análisis de Ruido Ferroviario. En cada punto de medición escogido deben realizarse tres registros del nivel y se promedian las mediciones en cada punto siendo el valor mayor el resultado final para posteriormente aplicar las correcciones propuestas.

FIGURA 5. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL PUNTO DE MEDICIÓN. FUENTE. UNE-EN ISO 3095



Según la Norma UNE-EN ISO 3095 la medición se debe realizar a ambos lados del tren, pero se pueden omitir las posiciones de medición en un lado del tren si ambos lados son acústicamente idénticos (es decir, con una distribución simétrica de las fuentes de ruido). Y de la misma manera a las distintas normativas que sugieren que para realizar las mediciones el tren debe tener los sistemas de ventilación libres de partículas que afecten el flujo libre de aire y las puertas y ventanas del tren se encuentren cerradas.

Durante el tiempo en que se realice el procedimiento de medición, debe llevarse a cabo un reporte en caso de presentarse ruidos que representen molestia para quien se encuentre próximo al tren durante su paso y que perjudique la calidad de las mediciones. Este tipo de ruido se caracteriza por lo general por ser un desgaste o falta de mantenimiento de los vehículos férreos como lo son, chillidos en las ruedas (presentado generalmente en las curvas), ruidos impulsivos, impactos repetitivos, entre otros. El Departamento de Transporte de los Estados Unidos en su Manual de Medición y Análisis de Ruido Ferroviario sugiere hacer uso de una tabla donde se puede llevar el control de los pasos a cumplir durante el proceso de medición del ruido la cual es

bastante útil en cuanto al flujo de trabajo que debe realizarse. Dicha tabla se encuentra a continuación.

Tabla 14. Guía para llevar a cabo las mediciones. Fuente: Manual de Medición y Análisis de Ruido Ferroviario, USA.

CONFIGURAR LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	
1	VERIFICAR LAS CONDICIONES Y CONFIGURACIONES DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN
	Nivel de carga de la batería.
	Filtro de ponderación de frecuencia (A o C).
	Respuesta dinámica (fast o slow).
	Métrica de medición ($L_{Aeq,T}$, $L_{AMáx}$).
2	VERIFICAR LA SINCRONIZACIÓN O DESFASE;
	Instrumento de medición
	Reloj de mano
	Computador
3	MONTAR EL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN EN EL TRÍPODE A LA ALTURA QUE INDICA EL PROTOCOLO
4	ORIENTAR EL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN DE HACIA LA FUENTE SONORA
5	CALIBRAR EL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN (O VERIFICAR LA CALIBRACIÓN) Y DOCUMENTAR DURANTE 10s
6	PONER PANTALLA ANTI VIENTO.
CONFIRMAR LAS VÍAS LIBRES PARA PROPAGACIÓN DEL RUIDO	
	La posición del observador, el operador del tren y empleados debe ser lejos del instrumento de medición y de la vía directa con la fuente sonora.
MEDIR Y CONFIRMAR QUE LAS CONDICIONES DEL AMBIENTE SE ENCUENTRAN DENTRO DE LOS LIMITES ESPECÍFICOS	
	Velocidad del viento: sostenido < 5 m/s, ráfagas < 9 m/s. (No es necesario para mediciones en interiores)
	Sin lluvia
	Temperatura, de 2°C a 35°C.
	Humedad relativa
MEDIR Y DOCUMENTAR EL NIVEL DE RUIDO DE FONDO	
REALIZAR LAS MEDICIONES	
	Documentar cualquier cambio notable del sitio de medición incluyendo cambios sustanciales en el clima, ruido de fondo, o contaminación de la medición con otras fuentes de ruido.

	Calibrar el instrumento de medición nuevamente cuando la medición se prolonga. En intervalos de una hora.
REALIZAR EL CONTROL DESPUÉS DE LA MEDICIÓN	
	Medir y documentar el ruido de fondo.
	Medir y documentar la calibración.
	Documentar las condiciones del ambiente.
GUARDAR LA INFORMACIÓN	
	Guardar y descargar la información en un dispositivo externo.
	Hacer copias de seguridad correspondientes a la información recopilada, junto con las anotaciones adicionales realizadas, fecha y hora.

7.6.2 Metodología para trenes en estado estacionario

Para realizar la medición del tren en estado estacionario, primero que todo debe verificarse el cumplimiento de las condiciones acústicas del entorno, sitio de medición, instrumentación, calibración y medición de ruido de fondo.

Una vez se han calibrado los instrumentos de medición, se tiene la fuente sonora encendida en estado estacionario y se ha medido el nivel de ruido de fondo, se realiza una malla de medición con la cantidad de instrumentos necesarios para cubrir la longitud del tren y se realizan tres mediciones por cada punto con un tiempo de 20s cada una como se indica en la Norma UNE-EN ISO 3095. Si no es posible realizar una malla de medición, puede trasladarse el instrumento disponible sin modificar la configuración del mismo, si su configuración cambia debe repetirse todo el ensayo y calibrar nuevamente el sistema. Las posiciones de medición se toman a 7.5m del centro de la vía y a una altura entre 1.2m y 1.5m de la cabeza del carril.

Cuando se tienen los datos del evento sonoro se promedian los niveles en cada uno de los puntos de medición y el valor mayor es el resultado final para posteriormente aplicar las correcciones propuestas y calcular la incertidumbre de la medición.

7.7 Informe de la medición

El informe de la medición debe especificar que se hace uso del protocolo de medición especificado en este proyecto de grado y debe contener la siguiente información referente a la medición:

1. Naturaleza de la medición: Lugar, fecha y hora de la medición.
2. Responsable de la realización y monitoreo de las mediciones.
3. Condiciones del entorno acústico.
4. Condiciones medioambientales.
5. Condiciones de la vía.
6. Instrumentos de medición utilizados para la medición con sus respectivos documentos de certificación que los clasifica en Clase 1.
7. Presencia de ruidos externos durante la medición.
8. Cantidades medidas junto con sus niveles de ruido adquiridos e incertidumbres de la medición.
9. Cualquier otra información relevante acerca del sitio de medición y de las fuentes de ruido que se encuentren presentes durante la medición.

El protocolo de medición propuesto se encuentra resumido en el ANEXO 1.

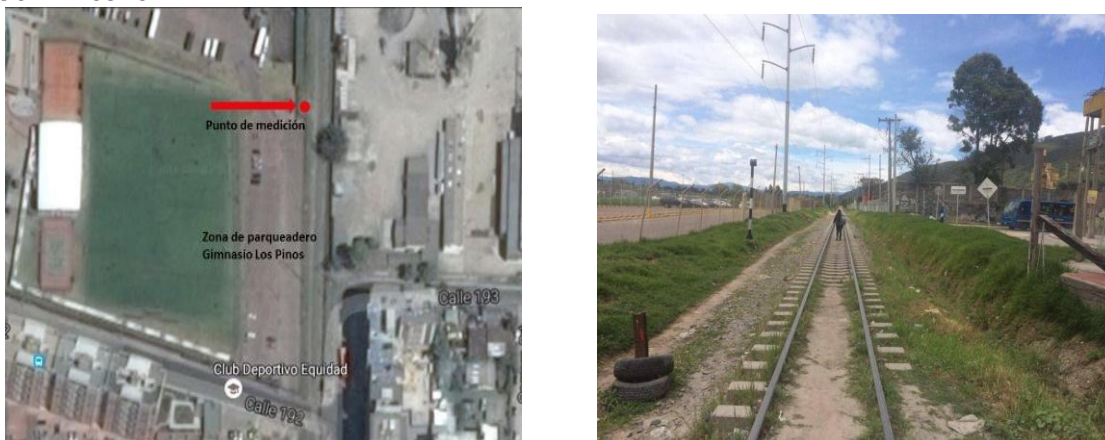
8. Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los resultados y análisis obtenidos al aplicar el protocolo de medición propuesto.

8.1 Aplicación del protocolo de medición

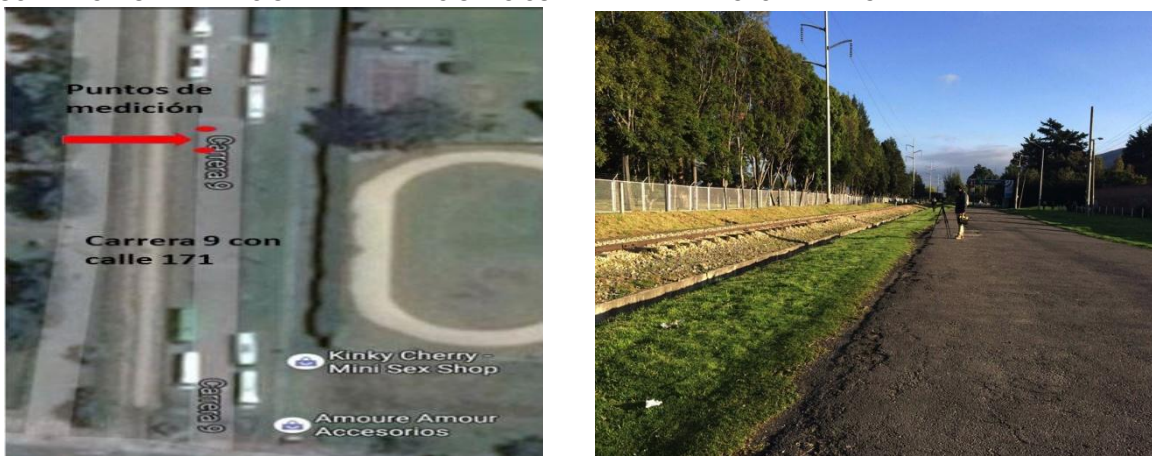
Una vez finaliza el planteamiento del protocolo de medición para ruido ferroviario se procede a dar cumplimiento al segundo objetivo específico, el cual consiste en la aplicación del protocolo planteado en una medición de ruido que genera el tren de La Sabana de Bogotá. Para este fin se realizó una petición formal desde la dirección del programa de Ingeniería de Sonido a la empresa encargada de los trenes en Bogotá, Turistren, solicitando el permiso por el cual podíamos acercarnos a las estaciones de los trenes para llevar a cabo estas mediciones, pero no hubo respuesta alguna de la petición. Por tal motivo, se decidió buscar la locación más idónea para hacer la medición de ruido ferroviario a velocidad constante y se encontró que las características acústicas se cumplen en las inmediaciones del Gimnasio Los Pinos de Bogotá el cual se encuentra ubicado en la Calle 193 # 9 – 20, como se muestra en la Figura 6.

FIGURA 6. PARQUEADERO GIMNASIO LOS PINOS. SITIO DE MEDICIÓN DEL RUIDO GENERADO POR EL TREN A VELOCIDAD CONSTANTE.



De manera adicional a las mediciones de ruido a velocidad constante del tren, se evaluó el nivel sonoro generado en los casos de estado estacionario, y como mediciones complementarias, el momento de frenado y en aceleración desde reposo. Para estas mediciones se usó la ubicación en la carrera 9 con calle 171, como se ve en la Figura 7, donde el tren de La Sabana realiza una parada para recoger y dejar pasajeros. Para realizar las mediciones complementarias se aplicaron los métodos de la Norma UNE-EN ISO 3095 dado que de todas las normativas internacionales que se evaluaron es la única que contiene la información necesaria para este tipo de ensayos.

FIGURA 7. SITIO DE MEDICIÓN PARA MEDICIONES COMPLEMENTARIAS. CARRERA 9 # 171



El horario de paso por el sitio de medición indicado en la Figura 7 que tiene el tren es a las 6:40am en el recorrido de sur a norte realizando una parada para recoger pasajeros y a las 5:15pm en dirección de norte a sur para dejar pasajeros. Esta acción de recoger y dejar pasajeros cerca de los puntos de recepción fue causa de ciertos inconvenientes al momento de ejecutar las mediciones por la contaminación de las grabaciones por el ruido producido a causa de los murmullos y de los estudiantes al caminar cerca de los transductores y la obstrucción de la trayectoria que recorre el sonido directo de la fuente hasta el receptor. Sin embargo, esta acción no afecta a todas las fases del tren, es decir, la medición del tren a velocidad constante no presenta este inconveniente, esta situación, afecta únicamente las mediciones que se realicen del tren en estado estacionario ya que por todos los puntos donde se evalúa esta fase, se realiza la acción que tiene en cuenta el movimiento de pasajeros. Los sonómetros empleados para la medición son las referencias Brüel 2250 y Rion NA-27 de clase 1.

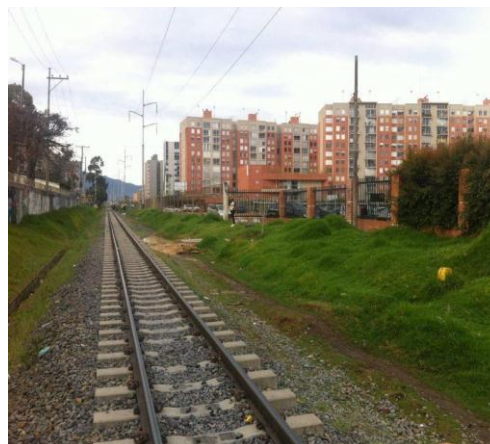
8.2 Sitio de medición

Como se mencionó en párrafos anteriores, los sitios escogidos para implementar el protocolo de medición propuesto y las medidas adicionales tienen ciertas características acústicas que permiten la libre propagación del ruido emitido por la fuente.

8.3 Estado de la vía

Como se puede observar en la Figura 8, la vía férrea presenta un lecho de balasto, traviesas de madera y rieles en acero que se encuentran en buen estado donde se evalúa el ruido del tren y de forma constante a lo largo de la vía con excepción únicamente en los pasos de nivel presentados en cada intersección de la carrera 9 donde se encuentra el ferrocarril con las principales calles de la ciudad que fueron construidos en concreto. Respecto a los sitios de medición, el paso del tren por la ubicación del punto del receptor cumple con los requisitos que sugiere el protocolo propuesto.

FIGURA 8. ESTADO DE LAS VÍAS.



8.4 Condiciones del entorno acústico

A pesar de que los sitios de medición cumplieron con las características acústicas de libre propagación del sonido necesarias para la correcta toma de mediciones, se observó que en varios casos había contaminación del registro del nivel de ruido de fondo a causa de fuentes externas que no pueden controlarse como lo son el tráfico rodado, la población transeúnte y la alarma que da aviso al cierre de la vía durante el paso del tren por la intersección de la carrera 9 con las calles 170 y 193. Para todos los casos, se ejecutó el procedimiento normal de las mediciones y una vez se tenían los resultados, en donde fuera necesario, se realizó el procedimiento para determinar el nivel real de la fuente que se indica en el apartado 7.2 de este documento.

8.5 Medición del tren a velocidad constante

Esta medición se llevó a cabo el día miércoles 5 de octubre de 2016 en el horario de la mañana solamente con el sonómetro Rion NA-27 por disponibilidad de equipamiento cuando el tren transitaba en sentido sur – norte y nuevamente en el horario de la tarde cuando el tren se trasladaba en sentido norte - sur con el uso de dos sonómetros, Rion NA-27 y Brüel 2250, para poder identificar la diferencia del nivel de ruido de fondo y el nivel de ruido que genera el paso del tren respecto al horario y al posicionamiento de los sonómetros. Cabe anotar adicionalmente que las mediciones se realizaron solo al costado occidental de la vía debido a que este costado es el único que cumple con los requisitos de propagación acústica necesarios para efectuar la medición. En el lado oriental de la vía se encuentra un muro de concreto paralelo y de igual longitud al parqueadero del colegio con una altura de aproximadamente 1.90m lo cual impide la libre propagación del sonido causando reflexiones que pueden contaminar el registro si se llegara a situar un punto de medición frente a este muro. En caso de que la fuente evaluada no sea simétrica acústicamente hablando, es necesaria realizar la medición simultánea en ambos lados del tren.

El punto de medición se encuentra a una distancia de 9m de una reja ubicada al costado derecho, a 7m de la misma reja en la parte posterior del sonómetro y al costado izquierdo no había presencia de ningún obstáculo. Al presentar espacios entre las diferentes divisiones, se considera que las reflexiones producidas por la reja no son lo suficientemente importantes de manera que no alteran el sonido directo generado por el paso del tren a velocidad constante. Ver Figura 9.

FIGURA 9. SITIO DE MEDICIÓN.



8.6 Medición de la mañana. Ruido a velocidad constante en sentido sur - norte

Una vez situados en el punto de medición se procede a realizar el montaje de la instrumentación a utilizar. Como primer paso se ubica el trípode a 7,5m del eje de la vía a una altura de 1,2m sobre el nivel de la cabeza del carril y se instala el sonómetro sobre el trípode. Una vez esté expuesto a temperatura ambiente se calibra el transductor de medida por medio del calibrador acústico que genera un tono puro de 1 kHz y con 94 dB de presión sonora.

A continuación, se presenta la información acerca del sitio de medición y sus condiciones ambientales y acústicas:

Lugar: Zona de parqueadero Gimnasio Los Pinos. Carrera 9 # 193.

Fecha y hora: miércoles 5 de octubre / 06:41am

Temperatura: 11°C

Velocidad del viento: 0.9m/s en sentido sudeste.

Humedad relativa: 65%

Presión barométrica: 0,74 Bar (741.9 mBar)

Nivel de ruido de fondo: $L_{Aeq,T}$; T = 20s; 40,1 dB[A].

Equipo utilizado: Sonómetro Rion NA-27. Clase 1.

Ponderación de frecuencia: A

Respuesta de tiempo: Slow.

Luego de haber calibrado el sistema se instala la pantalla anti viento en el transductor y se realiza la primer medición $L_{Aeq,T}$ del nivel de ruido de fondo durante 20s.

El protocolo de medición indica que deben tomarse 3 registros por cada punto de medición, promediar los datos obtenidos y el valor mayor es el resultado final, sin embargo, el tren escogido para los ensayos circula una sola vez en cada horario y dirección así que se hizo un solo registro del nivel que genera el paso del tren.

En la Tabla 15 y Figura 10 se muestran los resultados obtenidos de la medición del nivel de ruido de fondo:

Tabla 15. Resultados medición del nivel de ruido de fondo.

F [Hz]	dB [A]	F [Hz]	dB [A]
16	21	500	42,3
31,5	27	1000	44,1
63	37,3	2000	43,7
125	41,3	4000	39,3
250	38,3	8000	27,4

FIGURA 10. RESULTADOS MEDICIÓN DEL NIVEL DE RUIDO DE FONDO.



En cuanto a la medición durante el paso del tren, éste es esperado en el punto de medición y comienza a hacerse el registro desde que el tren pasa por un punto ubicado a 20m del sonómetro donde se obtuvieron los siguientes resultados, advirtiendo que el sonómetro se configuró para hacer la medición de manera manual, de forma que el tiempo de medición fue de 12,58s. La hora de esta medición fue 06:50am. El $L_{Aeq,T}$ obtenido fue 49,2 dB[A]; en la Tabla 16 y Figura 11 se muestran los resultados obtenidos y su respectivo registro fotográfico en la Figura 12.

Tabla 16. Resultados y espectro del nivel de ruido producido por el tren a velocidad constante.

F [Hz]	dB [A]	F [Hz]	dB [A]
16	15,8	500	53,2
31,5	30,2	1000	55,8
63	40,7	2000	50,5
125	45,9	4000	44
250	47,5	8000	35,7

FIGURA 11. RESULTADOS Y ESPECTRO DEL NIVEL DE RUIDO PRODUCIDO POR EL TREN A VELOCIDAD CONSTANTE.

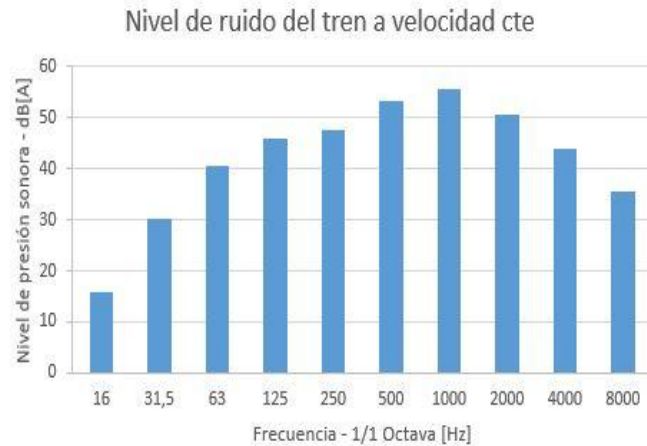


FIGURA 12. REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA MEDICIÓN AL NIVEL DE RUIDO PRODUCIDO POR EL TREN A VELOCIDAD CONSTANTE.



En la Tabla 17 y Figura 13, puede apreciarse la diferencia de niveles entre el ruido de fondo y el que se produce por el paso del tren a velocidad constante registrados con el sonómetro Rion NA-27 clase 1.

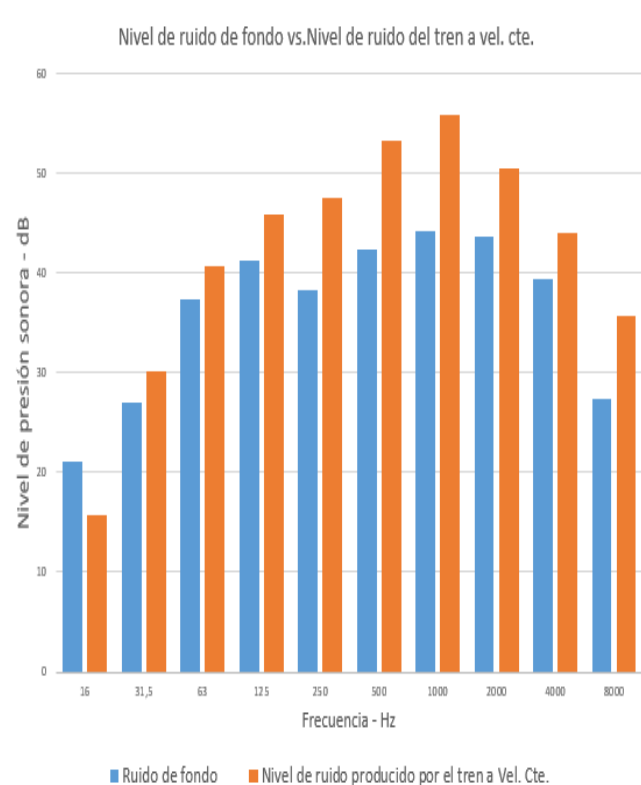
Al notar que la diferencia de niveles entre las mediciones es menor a los 10 dB en la mayoría de las bandas de octava, se procede a realizar el procedimiento para diferenciar el nivel de la fuente sonora del nivel de ruido de fondo explicado en la sección de Entorno Acústico del protocolo propuesto. Sin embargo, puede notarse que en frecuencias inferiores a la banda de

125Hz existe una diferencia menor que con el resto de las bandas de octava debido a la ponderación adicional que presenta la ponderación “A” configurada en los medidores.

Tabla 17. Resultados y espectro del nivel de ruido de fondo vs. el nivel de ruido producido por el tren a velocidad constante.

	Ruido de fondo	Nivel de ruido producido por el tren a Vel. Cte.
F [Hz]	dB [A]	dB [A]
16	21	15,8
31,5	27	30,2
63	37,3	40,7
125	41,3	45,9
250	38,3	47,5
500	42,3	53,2
1000	44,1	55,8
2000	43,7	50,5
4000	39,3	44
8000	27,4	35,7

FIGURA 13. RESULTADOS Y ESPECTRO DEL NIVEL DE RUIDO DE FONDO VS. EL NIVEL DE RUIDO PRODUCIDO POR EL TREN A VELOCIDAD CTE.



En la Tabla 18 se pueden observar los resultados de la diferencia logarítmica entre los niveles obtenidos en las mediciones para identificar el nivel real de la fuente ya que no se tiene una diferencia mayor a los 10 dB por banda de octava en la mayoría de estas como se recomienda en el protocolo propuesto y puede apreciarse que a pesar de no haber gran diferencia entre los niveles obtenidos y los niveles calculados de la fuente sonora, es necesario hacer el procedimiento para dar cumplimiento al lineamiento que se propone en este proyecto. En el caso especial que ocurre en la banda de octava de 16 Hz, no puede realizarse la diferencia entre estos niveles ya que el nivel de ruido de fondo es mayor y se obtiene una inconsistencia matemática

como resultado y además de esto, no es lógico que se registre un valor menor al nivel de ruido de fondo así que este dato se descarta por credibilidad.

Tabla 18. Nivel real de la fuente sonora, calculado por diferencia logarítmica con el nivel de ruido de fondo.

F [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	80000
dB [A]	15,8	27,4	38,1	44,1	47	52,8	55,5	49,5	42,2	35

Una vez se obtiene el valor real de la fuente, se procede a calcular nuevamente el valor promedio L_{Aeq} del evento y se aplican las correcciones propuestas en el protocolo de medición.

$L_{Aeq, fuente} : 48,7 \text{ dB(A)}$.

Corrección del balasto: -1.5 dB(A) .

Corrección por distancia: $0.2 - 0.008d'$;

$$d' = \sqrt{\text{distpunto de medición al centro de la vía}^2 + \text{altura del punto de medición}^2}$$

$$d' = \sqrt{7,5^2 + 1,2^2} = 7.6 \quad ; \text{ Corrección por distancia: } 0.13 \text{ dB(A)}$$

Corrección por aire: $0.016(d'^{0.9}) = 0.099 \text{ dB(A)}$

$L_{Aeq, final} : 48,7 \text{ dB(A)} - 1.5 \text{ dB(A)} - 0.13 \text{ dB(A)} - 0.099 \text{ dB(A)} = 46.9 \text{ dB(A)}$.

Adicional a este resultado, se obtuvo un nivel de presión sonora máximo L_{AMax} de $77,9 \text{ dB[A]}$.

Una vez dada por terminada la medición, se procede a realizar la calibración del sistema nuevamente y se obtiene una desviación de $0,04 \text{ dB}$ con respecto a la última calibración, lo cual significa el cumplimiento del protocolo propuesto.

Para el resultado que se obtiene de $L_{Aeq, final} = 46.9 \text{ dB(A)}$ se calcula la incertidumbre de la medición para los posibles eventos que se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Cálculo de la incertidumbre de la medición.

Cantidad	Rango habitual posible	Incertidumbre típica $u(x_i)$
L_{pAeq} , valor de lectura	46,9 dB	-
$\delta_{\text{calibrador, referencia}}$	0 dB	0,14 dB
$\delta_{\text{calibrador, largo plazo}}$	0 dB	0,04 dB
$\delta_{\text{calibrador, tensión de alimentación}}$	0 dB	0,06 dB
$\delta_{\text{calibrador, factor de distorsión}}$	0,105 dB	0,0 dB
$\delta_{\text{sonómetro, dirección}}$	0 dB	0,25 dB
$\delta_{\text{sonómetro, frecuencia}}$	0 dB	0,25 dB
$\delta_{\text{sonómetro, linealidad del nivel}}$	0 dB	0,46 dB
$\delta_{\text{calibrador, meteorológico}}$	0 dB	0,14 dB
$\delta_{\text{calibrador, presión del aire}}$	0 dB	0,52 dB
$\delta_{\text{calibrador, temperatura}}$	0 dB	0,29 dB
$\delta_{\text{calibrador, humedad}}$	0 dB	0,29 dB
$\delta_{\text{sonómetro, parabrisas}}$	0,06 dB	0,03 dB
$\delta_{\text{trípode}}$	0 dB	0, d
$\delta_{\text{distancia}}$	0 dB	0,13dB
δ_{redondeo}	0 dB	0,29 dB
L_{pAeq}	47,06 dB	1,02

La incertidumbre típica combinada es:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(x_i)} = 1,02 \text{ dB}$$

La incertidumbre ampliada a $k=2$ es

$$U = 2u_c(y) = 2,04 \text{ dB}$$

8.7 Medición de la tarde. Ruido emitido a velocidad constante del tren en sentido norte - sur

La medición en horas de la tarde se realizó con los sonómetros Rion NA-27 y Brüel 2250. La posición tomada para el Brüel 2250 fue la posición que tenía el sonómetro Rion NA-27 en horas de la mañana a 7,5m de distancia del eje de la vía, a una altura de 1,2m sobre la cabeza del carril y separado de las rejas que lo rodeaban a una distancia de 9m al costado derecho y 7m en la parte posterior, situando por otra parte el sonómetro Rion NA-27 a 20m en dirección norte del Brüel.

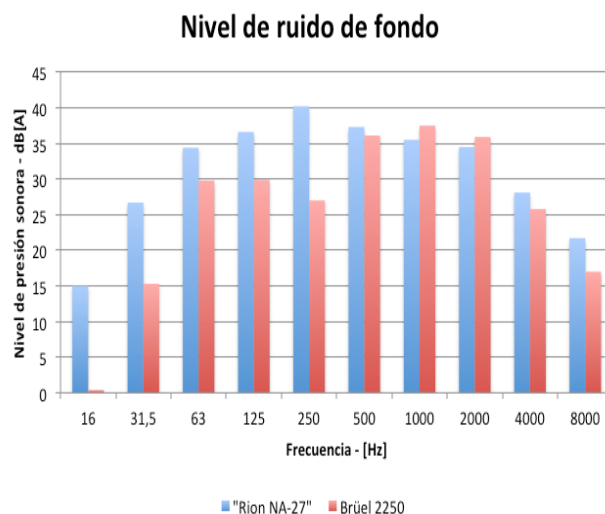
Antes de realizar la medición al nivel de ruido de fondo se calibran cada uno de los sonómetros durante 10s. Siguiendo a este paso, se instala la pantalla contra el viento en los transductores y se registra el nivel de ruido de fondo durante 20s. La configuración de los sonómetros para las mediciones es con ponderación frecuencial “A” y con respuesta de tiempo “Slow” como lo indica el protocolo.

Los resultados y anotaciones correspondientes a la medición del nivel de ruido de fondo se presentan a continuación, incluyendo la Tabla 20 y la Figura 14.

Tabla 20. Niveles de ruido de fondo registrados con ambos sonómetros, Rion NA-27 y Brüel 2250.

	Rion NA-27	Brüel 2250		Rion NA-27	Brüel 2250
F [Hz]	dB [A]	dB [A]	F [Hz]	dB [A]	dB [A]
16	15	0,4	500	37,3	36,1
31,5	26,7	15,3	1000	35,5	37,5
63	34,4	29,8	2000	34,5	35,9
125	36,6	29,9	4000	28,1	25,8
250	40,2	27	8000	21,7	17

FIGURA 14. NIVELES DE RUIDO DE FONDO REGISTRADOS CON AMBOS SONÓMETROS, RION NA-27 Y BRÜEL 2250.



Lugar: Zona de parqueadero Gimnasio Los Pinos. Carrera 9 # 193.

Fecha y hora: miércoles 5 de octubre / 04:44pm

Temperatura: 16°C

Velocidad del viento: 0.9m/s en sentido norte.

Humedad relativa: 65%

Presión barométrica: 0,7 Bar (737.9 mBar)

Nivel de ruido de fondo $L_{Aeq,T}$; T = 20s; con Rion NA-27 = 34,9 dB[A].

Nivel de ruido de fondo $L_{Aeq,T}$; T = 20s; con Brüel 2250 = 32,2 dB[A].

Como puede observarse en el resultado de la captura del nivel de ruido de fondo, existe una variación de niveles entre los sonómetros en cada una de las bandas de octava evaluadas al igual que en su nivel equivalente $L_{Aeq,T}$ total siendo mayor esta diferencia en baja frecuencia.

Prosiguiendo con la aplicación del protocolo propuesto, se vuelve a configurar el tiempo de integración de los equipos de medición para que abarque la totalidad del evento en que la fuente sonora pasa por el transductor comenzando a medir 20m antes de que el tren pase por el frente y deteniendo la medición cuando su presencia deja de ser audible, entendiendo así, que por la misma distancia que hay entre los equipos, su tiempo de integración es diferente. La Figura 15 muestra el registro fotográfico del paso del tren a velocidad constante por los transductores.

FIGURA 15. REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL PASO DEL TREN A VELOCIDAD CONSTANTE POR EL PUNTO DE MEDICIÓN.



En la Tabla 21 y Figura 16 se muestran los datos obtenidos.

Hora: 05:13pm

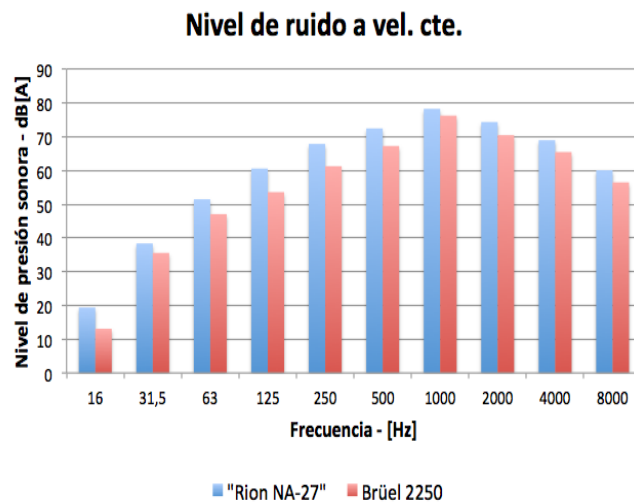
Nivel de ruido a velocidad constante $L_{Aeq,T}$; $T = 40,13s$; Rion NA-27 = 71,1 dB[A].

Nivel de ruido a velocidad constante: $L_{Aeq,T}$; $T = 33s$; Brüel 2250 = 68,1 dB[A].

Tabla 21. Nivel de ruido a velocidad constante con ambos sonómetros, Rion NA-27 y Brüel 2250.

	Rion NA- 27	Brüel 2250		Rion NA- 27	Brüel 2250
F [Hz]	dB [A]	dB [A]	F [Hz]	dB [A]	dB [A]
16	19,4	13,1	500	72,5	67,3
31,5	38,4	35,6	1000	78,3	76,3
63	51,5	47,1	2000	74,4	70,5
125	60,6	53,6	4000	69	65,5
250	67,9	61,3	8000	60,1	56,5

FIGURA 16. NIVEL DE RUIDO A VELOCIDAD CONSTANTE CON AMBOS SONÓMETROS.

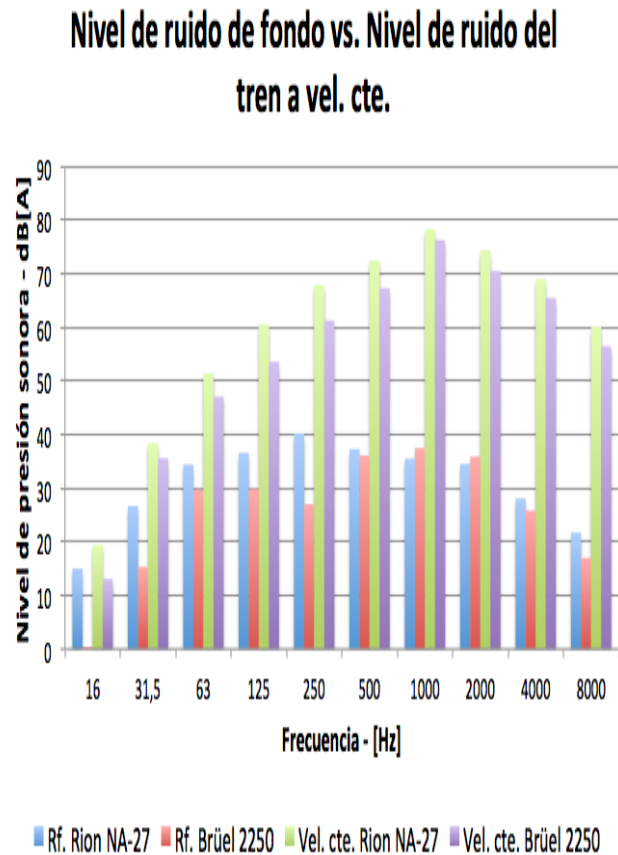


Cuando se realiza la medición del nivel de presión sonora equivalente del tren a velocidad constante con ambos sonómetros en horas de la tarde se aprecia que hay un aumento general tanto en el nivel de ruido de fondo como en el momento en que pasa el tren por el punto de medición con respecto a la medición realizada en horas de la mañana. Esto se debe a que en el sitio de medición hay mayor influencia de ruido por parte de los estudiantes que se quedan después de clase en actividades deportivas y al lado del parqueadero se encuentran ubicadas dos canchas de fútbol aumentando así el nivel de ruido de fondo. Sin embargo, este nivel de ruido de fondo mantiene una diferencia mayor a los 10dB con respecto al nivel de paso del tren, dando cumplimiento al requisito que se propone en el protocolo de medición y con esto, no debe realizarse el procedimiento de diferencia entre el nivel de la fuente y el nivel del ruido de fondo ejercido para las mediciones de la mañana. En la Tabla 22 y Figura 17 que se muestra a continuación, puede apreciarse la comparación de los resultados obtenidos.

Tabla 22. Comparación del nivel de ruido de fondo (Rf.) y el nivel de ruido del tren a velocidad constante (Vel. cte.) con ambos sonómetros en horas de la tarde

	Rf Rion NA- 27	Rf Brüel 2250	Vel Cte Rion NA- 27	Vel Cte Brüel 2250
F [Hz]	dB [A]	dB [A]	dB [A]	dB [A]
16	15	0,4	19,4	13,1
31,5	26,7	15,3	38,4	35,6
63	34,4	29,8	51,5	47,1
125	36,6	29,9	60,6	53,6
250	40,2	27	67,9	61,3
500	37,3	36,1	72,5	67,3
1000	35,5	37,5	78,3	76,3
2000	34,5	35,9	74,4	70,5
4000	28,1	25,8	69	65,5
8000	21,7	17	60,1	56,5

Figura 17. Comparación del nivel de ruido de fondo (Rf.) y el nivel de ruido del tren a velocidad constante (Vel. cte.) con ambos sonómetros en horas de la tarde.



Una vez se tienen los resultados de las mediciones se procede a aplicar las respectivas correcciones a los valores obtenidos en cada uno de los medidores.

Corrección del balasto: -1,5 dB(A).

Corrección por distancia: 0,13 dB al ser la misma distancia; $d' = \sqrt{7,5^2 + 1,2^2} = 7,6$

Corrección por aire: $0,016(d'^{0,9}) = 0,099$ dB(A)

$L_{Aeq, Rion NA-27} : 71,1$ dB(A) – 1,5 dB(A) – 0,13 dB(A) – 0,099 dB(A). = 69,4 dB(A).

$$L_{\text{Aeq, Brüel 2250}} : 68,1 \text{ dB(A)} - 1,5 \text{ dB(A)} - 0,13 \text{ dB(A)} - 0,099 \text{ dB(A)} = 66,4 \text{ dB(A)}.$$

Adicional a este resultado, se obtuvieron los niveles de presión sonora máximos $L_{\text{AMáx.}}$, de 103 dB[A] para el Rion NA-27 y de 106,4 dB [A] para el sonómetro Brüel 2250.

A continuación, se observan en la tabla 23 los posibles eventos y posterior a ella, la estimación de la incertidumbre ampliada de la medición.

Tabla 23. Cálculo de la incertidumbre de medición de los medidores.

Cantidad	Rango habitual posible Rion NA-27	Incertidumbre típica $u(x_i)$ Rion NA-27	Rango habitual posible Brüel 2250	Incertidumbre típica $u(x_i)$ Brüel 2250
L_p	69,4 dB	-	66,4 dB	-
$\delta_{\text{calibrador, referencia}}$	0 dB	0,14 dB	0 dB	0,14 dB
$\delta_{\text{calibrador, largo plazo}}$	0 dB	0,04 dB	0 dB	0,04 dB
$\delta_{\text{calibrador, tensión de alimentación}}$	0 dB	0,06 dB	0 dB	0,06 dB
$\delta_{\text{calibrador, factor de distorsión}}$	0,105 dB	0,06 dB	0,105 dB	0,06 dB
$\delta_{\text{sonómetro, dirección}}$	0 dB	0,25 dB	0 dB	0,25 dB
$\delta_{\text{sonómetro, frecuencia}}$	0 dB	0,25 dB	0 dB	0,25 dB
$\delta_{\text{sonómetro, linealidad del nivel}}$	0 dB	0,46 dB	0 dB	0,46 dB
$\delta_{\text{calibrador, meteorológico}}$	0 dB	0,14 dB	0 dB	0,14 dB
$\delta_{\text{calibrador, presión del aire}}$	0 dB	0,52 dB	0 dB	0,52 dB
$\delta_{\text{calibrador, temperatura}}$	0 dB	0,29 dB	0 dB	0,29 dB
$\delta_{\text{calibrador, humedad}}$	0 dB	0,29 dB	0 dB	0,29 dB
$\delta_{\text{sonómetro, parabrisas}}$	0,06 dB	0,03 dB	0,06 dB	0,03 dB
$\delta_{\text{trípode}}$	0 dB	0,35 dB	0 dB	0,35 dB
$\delta_{\text{distancia}}$	0 dB	0,13dB	0 dB	0,13dB
δ_{redondeo}	0 dB	0,29 dB	0 dB	0,29 dB
L_{pAeq}	69,56 dB	1,02 dB	66,56 dB	1,02 dB

La incertidumbre típica combinada es: $u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(x_i)} = 1,02 \text{ dB}$

La incertidumbre ampliada a $k=2$ es $U = 2u_c(y) = 2,04 \text{ dB}$

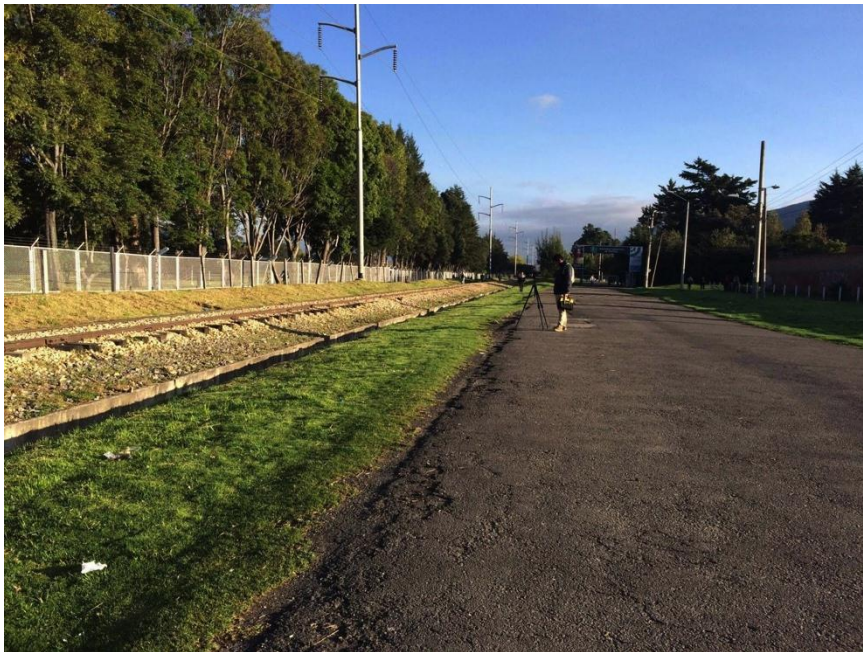
Para finalizar el procedimiento de medición se calibró nuevamente el sistema y hubo una variación de 0.01 dB con respecto a la calibración previa cumpliéndose lo establecido en el protocolo. La medición al nivel de ruido del tren a velocidad constante no presentó mayor diferencia de niveles entre los medidores a pesar de notar que el sistema de rodamiento presenta un chillido de manera intermitente que puede ser debido a la posible deformación de las ruedas.

Como se puede observar en los resultados y en el procedimiento llevado a cabo durante la aplicación del protocolo de medición propuesto no hubo contratiempo de ningún tipo.

8.8 Mediciones del tren en estado estacionario. Carrera 9 con calle 171.

Se realizó la medición al nivel de ruido que genera el tren en estado estacionario siguiendo los lineamientos que indica el protocolo propuesto en la carrera 9 con calle 171 (Figura 18) ya que de los sitios donde se detiene el tren, este cumple con las características acústicas de libre propagación del sonido necesarias.

FIGURA 18. SITIO DE MEDICIÓN.



De la misma forma en que se realizaron las mediciones de ruido generado por el tren a velocidad constante, se pudo medir únicamente en un solo costado del tren debido a tres razones muy importantes que son, la falta de equipos ya que se sugiere la elaboración de una malla de medición que cubra la longitud total del tren, la falta de cooperación por parte de los administrativos del tren porque en caso de no tener la totalidad de equipos necesarios para la medición se pueden mover los equipos disponibles entre los puntos de medición y el único momento disponible para medir es un lapso de tiempo de 2 minutos el cual es el tiempo en que duran los pasajeros abordando el vehículo férreo, y por último, este es el único sitio disponible para realizar la medición de ruido estacionario y en el costado occidental de la vía hay presencia de un obstáculo cuya distancia al eje de la vía interfiere en la trayectoria del sonido directo con el punto de medición.

Para estas mediciones los dos sonómetros estuvieron en operación. El sonómetro Brüel 2250 fue ubicado en la mitad de la cabina del conductor donde se ubica también el motor y el claxon del tren y el sonómetro Rion NA-27 se ubicó en la mitad del segundo vagón realizando a su vez tres grupos de mediciones de 20s cada una en cada punto escogido. Ver Figura 19.

FIGURA 19. PUNTOS DE MEDICIÓN ANTES (IZQ.) Y DESPUÉS DEL ARRIBO DEL TREN (DER.)



Como primer paso para la aplicación del protocolo se expone el transductor un tiempo mínimo de 10s a la temperatura ambiente del sitio de medición y enseguida se calibran por medio de un calibrador acústico durante 10s. Seguido a esto, se ubica la pantalla anti viento en cada transductor y se hace una primera medición durante 20s del nivel de ruido de fondo utilizando las configuraciones de respuesta de tiempo “Slow” y ponderación en frecuencia “A” donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Nivel de ruido de fondo continuo equivalente con ponderación “A”, $L_{Aeq,T}$; T = 20s.

Sonómetro Rion NA-27: 38,27 dB(A)

Sonómetro Brüel 2250: 35,94 dB(A)

Durante el transcurso de las mediciones tanto de nivel de ruido de fondo como ruido estacionario hubo presencia constante de los pasajeros que iban a abordar el tren que pueden ser apreciados como una fuente adicional de ruido externo que no puede ser controlada durante las mediciones y que generan un aumento del nivel general de ruido.

Una vez el tren llega al sitio de medición a las 06:40am se inicia el registro del nivel del tren en estado estacionario en condiciones normales de excitación del motor y al no tener permiso de acceso al vehículo no se pudo corroborar el cumplimiento de que las puertas y ventanas se encuentren cerradas y los canales de ventilación no presenten obstrucciones durante el proceso de medición. Cada una de las mediciones tuvo un tiempo de integración de 20s. Los transductores fueron ubicados a una distancia de 7,5m del eje de la vía y a una altura de 1,2m sobre la cabeza del carril. Los resultados de cada grupo de mediciones se presentan en las Tablas 24 y 25:

Tabla 24. Posición 1 de medición. Brüel 2250. Ubicado frente a la locomotora.

F [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	L_{Aeq,T}
Med. 1 dB[A]	2	27,6	40,8	46,3	44,3	57,5	55,3	48,9	44,6	40,6	50.4
Med. 2 dB[A]	0	28	40,6	46,1	44,2	57,4	55,3	48,9	43,3	34,9	50.3
Med. 3 dB[A]	1	28,2	39,1	45,4	44,1	56,8	55,2	49	44,1	41,2	50

L_{Aeq,T} promedio de la posición de medición 1 = 50.2 dB(A)

Tabla 25. Posición 2 de medición. Rion NA-27. Ubicado frente al segundo vagón.

F [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	L_{Aeq,T}
Med. 1 dB[A]	0,8	30,4	42,7	51	51,1	54,1	56,3	54,4	55,5	51,4	52.8
Med. 2 dB[A]	21,2	30,6	43,2	51,3	50,6	52,5	56,8	52,3	47,7	39,1	50.6
Med. 3 dB[A]	3,7	30,6	48,3	49,4	48,1	50,7	55,2	51,4	51,7	46	49.9

L_{Aeq,T} promedio de la posición de medición 2 = 51.5 dB(A)

Una vez se ha obtenido el resultado medio de cada posición de medición se procede a realizar el respectivo análisis de datos según lo recomienda esta normativa internacional cuyo propósito es conseguir un nivel de presión sonora continuo equivalente total para el tren, no obstante, al no contar con la cantidad de puntos de medición necesarias para cubrir la longitud total del tren dadas las circunstancias mencionadas anteriormente, se evalúa el nivel que genera el sólo vagón o locomotora en este caso por individual al ser los niveles registrados mediante el uso de la siguiente ecuación obtenida de la Norma UNE-EN ISO 3095:

$$L_{pAeq,T(vagón/locomotora)} = 10 \log \left(\sum_{i=1}^{n_{vagón/locomotora}} \frac{l_i}{l_{totalvagón/locomotora}} 10^{L_{pAeq,T}^i/10} \right) \quad (21)$$

$L_{pAeq,Ti}$ = nivel de presión acústica medio al nivel de la posición i .

n = número de posiciones de medición.

l_i = longitud asociada a la posición de medición i , que en este caso para los dos puntos de evaluación es un valor de 4m para el segundo vagón y 3m para la locomotora, dando como resultado el cociente con la longitud total del vagón y la locomotora (8m y 6m respectivamente), 0,5m para cada una de las posiciones.

El resultado de la ecuación anterior determina el nivel de presión sonora equivalente total para el vagón y la locomotora que es de 48,5 dB(A) y 47,2 dB(A) respectivamente.

Con las correcciones propuestas en el protocolo los resultados son los siguientes:

Llocomotora: 45,4 dB(A)

Lvagón: 46,7 dB(A)

A continuación se observan en la tabla 26 los posibles eventos y posterior a ella, la estimación de la incertidumbre ampliada de la medición.

Tabla 26. Cálculo de la incertidumbre de medición de los medidores.

Cantidad	Rango habitual posible Locomotora	Incertidumbre típica $u(x_i)$ Locomotora	Rango habitual posible Vagón	Incertidumbre típica $u(x_i)$ Vagón
L_p	40,3 dB	-	41,2 dB	-
$\delta_{\text{calibrador, referencia}}$	0 dB	0,14 dB	0 dB	0,14 dB
$\delta_{\text{calibrador, largo plazo}}$	0 dB	0,04 dB	0 dB	0,04 dB
$\delta_{\text{calibrador, tensión de alimentación}}$	0 dB	0,06 dB	0 dB	0,06 dB
$\delta_{\text{calibrador, factor de distorsión}}$	0,105 dB	0,06 dB	0,105 dB	0,06 dB
$\delta_{\text{sonómetro, dirección}}$	0 dB	0,25 dB	0 dB	0,25 dB
$\delta_{\text{sonómetro, frecuencia}}$	0 dB	0,25 dB	0 dB	0,25 dB
$\delta_{\text{sonómetro, linealidad del nivel}}$	0 dB	0,46 dB	0 dB	0,46 dB
$\delta_{\text{calibrador, meteorológico}}$	0 dB	0,14 dB	0 dB	0,14 dB
$\delta_{\text{calibrador, presión del aire}}$	0 dB	0,52 dB	0 dB	0,52 dB

$\delta_{\text{calibrador, temperatura}}$	0 dB	0,29 dB	0 dB	0,29 dB
$\delta_{\text{calibrador, humedad}}$	0 dB	0,29 dB	0 dB	0,29 dB
$\delta_{\text{sonómetro, parabrisas}}$	0,06 dB	0,03 dB	0,06 dB	0,03 dB
$\delta_{\text{trípode}}$	0 dB	0,35 dB	0 dB	0,35 dB
$\delta_{\text{distancia}}$	0 dB	0,13dB	0 dB	0,13dB
δ_{redondeo}	0 dB	0,29 dB	0 dB	0,29 dB
L_{pAeq}	40,46 dB	1,02 dB	41,36 dB	1,02 dB

La incertidumbre típica combinada es: $u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(x_i)} = 1,02 \text{ dB}$

La incertidumbre ampliada a $k=2$ es $U = 2u_c(y) = 2,04 \text{ dB}$

8.9 Mediciones complementarias.

8.9.1 Medición del tren al momento de frenado. Carrera 9 con calle 171.

Las mediciones del momento de frenado se realizaron en horas de la tarde cuando el tren de La Sabana se trasladaba en sentido norte - sur para descargar sus pasajeros, se hace uso de la Norma UNE-EN ISO 3095 al ser la normativa que contiene el procedimiento para llevar a cabo esta medición.

Los instrumentos de medición deben ser posicionados a una distancia de 7,5m del eje de la vía y a una altura de 1,2m sobre la cabeza del carril comenzando el tiempo de registro 20m antes de que el tren pase por el primer punto de medición. La normativa es clara al especificar que es necesario realizar las mediciones a ambos lados del tren, sin embargo, al no disponer con la cantidad de instrumentos suficientes se asume que este vehículo es acústicamente idéntico en ambos lados, en cuyo caso puede optarse por la disminución de puntos de medición.

El estado de la vía es óptimo para realizar las mediciones ya que presenta una cama de balasto alrededor de los rieles como se aprecia en la Figura 20, los cuales no presentan tampoco ninguna curvatura extraña que pueda ocasionar ruidos durante el rozamiento entre la vía y las ruedas del tren que se vean reflejados en energía adicional en picos de nivel o aumento del nivel general en el rango de frecuencias altas al emplear el freno.

FIGURA 20. ESTADO DE LA VÍA.



Una vez dejado el instrumento de captura a temperatura ambiente mientras se terminaban de acomodar las alturas de los trípodes de los equipos (Figura 21), se procedió a la calibración con un nivel de 94 dB y una frecuencia de 1 kHz durante 20s y así hacer registro del nivel de ruido de fondo también durante 20s obteniendo los siguientes resultados:

FIGURA 21. POSICIONAMIENTO SONÓMETROS RION NA-27 (IZQ.) Y BRÜEL 2250 (DER.)



Ruido de fondo sonómetro Brüel 2250: 39.2 dB[A]

Ruido de fondo sonómetro Rion NA-27: 34.5 dB[A]

La normativa que se implementa en este tipo de mediciones sugiere que se realicen tres grupos de mediciones por cada punto de medición escogido con una tolerancia de distancia de $\pm 10\text{m}$ debido a que no puede calcularse con exactitud el lugar de frenado. Se realizó una sola

medición del evento ya que, al haber sido medido en el momento de trabajo y uso diario, no se puede repetir la acción de frenar. En la Tabla 27 se aprecian los resultados obtenidos durante el proceso de medición.

Tabla 27. Niveles registrados durante el momento de frenado del tren.

F [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Rion NA-27 dB[A]	0,2	21,6	39,3	40,8	39,1	41,1	46,2	42,5	42,2	37
Brüel 2250 dB[A]	7,2	19,3	30,1	36,4	35,7	47,8	46,2	40,2	35,4	32

Basados en los resultados por banda de octava obtenidos en ambos sonómetros, se emplea el promedio energético para determinar el nivel equivalente total en cada uno de los medidores en el momento de frenado del tren.

El sonómetro Rion NA-27 registró un nivel equivalente de 40,9 dB[A] y el sonómetro Brüel 2250 hizo un registro de 41 dB[A].

En párrafos anteriores se ha mencionado que la Norma UNE-EN ISO 3095 requiere de 3 mediciones válidas en cada punto medición, así que es necesario dejar claro que el proceso de medición realizado en esta ocasión no cumple con los criterios de evaluación necesarios, por ende, es de vital importancia realizar una segunda medición donde se cuente con una zona especializada para el ensayo de éstos vehículos férreos y donde puedan realizarse las mediciones de ser necesario.

8.9.2 Medición del tren en aceleración desde reposo. Carrera 9 con calle 171.

Las mediciones de aceleración desde reposo pueden realizarse según la Norma UNE-EN ISO 3095 en dos métodos distintos dependiendo de la finalidad de la medición. El primer método se

denomina “método de nivel máximo” y se determina en términos de $L_{pAFMáx}$. Y el segundo método, “método del nivel promedio”, en términos de $L_{pAeq,T}$. Dado que los puntos de medición para emplear el “método de nivel promedio” se ubican a una distancia de 25m del eje de la vía que no se encuentran disponibles en el sitio de medición, se decide aplicar el “método de nivel máximo” durante el proceso de arranque del tren.

Luego de realizar la correspondiente calibración del sistema de medición, se registró el nivel de ruido de fondo durante 20s. Se obtuvo un nivel de 38,3 dB[A] con el sonómetro Rion NA-27 y un nivel de 35,5 dB[A] en el sonómetro Brüel 2250.

Las posiciones de medición se tomaron de acuerdo a las indicaciones del “método de nivel máximo” y teniendo en cuenta la situación de falta de equipamiento presentada, se posicionó el sonómetro Brüel 2250 a 10m de la cabeza del tren y se hizo un registro del nivel máximo generado desde que arranca hasta que cruza por este punto de medición con un tiempo de integración total de 44,25s y de la misma forma se hizo con el sonómetro Rion NA-27 que fue ubicado a una distancia de 7,5m de la vía en dirección a la locomotora. (Figura 22).

Figura 22. Aplicación del método de nivel máximo de la UNE-EN ISO 3095.



El procesamiento de datos que se realiza en esta medición consiste en la selección del mayor nivel que se genera en cada grupo de mediciones siguiendo el procedimiento de registrar el nivel durante el arranque del tren hasta que sobrepasa el punto ubicado a 10m.

El nivel máximo registrado, $L_{AFMáx.}$, con el sonómetro Brüel fue de 98,1 dB[A] y para el caso del sonómetro Rion NA-27 se midió un nivel de $L_{AMáx}$ de 104,5 dB[A].

8.10 Simulación en software CadnaA.

De acuerdo al planteamiento del presente proyecto y para dar cumplimiento al tercer objetivo, el siguiente paso es la simulación de la medición realizada con el protocolo propuesto por medio de un software especializado para la evaluación y simulación de ruido ferroviario. En este caso se cuenta con la disponibilidad de licencia del software CadnaA “diseñado para el cálculo, evaluación y predicción de la contaminación acústica generada por fuentes de ruido” (Fernández) desarrollado por la empresa alemana DataKustik.

Esta licencia que se encuentra disponible en la Universidad de San Buenaventura de Bogotá cuenta con el módulo de cálculo para ruido férreo alemán Schall 03 y brinda la posibilidad de realizar variaciones en distintas configuraciones tales como, agregar corrección por el ferrocarril, tener o no en cuenta la influencia de las condiciones ambientales ya que este método en su versión original no lo hace, y en caso de haber presencia de edificaciones excluir su coeficiente de atenuación. Este modelo de simulación emplea como base al igual que varias de las normativas internacionales aquí presentadas, factores de corrección que se relacionan directamente al tipo de vehículos y vías propias del país de origen de la normativa que en este caso son las vías alemanas.

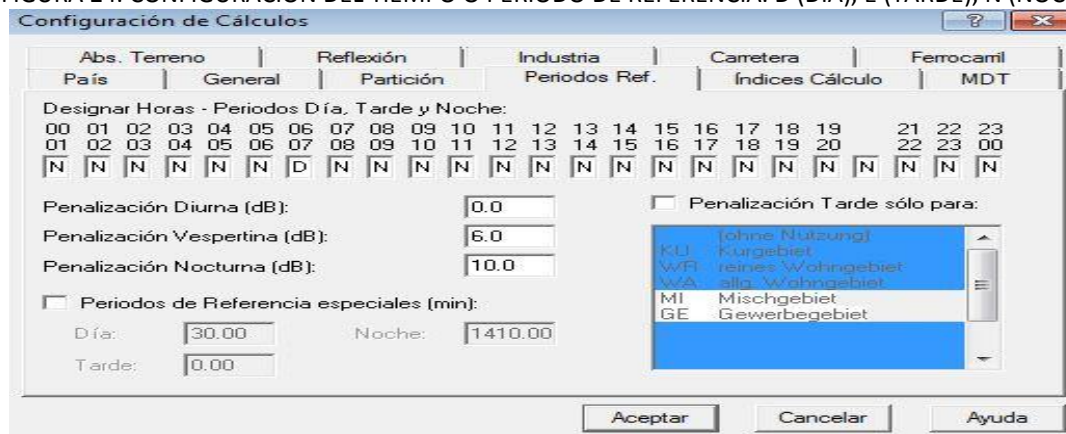
En la Figura 23 aparecen las opciones de configuración para los distintos parámetros de evaluación de ruido ferroviario dentro del software de simulación CadnaA haciendo uso del modelo de predicción Schall 03.

FIGURA 23. CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CÁLCULO PARA RUIDO FERROVIARIO DE CADNA.



En la Figura 24 se muestra la información referente al periodo o tiempo de referencia donde es seleccionado como D (día) la hora que transcurre de 6am a 7am puesto que es el periodo que abarca el paso del tren evaluado con el protocolo propuesto. Puede observarse de igual forma que el software permite adicionar valores de penalización en dB para los niveles en que se exceda el nivel permitido durante el día, la tarde y/o la noche.

FIGURA 24. CONFIGURACIÓN DEL TIEMPO O PERIODO DE REFERENCIA. D (DÍA), E (TARDE), N (NOCHE) DE CADNA.



Una vez realizada la configuración principal para la simulación, se procede a recrear el evento sonoro. La vía férrea se sitúa de manera horizontal para dar una perspectiva aérea del sitio de medición, siendo el muro de concreto de 2m que se encuentra al costado oriental de la vía

representado como una barrera ubicada debajo de la vía dibujada como se muestra en la Figura 25. Los objetos del costado occidental se encuentran por encima de la vía y también se observan en la Figura 25.

FIGURA 25. REPRESENTACIÓN DEL SITIO DE MEDICIÓN EN CADNAA.



Haciendo uso de una malla con nivel de 40 dB(A) que representan el nivel de ruido de fondo de la situación real, se puede observar en el software de simulación que el paso del tren a una velocidad de 25 km/h genera a una distancia de 7,5 m de la vía y a una altura de 1,2m un nivel de presión sonora de 47,7 dB(A), siendo este resultado similar al resultado de la medición del tren a velocidad constante en horas de la mañana con una diferencia entre resultados de tan solo ± 2 dB.

Debido a que el método de cálculo Schall 03 analiza las mediciones con un tiempo de referencia de 1 hora, se decidió realizar una medición más al nivel de ruido que genera el paso del tren con este mismo tiempo de integración de una hora en el sonómetro.

A continuación se presenta la información acerca del sitio de medición y sus condiciones atmosféricas:

Lugar: zona de parqueadero Gimnasio Los Pinos. Carrera 9 # 193.

Fecha y hora: jueves 27 de octubre 2016 / 06:20am – 7:20am

Temperatura: 10°C

Velocidad del viento: 0.9m/s en sentido Oeste.

Humedad relativa: 97%

Presión barométrica: 0,73 Bar (739.9 mBar)

Luego de ser expuesto a temperatura ambiente el transductor y ser calibrado, se realizó la medición del nivel de ruido de fondo. La configuración en la respuesta de tiempo del medidor es “Slow” y con ponderación en frecuencia “A”.

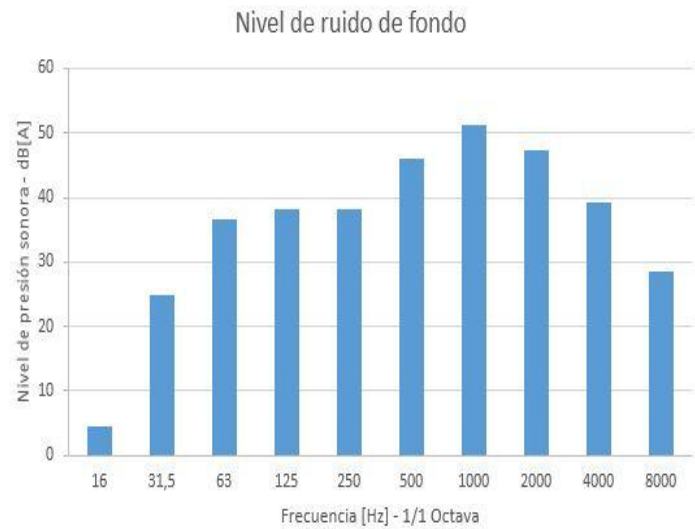
$$L_{Aeq,T,Ruidodefondo} = 59,1 \text{ dB[A]}; T = 20s$$

Este nivel de ruido de fondo registrado es aproximadamente 20 dB más alto que los niveles de ruido de fondo de las mediciones anteriores haciendo que el nivel global registrado durante la medición sea mucho mayor que los niveles obtenidos en la primer simulación. Los resultados se muestran en la Tabla 28 y Figura 26.

Tabla 28. Nivel de ruido de fondo.

Brüel 2250		Brüel 2250	
F [Hz]	dB [A]	F [Hz]	dB [A]
16	4,6	500	46,1
31,5	25	1000	51,2
63	36,7	2000	47,3
125	38,3	4000	39,3
250	38,3	8000	28,6

FIGURA 26. NIVEL DE RUIDO DE FONDO.



Siguiente a esta medición se cambia la configuración del tiempo de integración en el sonómetro a 1 hora. La hora de medición comenzó a las 6:20am y concluyó a las 7:20am. El tren pasó a las 6:51am por el punto de medición dejando de ser escuchado entre 30 y 40 segundos después de su paso.

$$L_{Aeq,T, Medición} = 62,9 \text{ dB[A]}; T = 1 \text{ hora.}$$

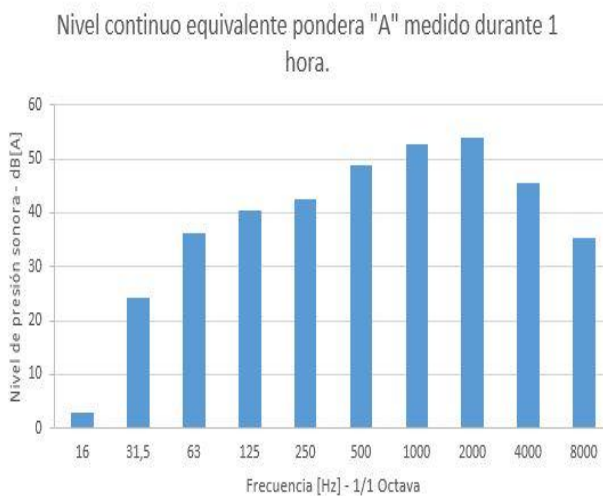
Este nivel registrado es 4 dB más alto que el nivel de ruido de fondo, lo cual indica ciertamente que el paso del tren tiene una mínima influencia frente al nivel de ruido de fondo cuando se evalúa en un tiempo de integración de 1 hora ya que el evento sonoro tiene una duración en el punto de medición estimada entre 30 y 40 segundos. Los niveles registrados en esta medición se presentan en la Tabla 29 y en la Figura 27.

Se calibra nuevamente el sistema de medición para finalizar la práctica y se obtiene una variación en la sensibilidad del transductor con respecto a la calibración previa a las mediciones de 0,5 dB.

TABLA 29. NIVEL CONTINUO EQUIVALENTE REGISTRADO DURANTE 1 HORA DE MEDICIÓN QUE INCLUYE EL PASO DEL TREN

Brüel 2250		Brüel 2250	
F [Hz]	dB [A]	F [Hz]	dB [A]
16	2,8	500	48,8
31,5	24,1	1000	52,8
63	36,3	2000	53,9
125	40,3	4000	45,5
250	42,5	8000	35,4

FIGURA 27. NIVEL CONTINUO EQUIVALENTE REGISTRADO DURANTE 1 HORA DE MEDICIÓN QUE INCLUYE EL PASO DEL TREN.



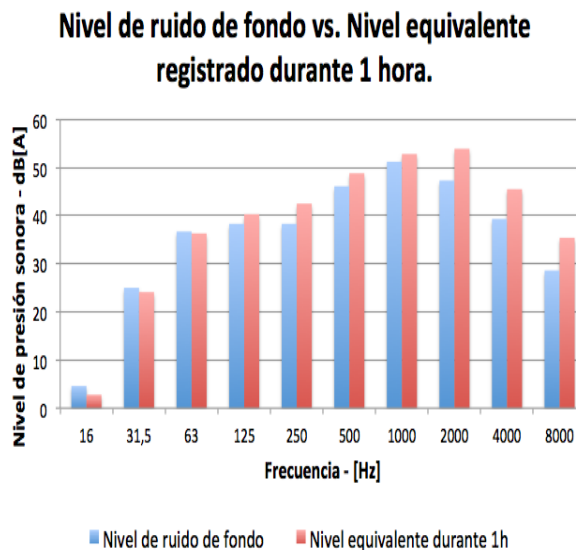
El nivel de presión sonora máximo registrado $L_{AM\acute{a}x}$ fue de 102,7 dB[A].

En la Tabla 30 y Figura 28 se presenta el nivel de ruido de fondo vs. El nivel registrado durante 1 hora de medición.

Tabla 30. Nivel de ruido de fondo vs. Nivel equivalente registrado durante 1 hora.

Brüel 2250	Ruido de fondo	Medición 1 hora.	Brüel 2250	Ruido de fondo	Medición 1 hora.
F [Hz]	dB [A]	dB [A]	F [Hz]	dB [A]	dB [A]
16	4,6	2,8	500	46,1	48,8
31,5	25	24,1	1000	51,2	52,8
63	36,7	36,3	2000	47,3	53,9
125	38,3	40,3	4000	39,3	45,5
250	38,3	42,5	8000	28,6	35,4

FIGURA 28. NIVEL DE RUIDO DE FONDO VS. NIVEL EQUIVALENTE REGISTRADO DURANTE 1 HORA.



Como se observa en los resultados que se obtienen tras la medición de 1 hora, la diferencia de niveles entre el ruido de fondo y el nivel del evento sonoro es menor a 10 dB en cada banda de octava, así que se procede a realizar una diferencia logarítmica entre estos niveles globales aplicando el procedimiento descrito en el numeral 7.2 y hallar el valor real del nivel de ruido que genera la fuente.

$$L_{\text{fuente}} - L_{\text{fondo}} = 62,9 \text{ dB(A)} - 59,1 \text{ dB(A)} = 60,6 \text{ dB(A)}$$

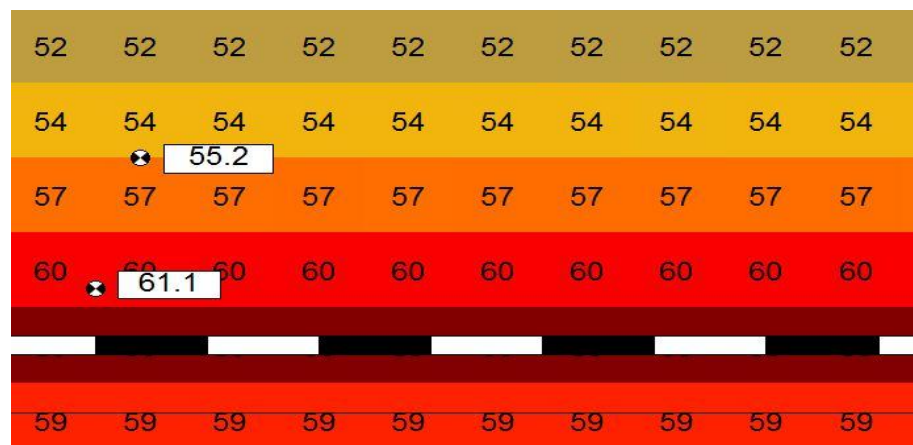
Una vez se ha identificado el nivel real de la fuente. Se procede a la aplicación de las correcciones propuestas dentro del protocolo obteniendo el siguiente resultado.

$$L_{\text{fuente}} = 58,8 \text{ dB(A)}$$

Respecto a la incertidumbre de la medición, esta puede suponerse gracias a las incertidumbres de las mediciones anteriores ya que se consideran todos los mismos posibles casos de incertidumbres que pueden ocurrir durante una medición al ruido ferroviario.

En cuanto a la simulación por medio del software, se ingresa el valor de ruido de fondo que se obtuvo en la medición de 1 hora, es decir, 59,1 dB(A) aumentando así el nivel en el punto de medición situado a 7,5m de la vía, dando como resultado 61,1 dB(A), 2,3 dB más que el resultado obtenido en la medición de campo luego de aplicar las correcciones propuestas dentro del protocolo de medición. Ver Figura 29.

FIGURA 29. REPRESENTACIÓN DEL SITIO DE MEDICIÓN EN CADNAA.



Finalmente se aprecia que la disimilitud que hay entre las mediciones y simulaciones cuyo resultado es distinto entre sí fue causada por las variaciones que hubo en los niveles de ruido de fondo principalmente, un nivel de ruido de fondo mayor, causa un nivel global mayor. La razón por la que se presentó este resultado, fue que el tiempo de medición de ruido de fondo debió ser igual al tiempo de medición del evento sonoro definido, es decir de 1 hora. Por otra parte, después de realizar la simulación se concluyó que el orden correcto para calibrar el sistema de simulación, es primero realizar la medición en campo y luego de esto, debido a la considerable cantidad de parámetros modificables, se calibra el software de simulación teniendo como referencia los resultados que se obtienen en la práctica. Al modificar dentro del software los valores de emisión de ruido que interactúan en el punto de evaluación, a 7,5m de la vía del tren, se logra la aproximación deseada entre los resultados de las prácticas de campo y las simulaciones.

El ANEXO 2 presenta el informe de las mediciones realizadas.

9. Conclusiones

1. El protocolo de medición que se propone en este documento se valida gracias a la similitud que hay entre los resultados en la medición de campo y en la simulación por medio del software CadnaA. Las diferencias que se encuentran entre las mediciones cuyos resultados son distintos a las simulaciones se originan principalmente porque el modelo Schall 03 tiene como referencia de velocidad 100 km/h y la velocidad del tren de La Sabana es de apenas 25 km/h. Además de esto, se consideran las variaciones del nivel de ruido de fondo como una fuente no controlada.
2. El protocolo de medición que se propone en este documento es válido aplicarlo a mediciones al ruido que causa el tren de La Sabana en Bogotá, en las fases de velocidad constante y de estado estacionario porque a pesar de ser las únicas fases que pudieron ser evaluadas dentro del protocolo que se propone, se demostró la importancia de plantear un procedimiento de medición local ya que el estudio realizado a las normativas expuestas en este documento, indica que es incorrecto aplicar aquellos procedimientos que requieren el uso de factores de corrección directamente ligados al tipo de vía o tren de los países de donde proviene cada normativa en una medición de ruido ferroviario en Colombia.
3. El nivel $L_{Aeq,T}$ del paso del tren a velocidad constante, con $T = 1$ hora, es de 62,9 dB(A) siendo tan sólo 4 dB por encima del nivel de ruido de fondo para esta medición, indicando ciertamente que si se evalúa con este valor para T, el nivel de paso del tren tiene poca influencia frente al nivel de ruido de fondo ya que no alcanza a lograr la mínima diferencia de 10 dB necesaria para diferenciar una fuente de ruido de la otra.

Caso contrario a la evaluación con T igual al tiempo de paso del tren donde su nivel se eleva hasta 20 dB por encima del ruido de fondo en cada banda de octava.

4. Los resultados que se obtienen en los cálculos de las incertidumbres son iguales para todas las mediciones que se realizaron porque se evaluaron todos los mismos posibles casos de correcciones que puedan presentarse en una medición de ruido ferroviario y así se hallaron las incertidumbres típica combinada y ampliada como lo sugiere la Norma UNE-EN ISO 3095 donde además de esto, la única variación que se presenta en estos cálculos es de 0,126 dB cuando se modifica la distancia del medidor a la fuente de 7m a 25m.

5. De acuerdo al objetivo de estudiar y analizar las normativas de ruido ferroviario a nivel internacional dentro de este proyecto de grado, se concluye que la normativa que presenta la información más completa en cuanto a mediciones de ruido ferroviario es la Norma UNE-EN ISO 3095: 2013. Donde además de ser la única Norma que presenta los procedimientos de medición de ruido correspondientes para todas las fases de actividad del tren, la aplicación de estos procedimientos no requiere de factores de corrección específicos ni previa caracterización de la vía ni del tren que se desea evaluar y es la única que considera las posibles incertidumbres que pueden ocurrir durante una medición al ruido ferroviario.

10. Recomendaciones

1. Para realizar las mediciones de los niveles de ruido que genera el paso del tren es aconsejable tener el permiso de la empresa que regula estas actividades férreas puesto que en la mayoría de casos es necesario tomar más de un registro en cada punto de medición y en caso de haber algún error durante la práctica, sea posible repetir las mediciones en el mismo horario con las mismas condiciones acústicas y atmosféricas del momento.
2. Contar con una mayor cantidad de instrumentos de medición para registrar el nivel de ruido que genera la longitud total del tren y poder medir en ambos costados del mismo para diferenciar cuales son los componentes que más ruido generan y que por esta razón, en caso de ser necesario, sea posible realizar un control detallado sobre ellas. Así también ayudar a disminuir el nivel global de contaminación auditiva tanto en la ciudad como en el campo ya que como se estudió en este documento, el ruido ambiental es considerado uno de los agentes que más impacto genera en la sociedad y en la salud.
3. Identificar y evaluar las fuentes sonoras presentes durante el día en los momentos en que no pasa el tren ya que el nivel de ruido de fondo varía diariamente y alcanza altos valores de nivel de presión sonora.
4. Se propone como recomendación final, realizar mediciones que conlleven a la construcción de un mapa de ruido y un mapa estratégico de ruido en la ciudad de Bogotá para evaluar el uso del protocolo que aquí se propone en otros puntos de medición e identificar las fuentes que actúan y la proporción en que perjudican a las personas que permanecen expuestas a estos niveles durante todo el día y así tomar las medidas pertinentes para poder mejorar aspectos como el diseño urbano de la ciudad y la calidad de vida.

11. Lista de referencias y bibliografía

- Europea, P. E. (25 de Junio de 2002). From www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/directiva-evaluacion-y-gestion-ruido_tcm7-1706.pdf
- Ministerio de Ambiente, V. y. (Diciembre de 2004). From <https://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com/2012/10/guia-ambiental-subsector-ferreo.pdf>
- Medellín, U. d. (2009). *Corporacion Empresarial del Oriente Antioqueño*. From <http://www.ceo.org.co/images/stories/CEO/ambiental/documentos/Normas%20ambientales/2001-2010/2009/Protocolo%20de%20ruido%20ambiental.pdf>
- Servicio Nacional de Aprendizaje, S. (Noviembre de 2006). *SENA*. From repositorio.sena.edu.co/bitstream/11404/2154/1/3085.pdf
- EPYPSA-ARDANUY. (2012). *Estudio para la elaboración del marco normativo férreo colombiano enfocado en factores técnicos de diseño, construcción, mantenimiento, operación, control y aspectos de seguridad*. Colombia.
- Almería, A. d. (2011). *Mapa de ruido municipio de Almería*. Almería: Ayuntamiento de Almería.
- Baranovskii, A. (2011). Adaptation of RMR noise propagation method for railway conditions. *Transbaltica* (pp. 11-15). Vilnius: Transbaltica.
- Hernandez, A. (3 de Septiembre de 2013). *Universidad Politécnica de Valencia*. From <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/35709/Memoria.pdf?sequence=1>
- Neubergova, K., Tyfa, L., Vasica, D., & Ladys, L. (2013). Noise measurements on various railway superstructure constructions. *11th European Transport Congress* (pp. 191-196). Praga: Universidad Técnica Checa .
- Parrondo, J. L., Velarde, S., González, J., Ballesteros, R., & Santolaria, C. (2006). *Acústica Ambiental*. Oviedo: Ediciones de la Universidad de Oviedo.
- Fernández, J. (n.d.). *Ruido en los medios de transporte. Mapas de ruido*.
- Harris, C. M. (1995). McGrawHill.
- Aviles, R., & Rocío, P. (2017). *Manual de acústica ambiental y arquitectónica*. Madrid, España: Paraninfo.
- Jaramillo, A. M. (2007). *Acústica: La ciencia del sonido*. Medellín, Colombia: Fondo Editorial ITM.
- ISO. (2014). *UNE-EN ISO 3095: Aplicaciones ferroviarias. Medición del ruido emitido por vehículos que circulan sobre ferrocarriles*.
- (1996). *Reken-Meetvoorschrift Railverkeerslawai (RMR)*.
- EPA. *Guía para la evaluación del ruido a partir de las infraestructuras férreas. Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario*.
- (2006). *Norma alemana para la predicción del ruido Schall 03*.
- Transporte, D. (1995). *Calculation of railway noise*. Londres: HMSO.
- Carrión, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Ediciones UPC.
- (n.d.). From Secretaría Distrital de Ambiente: www.ambientebogota.gov.co/ruido

12. Anexo 1.

Protocolo de medición.

A continuación, se plantea el proceso metrológico con la finalidad de medir ruido ferroviario en Colombia cuando transitan a velocidad constante planteando los instrumentos necesarios, el sitio de medición y sus características y el procedimiento.

Instrumentación y calibración.

El equipo necesario para realizar las mediciones de la emisión de ruido de tren debe cumplir con los requisitos de un equipo de Clase 1 para sonómetros (IEC 61672-1:2002) y calibradores Clase 1 (IEC 60942: 2003).

En caso de hacerse uso de una configuración especial de micrófonos, estos deben tener características de campo libre y al igual que el sonómetro, debe usar su respectiva pantalla de protección contra el viento y siempre hacer uso del trípode.

El calibrador y sistema de medición acústico que se utilice para las mediciones debe cumplir con los requisitos de la supervisión, la cual debe ser de carácter periódica, de manera que se pueda determinar las condiciones para certificación y calibración de los mismos, creando la hoja de vida de cada instrumento.

El sistema de medición se debe calibrar en el sitio de ensayo antes y después de cada grupo de mediciones durante 10s. Antes de realizar esta calibración, debe exponerse el instrumento de medición a las condiciones ambiente del lugar donde se vaya a realizar el ensayo para tener en cuenta la temperatura del lugar. Si los niveles de un grupo de calibraciones difieren entre sí en más de 0.5 dB, las mediciones entre estas calibraciones no serán válidas y deberán repetirse. En

largos intervalos de medición, debe calibrarse cada hora al igual que cada vez que haya un cambio en la configuración en el instrumento de medición.

Las mediciones no deben llevarse a cabo en caso de que esté lloviendo y siempre debe hacerse uso de una estación meteorológica con la finalidad de registrar durante la medición la dirección y velocidad del viento, que no puede ser superior a los 5m/s a la altura del micrófono de medición. Así mismo, debe tenerse registro de los valores de la temperatura, la humedad relativa y la presión atmosférica.

Entorno acústico

-El nivel sonoro del ruido de fondo en el punto de medición debe ser relativamente bajo, es decir, mínimo 10 dB por debajo del ruido emitido por el tren y debe cerciorarse que no haya influencia de otras fuentes de ruido predominantes que puedan afectar las mediciones.

-El ruido de fondo debe medirse antes y después del ensayo para determinar su influencia durante la práctica y este debe medirse durante 20s.

-Cuando no pueda determinarse con exactitud el nivel de ruido de fondo debido a que varía constantemente, se hace uso del percentil L_{90} . Puede realizarse una resta logarítmica entre el nivel de la fuente y el nivel de ruido de fondo para determinar el nivel de la fuente. Por ejemplo, si se tiene un nivel sonoro con la fuente en operación (ruido de fondo + fuente) de 70 dB(A) y un nivel de ruido de fondo de 65 dB(A), se realiza una resta logarítmica entre estos niveles como se indica a continuación: $(L_{\text{fuente}} - L_{\text{fondo}}) = 10 \log (10^{70/10} - 10^{65/10})$ [dB(A)] = 68.3 dB(A) (nivel de la fuente).

-La vía debe presentar una cama de balasto que se encuentre preferiblemente seca. El punto de medición no debe estar sobre agua debido a que aumenta el nivel registrado por las

reflexiones, ni cubierto de nieve (o granizo), si se da el caso, o donde se presente alta vegetación. La altura del punto de medición con relación a la cabeza del carril debe ser relativamente plana o que se encuentre entre 0m y -3m o 0m y +1.5m.

Sitio de medición

-El sitio de medición debe estar documentado con fotografías y un texto descriptivo indicando, posición de la fuente, receptor, otros elementos, otras fuentes de ruido (descripción cualitativa de las fuentes de ruido).

-El micrófono debe tener visibilidad de al menos el 80% de la vía en que se esté realizando el ensayo.

-Evitar que el punto de medición se encuentre cerca de antenas, líneas y generadores de potencia (transformadores) para no tener contaminación electromagnética de la señal.

-El entorno del punto de medición debe permitir la libre propagación del sonido, es decir, no tener ninguna obstrucción como edificios, vallas, cobertizos y montículos en un área con un radio de al menos tres veces la distancia de medición.

Correcciones

De acuerdo a las normativas en que se basa el desarrollo del proyecto se propone realizar las siguientes correcciones al nivel global L_{Aeq} , que se obtiene:

-Corrección por balasto: -1.5 dB(A).

-Corrección por distancia: $0.2 - 0.008d'$ dB(A); donde d' es la distancia que hay entre el punto de la fuente suponiendo que es sobre la cabeza del carril y el medidor, es decir, se hace uso

del Teorema de Pitágoras para hallar el valor de la distancia d' , la cual sería la hipotenusa en la situación.

-Por cambio de nivel y estructuras: +2.5 dB(A). Aplica únicamente cuando se lleve la medición frente a un cambio de nivel o estructura de la vía.

-Corrección por el aire: $0.016(d'^{0.9})$ dB(A).

Incertidumbres de medición

Según estas normativas que fueron estudiadas, la Norma UNE-EN ISO: 3095 es la única que presenta las incertidumbres que pueden generar las mediciones con base en varios posibles eventos que se muestran en la Tabla 4, extraída del Anexo G (Informativo). Cuantificación de las incertidumbres de medición según la Norma ISO/IEC Guía 98-3:2008. A continuación el procedimiento:

La incertidumbre típica combinada se calcula con la fórmula siguiente:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(x_i)} \quad (29)$$

Luego de este paso, la incertidumbre expandida se obtiene multiplicando la incertidumbre combinada estándar $u_c(y)$ por el factor de cobertura k .

$$U = k u_c(y) \quad (30)$$

Según la Norma UNE-EN ISO 3095 conviene elegir 2 como el valor de k , de forma que el intervalo $[y - U; y + U]$ presente un nivel de confianza de aproximadamente 95%”

Definiciones

Las definiciones que se presentan a continuación para ayudar con su comprensión son referenciadas de las mismas normativas base de estudio:

-Acoplamiento de vagones: El acto de conectar dos vehículos ferroviarios. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Amplitud: Máximo valor de una cantidad sinusoidal. Para una onda sonora, la amplitud es la diferencia entre la presión instantánea de un ciclo dado de la onda y la presión del ambiente en un lapso de tiempo determinado. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Ángulo de incidencia: Ángulo en el cual la onda sonora hace contacto con la superficie del medidor. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Ángulo de visión: Ángulo que es capaz de captar el instrumento de medición en proyección horizontal hacia la fuente sonora. (Transporte, 1995)

-Banda de octava: Intervalo frecuencial entre una frecuencia superior y otra inferior con base 2. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Banda de tercio de octava: Intervalo frecuencial entre una frecuencia superior y otra inferior con base 2 elevado a 1/3. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Barrera: Una barrera acústica es una barrera, muro o edificación construida a propósito para cubrir la fuente sonora del punto de recepción. Comúnmente, el término “barrera” se utiliza para describir una pantalla delgada ubicada cerca de la vía con una altura aproximada de 1m a 3m. (Transporte, 1995)

-Cabeza del carril: Es la parte superior del carril que está en constante rozamiento con las ruedas del tren durante su movimiento. (Transporte, 1995)

-Decibel, dB: Unidad de medida para el nivel sonoro. Equivale a 10 veces el logaritmo con base 10 del cuadrado de la diferencia entre la presión sonora y la presión sonora de referencia de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Energía acústica: También conocida como energía sonora o solo energía. Se refiere comúnmente como el cuadrado de la diferencia entre la presión sonora, energía sonora, energía o energía acústica y la presión sonora de referencia de 2×10^{-5} Pa transmitida en las ondas sonoras al ser generadas. Algebraicamente equivale a $10^{L/10}$, siendo L el nivel sonoro expresado en decibeles. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Espectro audible: Rango de frecuencias audibles para el oído humano; teóricamente va desde 20 Hz hasta 20000 Hz. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Frecuencia: Número de ciclos o repeticiones por segundo o número de longitudes de onda que han pasado por un punto estacionario durante 1s. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Hertz, Hz: Unidad de medida de la frecuencia. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Locomotora: Es el vehículo que provee de potencia al tren en su totalidad. (Transporte, 1995)

-Longitud de onda: Distancia entre dos frentes de onda que forman un periodo de una onda sinusoidal. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Micrófono: Transductor electro acústico diseñado para representar eléctricamente una señal acústica o un cambio de presión. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Nivel de exposición sonora (SEL): Es el nivel en el punto de recepción que al mantenerse por 1s causa la misma energía con ponderación A recibida de un evento sonoro. (Transporte, 1995)

-Nivel sonoro continuo equivalente, L_{Aeq} : Para el protocolo de medición propuesto se validan las siguientes definiciones de nivel de sonido continuo equivalente.

- $L_{Aeq,T}$: Nivel sonoro de una fuente registrado en un punto y espacio durante un tiempo definido con ponderación A. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-El nivel de una cantidad es el logaritmo de la diferencia de esa cantidad con un valor de referencia del mismo tipo de cantidad. (Transporte, 1995)

-Nivel de sonido máximo: Máximo nivel registrado en el tiempo que dura la medición con ponderación A expresado como $L_{AMáx}$. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Nivel de presión sonora con ponderación A: La ponderación A atenúa las frecuencias bajas y en una menor medida las frecuencias que se encuentran por encima de los 4000 Hz. Su comportamiento es el más parecido al del oído humano. Se expresa en dB(A). (Transporte, 1995)

-Percentil L90: Unidad estadística que describe el nivel sonoro excedido el 90% del tiempo de medición. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Posición de la fuente: Es la posición en la fuente desde la cual el ruido es generado. (Transporte, 1995)

-Punto de recepción: Punto de ubicación del medidor para evaluar el nivel de presión sonora que genera la fuente. (Transporte, 1995)

-Rango dinámico: Diferencia algebraica entre el valor mayor y menor de entrada al instrumento de medición sin que produzca distorsión. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Respuesta de tiempo “Slow”: Configuración que usa un sonómetro para caracterizar un evento sonoro continuo, tomando en consideración que el filtro de respuesta rápida “fast” es preferible para aquellos sonidos impulsivos durante el intervalo de medición. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Ruido: Describe generalmente el sonido indeseado. En el caso de la industria ferroviaria, se considera como todo tipo de ruido o sonido que produce el movimiento u operación de los vehículos férreos. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Ruido de Fondo: En el caso de la industria ferroviaria, es el ruido de todas las fuentes que no se encuentran relacionadas al tren, como por ejemplo, ruido por tráfico rodado, ruido aéreo, señales de tránsito, ruido generado por las personas, etc. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Tren: Conjunto de vehículos férreos acoplados entre sí para formar una sola unidad operativa. (ISO, 2014)

-Tiempo de medición: Periodo de tiempo durante el cual se evalúa el evento sonoro. (Manual para la medición y análisis de ruido ferroviario)

-Vagón: Vehículo ferroviario que puede tener o no potencia propia usado para transportar pasajeros o carga de algún material, liviano o pesado. (Transporte, 1995)

-Vía: Para los sistemas convencionales, consiste en dos rieles de acero paralelos soportados por traviesas de madera. (Transporte, 1995)

-Vía, lecho o cama de balasto: Se refiere a la vía o cama compuesta por piedras, granito o balasto unido para soportar la vía. También puede producir una atenuación en el nivel de ruido que genera la fuente. (Transporte, 1995)

Procedimiento de medición

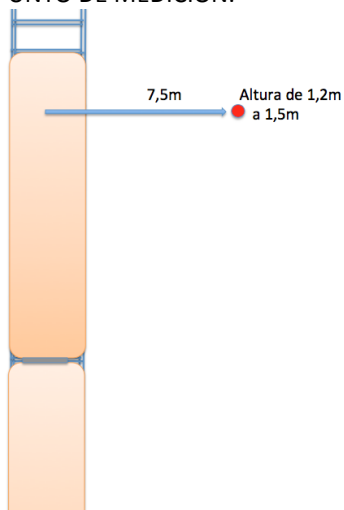
Una vez se tiene toda la instrumentación lista para la medición, se ha realizado la respectiva calibración de los medidores y el entorno acústico cumple con las condiciones adecuadas, se implementa el siguiente procedimiento:

Metodología para trenes a velocidad constante

Para evaluar el ruido ferroviario registrado por el paso del tren se emplea el criterio de Nivel de Presión Sonora Equivalente $L_{Aeq,T}$. Donde T, es el tiempo de paso total del tren por el punto de medición, entendiendo por paso total la condición temporal en la cual no se perciba el ruido del tren, es decir, cuando el nivel sonoro es debido al ruido de fondo. El anterior es un criterio usado por las normativas internacionales responsables de la evaluación de ruido ambiental. De manera similar se calcula el Nivel de Presión Sonora Equivalente Máximo, $L_{AMáx}$ para el paso del tren, usando la configuración de respuesta de tiempo “slow” y con ponderación frecuencial “A” en el sonómetro y comenzando a registrar el nivel de ruido cuando el tren se encuentre a 20m del punto de medición y evaluando el espectro por banda de octava en un rango de frecuencia de 16 Hz a 8000 Hz.

Las posiciones de medición se deben situar a una distancia de 7,5m del eje de la vía a una altura entre 1,2m y 1,5m por encima de la cabeza del carril, véase la Figura 29.

FIGURA 29. REPRESENTACIÓN DEL PUNTO DE MEDICIÓN.



La medición se debe realizar a ambos lados del tren, pero se pueden omitir las posiciones de medición en un lado del tren si ambos lados son acústicamente idénticos (es decir, con una distribución simétrica de las fuentes de ruido). Y de la misma manera, el tren debe tener los sistemas de ventilación libres de partículas que afecten el flujo libre de aire y las puertas y ventanas del tren se encuentren cerradas.

Durante el tiempo en que se realice el procedimiento de medición, debe llevarse a cabo un reporte en caso de presentarse ruidos que representen molestia para quien se encuentre próximo al tren durante su paso y así se perjudique la calidad de las mediciones. Este tipo de ruido se caracteriza por lo general por ser un desgaste o falta de mantenimiento de los vehículos férreos como lo son, chillidos en las ruedas (presentado generalmente en las curvas), ruidos impulsivos, es decir impactos repetitivos, entre otros.

Se sugiere hacer uso de una tabla donde se puede tener el control de los pasos a cumplir durante el proceso de medición del ruido que se genera por parte del paso del tren, ya que es bastante útil en cuanto al flujo de trabajo que debe realizarse. Ver Tabla 31.

Metodología para mediciones en estado estacionario.

Para realizar la medición del tren en estado estacionario, primero que todo debe verificarse el cumplimiento de las condiciones acústicas del entorno, sitio de medición, instrumentación, calibración y medición de ruido de fondo cuyos detalles están expuestos en párrafos anteriores.

Una vez se han calibrado los instrumentos de medición, se tiene la fuente sonora encendida en estado estacionario y se ha medido el nivel de ruido de fondo, en lo posible se realiza una malla de medición a lo largo de la longitud del tren como se indica en la Norma UNE-EN ISO 3095 y se realizan 3 mediciones por cada punto de 20s cada una. Si no es posible realizar la malla de medición, puede trasladarse el instrumento de medición sin modificar la configuración del mismo, de lo contrario, tendría que repetirse todo el ensayo y calibrar nuevamente el sistema. Las posiciones de medición se toman a 7.5m del centro de la vía y a una altura entre 1.2m y 1.5m de la cabeza del carril.

Cuando se tienen los datos del evento sonoro se promedian los niveles en cada uno de los puntos de medición y el valor mayor es el resultado final para posteriormente aplicar las correcciones propuestas.

Informe de la medición

El informe de la medición debe especificar que se hace uso del protocolo de medición especificado en este proyecto de grado y debe contener la siguiente información referente a la medición:

1. Naturaleza de la medición: Lugar, fecha y hora de la medición.
2. Responsable de la realización y monitoreo de las mediciones.
3. Condiciones del entorno acústico.
4. Condiciones medioambientales.
5. Condiciones de la vía.
6. Instrumentos de medición utilizados para la medición con sus respectivos documentos de certificación que los clasifica en Clase 1.
7. Presencia de ruidos externos durante la medición.
8. Cantidades medidas junto con sus niveles de ruido adquiridos e incertidumbres de la medición.
9. Cualquier otra información relevante acerca del sitio de medición y de las fuentes de ruido que se encuentren presentes durante la medición.

Tabla 31. Guía para realizar las mediciones.

CONFIGURAR LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	
1	VERIFICAR LAS CONDICIONES Y CONFIGURACIONES DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN
	Nivel de carga de la batería.
	Filtro de ponderación de frecuencia (A o C).
	Respuesta dinámica (fast o slow).
	Métrica de medición ($L_{Aeq,T}$, L_{AMax}).
2	VERIFICAR LA SINCRONIZACIÓN O DESFASE;
	Instrumento de medición
	Reloj de mano
	Computador
3	MONTAR EL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN EN EL TRÍPODE A LA ALTURA QUE INDICA EL PROTOCOLO
4	ORIENTAR EL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN DE HACIA LA FUENTE SONORA
5	CALIBRAR EL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN (O VERIFICAR LA CALIBRACIÓN) Y DOCUMENTAR DURANTE 10s
6	PONER PANTALLA ANTI VIENTO.
CONFIRMAR LAS VÍAS LIBRES PARA PROPAGACIÓN DEL RUIDO	
	La posición del observador, el operador del tren y empleados debe ser lejos del instrumento de medición y de la vía directa con la fuente sonora.
MEDIR Y CONFIRMAR QUE LAS CONDICIONES DEL AMBIENTE SE ENCUENTRAN DENTRO DE LOS LIMITES ESPECÍFICOS	
	Velocidad del viento: sostenido < 5 m/s, ráfagas < 9 m/s. (No es necesario para mediciones en interiores)
	Sin lluvia
	Temperatura, de 2°C a 35°C.
	Humedad relativa
MEDIR Y DOCUMENTAR EL NIVEL DE RUIDO DE FONDO	
REALIZAR LAS MEDICIONES	
	Documentar cualquier cambio notable del sitio de medición incluyendo cambios sustanciales en el clima, ruido de fondo, o contaminación de la medición con otras fuentes de ruido.
	Calibrar el instrumento de medición nuevamente cuando la medición se prolonga. En intervalos de una hora.
REALIZAR EL CONTROL DESPUÉS DE LA MEDICIÓN	
	Medir y documentar el ruido de fondo.
	Medir y documentar la calibración.
	Documentar las condiciones del ambiente.
GUARDAR LA INFORMACIÓN	
	Guardar y descargar la información en un dispositivo externo.
	Hacer copias de seguridad correspondientes a la información recopilada, junto con las anotaciones adicionales realizadas, fecha y hora.

13. Anexo 2.

Informe de la medición.

La información que se presenta a continuación hace referencia a los resultados obtenidos durante las mediciones realizadas al nivel de ruido que genera el paso del tren de La Sabana a velocidad constante y en estado estacionario mediante la aplicación del protocolo propuesto en este proyecto de grado.

Informe de medición con el tren transitando a velocidad constante

1. Naturaleza de la medición: Lugar, fecha y hora de la medición.

-Lugar: Zona de parqueadero del Gimnasio Los Pinos. Calle 193 #9 – 20.

Las mediciones se realizaron en distintas fechas y horas del día debido al horario de funcionamiento del tren.

-La medición 1 se realizó cuando el tren transitaba en sentido sur – norte por la vía el miércoles 5 de octubre a las 6:44am.

-La medición 2 se realizó cuando el tren transitaba en sentido norte – sur por la vía el miércoles 5 de octubre a las 4:44pm

-La medición 3 se realizó una vez se tenía la simulación realizada para corroborar la información allí presentada y tuvo una duración de 1 hora de grabación el jueves 27 de octubre desde las 6:20am hasta las 7:20am. El tren transitó en sentido sur – norte.

2. Responsable de la realización y monitoreo de las mediciones.

-Todas las mediciones fueron realizadas y monitoreadas por el estudiante de ingeniería de sonido Andrés González Lozano.

3. Condiciones del entorno acústico.

-Las mediciones fueron realizadas en un entorno donde había contaminación del nivel de ruido de fondo a causa de tráfico rodado y de los transeúntes de la zona, sin embargo, se pudo apreciar que en el punto escogido el sonido podía propagarse tranquilamente en la distancia que hay entre la fuente y el instrumento de medición. Detrás del instrumento de medición había una distancia de mínimo tres veces la distancia de la fuente al punto, es decir, alrededor de 20m y con eso se pudo asegurar de no haber contaminación por parte de superficies reflejante que aumentaran el nivel de presión sonora registrado. La única salvedad ocurrió en el momento en que fueron utilizados los dos sonómetros en la medición realizada el día miércoles 5 de octubre en horas de la tarde ya que detrás del punto de medición del sonómetros Rion NA-27, se encontraban ubicados unos matorrales con una altura de aproximadamente 2m. Por otra parte, al costado oriental de la vía no se pudo posicionar el instrumento de medición ya que había la presencia de un muro de concreto que abarcaba la longitud del parqueadero del Gimnasio Los Pinos y cuya altura de 2m afectaba también el nivel de presión sonora registrado.

4. Condiciones medioambientales.

-Las condiciones del medio ambiente fueron favorables durante el proceso de las mediciones al nivel de ruido que genera el tren ya que nunca se dañaron ni se detuvieron las mediciones por causa de lluvia y con esto la vía siempre se mantuvo seca. Los datos registrados de las condiciones atmosféricas en cada uno de los casos se presentan a continuación:

-Medición 1.

Temperatura: 11°C

Velocidad del viento: 0.9m/s en sentido sudeste.

Humedad relativa: 65%

Presión barométrica: 0,74 Bar (741.9 mBar)

-Medición 2.

Temperatura: 16°C

Velocidad del viento: 0.9m/s en sentido norte.

Humedad relativa: 65%

Presión barométrica: 0,73 Bar (737.9 mBar)

-Medición 3.

Temperatura: 10°C

Velocidad del viento: 0.9m/s en sentido Oeste.

Humedad relativa: 97%

Presión barométrica: 0,73 Bar (739.9 mBar)

5. Condiciones de la vía.

-La vía férrea presenta un lecho de balasto, traviesas de madera y rieles en acero que se encuentran en buen estado y de forma constante a lo largo de la vía con excepción únicamente en los pasos de nivel presentados en cada intersección de la carrera 9, donde se encuentra el ferrocarril, con las principales calles de la ciudad que fueron construidos en concreto. Respecto a los sitios de medición, el paso del tren por la ubicación del punto del receptor cumple con los requisitos que sugiere el protocolo propuesto.

6. Instrumentos de medición utilizados para la medición con sus respectivos documentos de certificación que los clasifica en Clase 1.

-Los instrumentos de medición utilizados cumplen con las certificaciones de clase 1.

Se hizo uso de dos sonómetros que facilitó la Universidad de San Buenaventura de Bogotá. El Brüel 2250 y el Rion NA-27. Las Figuras 30 y 31 son las especificaciones técnicas de parte de los fabricantes de los sonómetros indicando que son clase 1.

FIGURA 30. ESPECIFICACIONES DEL SONÓMETRO BRÜEL 2250 POR PARTE DEL FABRICANTE INDICANDO QUE ES UN SONÓMETRO DE CLASE 1.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Analizadores portátiles Tipo 2250 y 2270

Los analizadores Tipo 2250 y 2270 son unos innovadores analizadores portátiles de Brüel & Kjær. La filosofía de diseño sencilla, segura e inteligente de los analizadores se basa en una investigación exhaustiva. El Tipo 2250 ha sido galardonado con varios premios por su excelente ergonomía y su diseño.

Ambos analizadores pueden alojar varias aplicaciones, entre las que se incluyen, el análisis de frecuencia, el registro de datos, TRF, la acústica de edificios y la grabación de señales. Además, el analizador Tipo 2270 permite realizar mediciones de forma simultánea con dos micrófonos, dos acelerómetros o con un micrófono y un acelerómetro (requiere la Opción de 2 canales). Todos los módulos de aplicación se pueden pedir como parte de instrumento completamente preconfigurado o por separado en cualquier momento, en función de las necesidades.

La combinación de los módulos de aplicación con el hardware innovador convierte a estos analizadores en soluciones especializadas para tareas de medición de alta precisión, en entornos y áreas ocupacionales e industriales. Junto con la aplicación de campo de Measurement Partner, la compatibilidad con MP Cloud, y Measurement Partner Suite, que permite el postprocesamiento, estos módulos ofrecen una solución completa capaz de abordar todas sus necesidades de mediciones.



Usos y características

Usos

- Mediciones del sonido de Clase 1 de acuerdo con las normas internacionales más recientes
- Evaluación del ruido ambiental y de tonos (1/3 de octava y FFT)
- Mediciones del nivel de volumen de ruido
- Evaluación del ruido en puestos de trabajo
- Mediciones del tiempo de reverberación (consulte BP 2177)
- Acústica de edificios (consulte BP 2194)
- Control de calidad de productos (consulte BP 2456)
- Identificación de fuentes de ruido mediante la intensidad sonora (consulte BP 2476)*
- Calibración de audiómetros
- Análisis en tiempo real en bandas de 1/1 y 1/3 de octava
- Análisis de perfiles de registros para parámetros de banda ancha y espectros
- Vibración de edificios de baja frecuencia según las normas ISO 8041:05 y DIN 45669 – 1:2010 – 09
- Mediciones de infrasonido (ponderación G) según las normas ISO 7196:1995 y ANSI S1.42 – 2001 (R2011)

Características

- Hardware:
 - Opción de medición de 2 canales que admite cualquier combinación de micrófonos y acelerómetros*
 - Pantalla táctil de color, de gran tamaño y alta resolución
 - Comunicación mediante USB, LAN y opciones para la comunicación Wi-Fi o 4G
 - Cámara digital integrada para documentación y referencia*
 - Detección y corrección automática de la pantalla antivibración
 - Sólido y hermético (IP 44)
- Software:
 - Rango dinámico superior a 123 dB(A)
 - Rango de frecuencia lineal entre 0,5 Hz y 20 kHz
 - Configuración personalizada de la medida, la pantalla y el trabajo
 - Indicadores de calidad con consejos y advertencias
 - Temporizadores para el inicio automático de la medición
 - Measurement Partner Cloud (MP Cloud)
 - Aplicación de campo (Field App) de Measurement Partner
 - Measurement Partner Suite para un postprocesamiento completo
 - Almacenamiento de coordenadas GPS con los datos de medición
 - Adquisición simultánea de datos meteorológicos y de ruido
 - Grabación en 24 o 16 bits durante todas las fases de la medición

* Solo para el Tipo 2270.



FIGURA 31. ESPECIFICACIONES DEL SONÓMETRO RION NA-27 POR PARTE DEL FABRICANTE INDICANDO QUE ES UN SONÓMETRO DE CLASE 1.

Specifications

Applicable standards
IEC 61672-1: 2002 Class 1, IEC 60804: 2000 Type 1, IEC 61280: 1995 Class 1, IEC 60651: 1979 Type 1, ANSI S1.11 Type 1D, JIS C 1513: 2002 Class 1, JIS C 1514: 2002 Class 1, JIS C 1505-1988

Microphone and preamplifier
1/2-inch prepoliarized condenser microphone UC-53A and preamplifier NH-20

Dual Measurement and real-time frequency analysis
Main and sub
Individual frequency weighting and time weighting settings are possible for main and sub channels.
1/1, or 1/3 octave band real-time frequency analysis capability in main channel

Measurement functions
Instantaneous sound pressure level (L_i)
Equivalent continuous sound pressure level (L_{eq})
Sound exposure level (L_s)
Maximum and minimum sound pressure level (L_{max} and L_{min})
Percentile sound pressure level (5 values selectable from L₁, L₅, L₅₀, L₅₀, L₉₅, L₉₉)
Takt-max sound pressure level (L_{max}, L_{max})*
Waveform peak hold (L_{max})*
*sub channel only

Measurement time (except for instantaneous sound pressure level L_i)
Presetting from 1 to 99 (Units: h, m, s)
Manual measurement by start and stop (max. 99 h)
L_i requires more than 10 s setting.

Max. measurement level
140 dB rms, 133 dB at c1.3, 143 dB peak for peak hold

Noise floor
Typical 17 dB (A) rms

Frequency range
20 to 12 500 Hz (including microphone)
10 to 20 000 Hz (electrical characteristics)

Frequency weighting
A, C, Flat (main and sub channels)

Time weighting
Main channel: Fast, Slow, 35 ms, 10 ms
Sub channel: Fast, Slow, 35 ms, 10 ms, Impulse, Peak hold

Display
Backlit LCD panel (192X192 dots)
Sound level meter display
Numerical: 4 digits, update cycle 1 s, resolution 0.1 dB
Bar graph*: Scale range 60 dB in 0.5-dB steps, update cycle 0.1 s
Analyzer display
Numerical: 4 digits, update cycle 1 s, resolution 0.1 dB
Bar graph*: Scale range 70 dB in 0.5-dB steps, update cycle 0.1 s
Level-time: Min. 140 address, Max. all address
*main channel only
Real time clock: Year, Month, Day, Hour, Minute, Second

Level range
Sound level meter mode (Display range: 60 dB)
7 ranges in 10-dB steps: 20 to 80, 30 to 90, 40 to 100, 50 to 110, 60 to 120, 70 to 130, 80 to 140 dB

Analyzer mode (Display range: 70 dB)
7 ranges in 10-dB steps: 10 to 80, 20 to 90, 30 to 100, 40 to 110, 50 to 120, 60 to 130, 70 to 140 dB

Memory
Manual and auto store modes for instantaneous values and processing results
1 block for manual store mode, 2 block for auto store mode
Manual: all measurement data to be stored
Capacity: 200 data
Auto:
Single store: Selected data to be stored continuously
Capacity: 10 000 data (sound level meter mode)
4 000 data (1/1 oct. analysis)
2 000 data (1/3 oct. analysis)
Group store: All measurement data to be stored continuously
Capacity: 200 group data

Trigger function
Trigger source: Input signal, External signal, Time data

Time delay function
Processing start can be delayed by 1 to 10 s

Pause function
Normal pause function and back-erase function to delete data acquired 1 to 5 s before

Remote control
Remote control by an infrared rays controller (NA27RC1)

Printout function (Optional printer DPU-414, CP-10, CP-11)
Single mode: One current data on screen or one data stored on memory
Successive mode: Successive data at designated address area

Signal output
AC output (for main and sub channels)
DC output (for one channel only, selected by menu)
External trigger input
Serial Interface: RS-232-C, 9 pin D-sub
Infrared rays remote control: Max. 3 m

Power requirements
4 to 6 V DC, approx. 310 mA (at 5 V, 1/3 oct analysis mode, 20 °C)
Battery: Four IEC R14P (size "C") batteries
Life: Approx. 8 h (alkaline batteries, continuous operation, 1/3 oct. analysis)
AC adapter: AC adapter NC-94A, 100 to 240 V (option)

Ambient conditions for operation
-10 to +50 °C, 30 to 90 % RH

Dimensions, weight
Approx. 30 (H) × 10 (W) × 5 (D) cm, approx. 800 g (including batteries)

Supplied accessories
Windscreen × 1, Carrying case × 1, Tripod adapter × 1, IEC R6 batteries × 4, Lithium battery CR-13N × 1
Remote controller × 1, Miniature screwdriver × 1
Instruction manual × 1

Specifications subject to change without notice.

Distributed by:

RION CO., LTD.
20-41, Higashimotomachi 3-chome, Kokubunji, Tokyo 185-8533, Japan
Telephone: +81-42-359-7888 Fax: +81-42-359-7442
URL: http://www.rion.co.jp/english/

7. Presencia de ruidos externos durante la medición.

-Durante las mediciones hubo presencia de fuentes externas que no pueden ser controladas como los son el tráfico rodado y los transeúntes de la zona.

8. Cantidades medidas junto con sus niveles de ruido adquiridos e incertidumbres de la medición.

-De acuerdo al protocolo de medición, se emplearon los criterios de Nivel de Presión Sonora Equivalente $L_{Aeq,T}$. Donde T, es el tiempo de paso total del tren por el punto de medición. Y el Nivel de Presión Sonora Máximo $L_{AMáx}$.

-Medición 1.

Rion NA-27.

$$L_{Aeq,T} = 49,2 \text{ dB[A]}; T=12,58\text{s}$$

$$L_{AMáx} = 77,9 \text{ dB[A]}.$$

Incertidumbres.

La incertidumbre típica combinada es:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(x_i)} = 1,02 \text{ dB}$$

La incertidumbre ampliada a $k=2$ es

$$U = 2u_c(y) = 2,04 \text{ dB}$$

-Medición 2.

Rion NA-27.

$$L_{Aeq,T} = 71,1 \text{ dB[A]}; T = 40,13\text{s}$$

$$L_{AMáx} = 103 \text{ dB [A]}.$$

Incertidumbres.

La incertidumbre típica combinada es:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(x_i)} = 1,02 \text{ dB}$$

La incertidumbre ampliada a $k=2$ es

$$U = 2u_c(y) = 2,04 \text{ dB}$$

Brüel 2250.

$$L_{Aeq,T} = 68,1 \text{ dB[A]}; T = 33\text{s}.$$

$$L_{AMáx} = 106,4 \text{ dB[A]}.$$

-Medición 3.

No se realizó cálculo de la incertidumbre porque fue una medición de ruido considerado igual al ruido de fondo.

Brüel 2250.

$$L_{Aeq,T} = 62,9 \text{ dB[A]}; T = 1 \text{ hora}.$$

$$L_{AMáx} = 102,7 \text{ dB[A]}.$$

9. Cualquier otra información relevante acerca del sitio de medición y de las fuentes de ruido que se encuentren presentes durante la medición.

-Una de las fuentes adicionales que estuvieron presentes durante y sobre las cuales no pudo haber control fueron las personas que transitaban cerca al sitio de la medición junto al tráfico pertinente del sector. En ciertos momentos su presencia fue constante y en cuanto a los transeúntes del lugar fue también de manera intermitente.

Informe de medición con el tren en estado estacionario.**1. Naturaleza de la medición: Lugar, fecha y hora de la medición.**

-Lugar: Carrera 9 #171.

La medición se realizó cuando el tren iba en sentido sur – norte por la vía el martes 4 de octubre a las 6:40am realizando la actividad de recoger pasajeros.

2. Responsable de la realización y monitoreo de las mediciones.

-Todas las mediciones fueron realizadas y monitoreadas por el estudiante de ingeniería de sonido Andrés González Lozano.

3. Condiciones del entorno acústico.

-La medición fue realizada en el sitio escogido debido a que cumple con las características acústicas de libre propagación del sonido necesarias al costado oriental del tren porque en el costado occidental de la vía hay presencia de un obstáculo cuya distancia al eje de la vía interfiere en la trayectoria del sonido directo con el punto de medición y aunque no se puede asegurar que no hayan reflexiones por parte de las personas que esperan para abordar, se continuó con el procedimiento de medición. (Ver Figura 16 dentro del documento).

4. Condiciones medioambientales.

-Las condiciones del medio ambiente fueron favorables durante el proceso de medición. No hubo lluvia y con esto la vía se mantuvo seca. Los datos registrados de las condiciones atmosféricas se presentan a continuación:

Temperatura: 12°C

Velocidad del viento: 0.9m/s en sentido sudeste.

Humedad relativa: 60%

Presión barométrica: 0,73 Bar (733.9 mBar)

5. Condiciones de la vía.

-La vía férrea presenta un lecho de balasto, traviesas de madera y rieles en acero que se encuentran en buen estado y de forma constante a lo largo de la vía con excepción únicamente en los pasos de nivel presentados en cada intersección de la carrera 9, donde se encuentra el ferrocarril, con las principales calles de la ciudad que fueron construidos en concreto. Respecto a los sitios de medición, el paso del tren por la ubicación del punto del receptor cumple con los requisitos que sugiere el protocolo propuesto.

6. Instrumentos de medición utilizados para la medición con sus respectivos documentos de certificación que los clasifica en Clase 1.

-Los instrumentos de medición utilizados cumplen con las certificaciones de clase 1. Se hizo uso de dos sonómetros que facilitó la Universidad de San Buenaventura de Bogotá. El Brüel 2250 y el Rion NA-27. Las Figuras 31 y 32 son las especificaciones técnicas de parte de los fabricantes de los sonómetros indicando que son clase 1.

FIGURA 32. ESPECIFICACIONES DEL SONÓMETRO BRÜEL 2250 POR PARTE DEL FABRICANTE INDICANDO QUE ES UN SONÓMETRO DE CLASE 1.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Analizadores portátiles Tipo 2250 y 2270

Los analizadores Tipo 2250 y 2270 son unos innovadores analizadores portátiles de Brüel & Kjær. La filosofía de diseño sencilla, segura e inteligente de los analizadores se basa en una investigación exhaustiva. El Tipo 2250 ha sido galardonado con varios premios por su excelente ergonomía y su diseño.

Ambos analizadores pueden alojar varias aplicaciones, entre las que se incluyen, el análisis de frecuencia, el registro de datos, TRF, la acústica de edificios y la grabación de señales. Además, el analizador Tipo 2270 permite realizar mediciones de forma simultánea con dos micrófonos, dos acelerómetros o con un micrófono y un acelerómetro (requiere la Opción de 2 canales). Todos los módulos de aplicación se pueden pedir como parte de instrumento completamente preconfigurado o por separado en cualquier momento, en función de las necesidades.

La combinación de los módulos de aplicación con el hardware innovador convierte a estos analizadores en soluciones especializadas para tareas de medición de alta precisión, en entornos y áreas ocupacionales e industriales. Junto con la aplicación de campo de Measurement Partner, la compatibilidad con MP Cloud, y Measurement Partner Suite, que permite el postprocesamiento, estos módulos ofrecen una solución completa capaz de abordar todas sus necesidades de mediciones.

Usos y características

Usos

- Mediciones del sonido de Clase 1 de acuerdo con las normas internacionales más recientes
- Evaluación del ruido ambiental y de tonos (1/3 de octava y FFT)
- Mediciones del nivel de volumen y de ruido
- Evaluación del ruido en puestos de trabajo
- Mediciones del tiempo de reverberación (consulte BP 2177)
- Acústica de edificios (consulte BP 2194)
- Control de calidad de productos (consulte BP 2456)
- Identificación de fuentes de ruido mediante la intensidad sonora (consulte BP 2476)*
- Calibración de audiómetros
- Análisis en tiempo real en bandas de 1/1 y 1/3 de octava
- Análisis de perfiles de registros para parámetros de banda ancha y espectros
- Vibración de edificios de baja frecuencia según las normas ISO 8041:05 y DIN 45669 – 1:2010 – 09
- Mediciones de infrasonido (ponderación G) según las normas ISO 7196:1995 y ANSI S1.42 – 2001 (R2011)

* Solo para el Tipo 2270.



Características

- Hardware:
 - Opción de medición de 2 canales que admite cualquier combinación de micrófonos y acelerómetros*
 - Pantalla táctil de color, de gran tamaño y alta resolución
 - Comunicación mediante USB, LAN, y opciones para la comunicación Wi-Fi o 4G
 - Cámara digital integrada para documentación y referencia*
 - Detección y corrección automática de la pantalla antivibración
 - Sólido y hermético (IP 44)
- Software:
 - Rango dinámico superior a 123 dB(A)
 - Rango de frecuencia lineal entre 0,5 Hz y 20 kHz
 - Configuración personalizada de la medida, la pantalla y el trabajo
 - Indicadores de calidad con consejos y advertencias
 - Temporizadores para el inicio automático de la medición
 - Measurement Partner Cloud (MP Cloud)
 - Aplicación de campo (Field App) de Measurement Partner
 - Measurement Partner Suite para un postprocesamiento completo
 - Almacenamiento de coordenadas GPS con los datos de medición
 - Adquisición simultánea de datos meteorológicos y de ruido
 - Grabación en 24 o 16 bits durante todas las fases de la medición

Brüel & Kjær

FIGURA 33. ESPECIFICACIONES DEL SONÓMETRO RION NA-27 POR PARTE DEL FABRICANTE INDICANDO QUE ES UN SONÓMETRO DE CLASE 1.

Specifications

Applicable standards IEC 61672-1:2002 Class 1, IEC 60804:2000 Type 1, IEC 61260:1998 Class 1, IEC 60551:1979 Type 1, ANSI S1.11 Type 1D, JIS C 1513:2002 Class 1, JIS C 1514:2002 Class 1, JIS C 1505-1988	Analyzer mode (Display range: 70 dB) 7 ranges in 10-dB steps: 10 to 80, 20 to 90, 30 to 100, 40 to 110, 50 to 120, 60 to 130, 70 to 140 dB
Microphone and preamplifier 1/2-inch prepolarized condenser microphone UC-53A and preamplifier NH-20	Memory Manual and auto store modes for instantaneous values and processing results 1 block for manual store mode, 2 block for auto store mode Manual: all measurement data to be stored Capacity: 200 data Auto: Single store: Selected data to be stored continuously Capacity: 10 000 data (sound level meter mode) 4 000 data (1/1 oct. analysis) 2 000 data (1/3 oct. analysis) Group store: All measurement data to be stored continuously Capacity: 200 group data
Dual Measurement and real-time frequency analysis Main and sub Individual frequency weighting and time weighting settings are possible for main and sub channels. 1/1, or 1/3 octave band real-time frequency analysis capability in main channel	Trigger function Trigger source: Input signal, External signal, Time data Time delay function Processing start can be delayed by 1 to 10 s Pause function Normal pause function and back-erase function to delete data acquired 1 to 5 s before
Measurement functions Instantaneous sound pressure level (L_p) Equivalent continuous sound pressure level (L_{eq}) Sound exposure level (L_{swe}) Maximum and minimum sound pressure level (L_{max} and L_{min}) Percentile sound pressure level (5 values selectable from L_1 , L_5 , L_{10} , L_{50} , L_{90} , L_{95}) Takt-max sound pressure level (L_{Takt} , L_{Takt}^*) Waveform peak hold (L_{peak}) *sub channel only	Remote control Remote control by an infrared rays controller (NA27RC1) Printout function (Optional printer DPU-414, CP-10, CP-11) Single mode: One current data on screen or one data stored on memory Successive mode: Successive data at designated address area Signal output AC output (for main and sub channels) DC output (for one channel only, selected by menu) External trigger input Serial Interface: RS-232-C, 9 pin D-sub Infrared rays remote control: Max. 3 m
Measurement time (except for instantaneous sound pressure level L_p) Presetting from 1 to 99 (units: h, m, s) Manual measurement by start and stop (max. 99 h) L_{swe} requires more than 10 s setting.	Power requirements 4 to 6 V DC, approx. 310 mA (at 5 V, 1/3 oct analysis mode, 20 °C) Battery: Four IEC R14P (size "C") batteries Life: Approx. 8 h (alkaline batteries, continuous operation, 1/3 oct. analysis) AC adapter: AC adapter NC-94A, 100 to 240 V (option)
Max. measurement level 140 dB rms, 133 dB at c.f.3, 143 dB peak for peak hold	Ambient conditions for operation -10 to +50 °C, 30 to 90 % RH Dimensions, weight Approx. 30 (H) × 10 (W) × 5 (D) cm, approx. 800 g (including batteries)
Noise floor Typical 17 dB (A) rms	Supplied accessories Windscreen × 1, Carrying case × 1, Tripod adapter × 1, IEC R6 batteries × 4, Lithium battery CR-13N × 1, Remote controller × 1, Miniature screwdriver × 1, Instruction manual × 1
Frequency range 20 to 12 000 Hz (including microphone) 10 to 20 000 Hz (electrical characteristics)	
Frequency weighting A, C, Flat (main and sub channels)	
Time weighting Main channel: Fast, Slow, 35 ms, 10 ms Sub channel: Fast, Slow, 35 ms, 10 ms, Impulse, Peak hold	
Display Backlit LCD panel (192 × 192 dots) Sound level meter display Numerical: 4 digits, update cycle 1 s, resolution 0.1 dB Bar graph*: Scale range 60 dB in 0.5-dB steps, update cycle 0.1 s Analyzer display Numerical: 4 digits, update cycle 1 s, resolution 0.1 dB Bar graph*: Scale range 70 dB in 0.5-dB steps, update cycle 0.1 s Level-time: Min. 140 address, Max. all address *main channel only Real time clock: Year, Month, Day, Hour, Minute, Second	
Level range Sound level meter mode (Display range: 60 dB) 7 ranges in 10-dB steps: 20 to 80, 30 to 90, 40 to 100, 50 to 110, 60 to 120, 70 to 130, 80 to 140 dB	

Specifications subject to change without notice.

RION CO., LTD.

20-41, Higashinomomachi 3-chome, Kokubunji, Tokyo 185-8533, Japan
 Telephone: +81-42-359-7888 Fax: +81-42-359-7442
 URL: http://www.rion.co.jp/english/

Distributed by:

7. Presencia de ruidos externos durante la medición.

-Durante las mediciones hubo alta presencia de transeúntes que actúan como fuentes externas que no pueden ser controladas.

8. Cantidades medidas junto con sus niveles de ruido adquiridos e incertidumbres de la medición.

-De acuerdo al protocolo de medición, se emplearon los criterios de Nivel de Presión Sonora Equivalente $L_{Aeq,T}$. Donde T, es el tiempo de paso total del tren por el punto de medición.

-Brüel 2250 – Ubicado frente a la locomotora.

$$L_{Aeq,T} = 40,3 \text{ dB[A]}; T=20\text{s}$$

Incertidumbres.

La incertidumbre típica combinada es:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(x_i)} = 1,02 \text{ dB}$$

La incertidumbre ampliada a $k=2$ es

$$U = 2u_c(y) = 2,04 \text{ dB}$$

-Rion NA-27 – Ubicado frente al segundo vagón.

$$L_{Aeq,T} = 41,2 \text{ dB [A]}; T=20\text{s}$$

Incertidumbres.

La incertidumbre típica combinada es:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(x_i)} = 1,02 \text{ dB}$$

La incertidumbre ampliada a $k=2$ es

$$U = 2u_c(y) = 2,04 \text{ dB}$$

9. Cualquier otra información relevante acerca del sitio de medición y de las fuentes de ruido que se encuentren presentes durante la medición.

-Una de las fuentes de ruido que más tuvo presencia durante la medición fueron las personas que esperaban al tren para abordar durante el tiempo en que se realizaron las mediciones y posiblemente son una fuente de ruido adicional.