

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

**Análisis del ruido producido por el paso de vehículos en carreteras de la Gran
Área Metropolitana de Costa Rica**

Trabajo Final de Graduación

para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Andrey Gerardo Segura Herrera

Director del proyecto: **Ing. José Pablo Aguiar Moya**

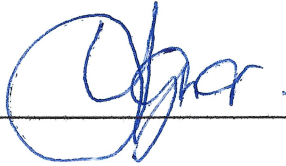
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio Brenes

San José, Costa Rica

4 de febrero del 2022

Aprobación

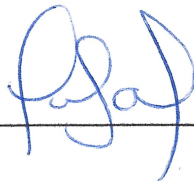
El presente Trabajo Final de Graduación titulado Análisis del ruido producido por el paso de vehículos en carreteras de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica, elaborado por el estudiante Andrey Gerardo Segura Herrera, fue aprobado el Tribunal Evaluador, conformado por:



Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD.
Director Trabajo Final de Graduación



Ing. Paola Vidal Rivera, Lcda.
Asesora Trabajo Final de Graduación



Ing. Luis Manuel Zamora González, Lic.
Asesor Trabajo Final de Graduación



Andrey Gerardo Segura Herrera
Autor

----- **PÁGINA EN BLANCO**-----

Derechos de Propiedad Intelectual

4 de febrero del 2022

El suscrito Andrey Gerardo Segura Herrera, cédula: 4 0230 0160, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, número de carné: B46614, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación denominado Análisis del ruido producido por el paso de vehículos en carreteras de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica, bajo la dirección del Ing. José Pablo Aguiar Moya, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.



Andrey Gerardo Segura Herrera

Proponente del Trabajo Final de Graduación

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

----- **PÁGINA EN BLANCO**-----

Dedicatoria

A mis padres y hermano, por apoyarme incondicionalmente para la consecución de esta meta y ser mi motivación para superarme.

----- **PÁGINA EN BLANCO**-----

Agradecimiento

A Dios principalmente, por ser quien me guía en la elaboración de esta investigación y acompañarme a lo largo de toda mi faceta estudiantil, especialmente en los momentos de debilidad y permitirme salir adelante.

A mis padres y abuelos, quienes desde pequeño me inculcaron valores, fueron mi principal sustento y siempre me apoyaron para conseguir mis metas.

A mi padre y hermano por la ayuda brindada a lo largo del proceso y que también formaron parte del equipo de investigación.

Al Comité Asesor, por su guía y disposición para el desarrollo de este Trabajo Final de Graduación.

Al personal de Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela de Ingeniería Civil, por toda la ayuda brindada.

----- **PÁGINA EN BLANCO**-----

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1.	Introducción	1
1.1	Justificación.....	1
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo general	3
1.2.2	Objetivos específicos	3
1.3	Delimitación del problema	5
1.3.1	Alcance	5
1.3.2	Limitaciones	6
1.4	Descripción de la metodología	7
1.5	Marco teórico	10
1.5.1	Ruido	10
1.5.2	Tipos de ruido.....	15
1.5.3	Regulación del ruido a nivel nacional e internacional	17
1.5.4	Índice de rugosidad internacional (IRI)	20
1.5.5	Modelos internacionales utilizados.....	22
1.5.5.1.	Noise Measurement Handbook, Estados Unidos	22
1.5.5.2.	Calculation of Road Traffic Noise, Inglaterra	26
1.5.5.3.	Modelo matemático para la medida de L_{eq} en zonas urbanas de Chile (Modelo Valdivia), Chile	30
Capítulo 2.	Evaluación de los modelos	33
2.1	Elección de modelo a recomendar.....	33

2.1.1	Elección de los modelos revisados y las variables a utilizar	33
2.1.2	Consideraciones a la hora de evaluar los modelos	37
2.1.2.1.	Noise Measurement Handbook, Estados Unidos	37
2.1.2.2.	Calculation of Road Traffic Noise, Inglaterra	38
2.1.2.3.	Modelo matemático para la medida de L_{eq} en zonas urbanas de Chile (Modelo Valdivia), Chile	38
2.1.3	Elección y descripción del equipo a utilizar	39
2.1.4	Definición de los tramos de estudio	40
2.2	Toma de datos experimentales	57
2.2.1	Datos obtenidos en el tramo 1 (Alajuela, El Coyol):	58
2.2.2	Datos obtenidos en el tramo 2 (La Unión, Cartago):	58
2.2.3	Datos obtenidos en el tramo 3 (Tibás, San José):	59
2.2.4	Datos obtenidos en el tramo 4 (Santo Domingo, Heredia):	60
2.2.5	Datos obtenidos en el tramo 5 (San Francisco, Heredia):	60
2.2.6	Datos obtenidos en el tramo 6 (Montes de Oca, San José):	61
Capítulo 3.	Análisis de resultados	63
3.1	Evaluación de los modelos con los datos experimentales	63
3.1.1	Modelado de ruido con FHWA	63
3.1.2	Modelado de ruido con CORTN	66
3.1.3	Modelado de ruido con Valdivia	67
3.2	Validación de cada modelo	67
3.3	Elección del modelo a utilizar	78

3.4	Efecto del IRI en el ruido producido en la carretera	82
Capítulo 4.	Conclusiones y recomendaciones.....	89
4.1	Conclusiones	89
4.2	Recomendaciones.....	92
	Referencias Bibliográficas.....	97
ANEXO I.....		I
ANEXO II.....		XXIX
ANEXO III		XXXV
ANEXO IV		XXXVII
ANEXO V		XLIII

----- **PÁGINA EN BLANCO**-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología propuesta para la realización del trabajo	7
Figura 2. Ponderación 'A' de acuerdo con el rango de frecuencias	12
Figura 3. Cálculo de nivel sonoro del punto 1 al 2	14
Figura 4. Escala estándar para la medición del IRI para diferentes carreteras según el Banco Mundial ...	21
Figura 5. Mapa de los cantones que conforman la GAM	41
Figura 6. Ubicación de los tramos por cantón.....	43
Figura 7. Puntos de referencia a la estación 1	44
Figura 8. Ubicación de la estación 1	45
Figura 9. Ubicación del equipo estación 1	45
Figura 10. Puntos de referencia a estación 2.....	46
Figura 11. Ubicación de la estación 2	47
Figura 12. Ubicación del equipo estación 2	47
Figura 13. Puntos de referencia a estación 3.....	48
Figura 14. Ubicación de la estación 3	49
Figura 15. Ubicación del equipo estación 3	49
Figura 16. Puntos de referencia a estación 4.....	50
Figura 17. Ubicación de la estación 4	51
Figura 18. Ubicación del equipo estación 4	51
Figura 19. Puntos de referencia a estación 5.....	52

Figura 20. Ubicación de la estación 5	53
Figura 21. Ubicación del equipo estación 5	53
Figura 22. Puntos de referencia a estación 6.....	54
Figura 23. Ubicación de la estación 6	55
Figura 24. Ubicación del equipo estación 6	55
Figura 25. Gráfico comparativo de los valores de campo.....	62
Figura 26. Comparación gráfica de los resultados obtenidos en campo y modelados L_{eq}	68
Figura 27. Comparación gráfica de resultados obtenidos en campo y modelado L_{10}	69
Figura 28. Relación lineal entre el nivel sonoro y el IRI.....	84
Figura 29. Fotografía de la ubicación de la estación 1	XXIX
Figura 30. Vista del tramo 1.....	XXIX
Figura 31. Vista del tramo 2.....	XXX
Figura 32. Flujo vehicular del tramo 2	XXX
Figura 33. Vista del tramo 3.....	XXXI
Figura 34. Ubicación del equipo en la estación 3	XXXI
Figura 35. Vista de la estación 4	XXXII
Figura 36. Vista del tramo 4.....	XXXII
Figura 37. Vista del tramo 5.....	XXXIII
Figura 38. Vista de la estación 5	XXXIII
Figura 39. Vista del tramo 6.....	XXXIV

Figura 40. Vista de la estación 6	XXXIV
---	-------

----- **PÁGINA EN BLANCO**-----

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Rango audible por el ser humano	10
Cuadro 2. Atenuación del sonido de acuerdo a su frecuencia	15
Cuadro 3. Límites de ruido para los Estados Unidos.....	17
Cuadro 4. Límites permitidos de ruido en el escape para Chile	18
Cuadro 5. Límites aplicables en la mufla para motocicletas en Chile	18
Cuadro 6. Niveles de ruido permitidos por el MOPT en la mufla	19
Cuadro 7. Límites permitidos por zona receptora Costa Rica para interiores	20
Cuadro 8. Corrección por pendiente	26
Cuadro 9. Elección de velocidad para el modelo	29
Cuadro 10. Resumen de los modelos de medición	36
Cuadro 11. Características de los sonómetros a utilizar	40
Cuadro 12. Características de los tramos	56
Cuadro 13. Características del sitio a la hora de medir en el tramo 1	58
Cuadro 14. Nivel sonoro equivalente por muestra en el tramo 1.....	58
Cuadro 15. Características del sitio a la hora de medir en el tramo 2	58
Cuadro 16. Nivel sonoro equivalente por muestra en el tramo 2.....	59
Cuadro 17. Características del sitio a la hora de medir en el tramo 3	59
Cuadro 18. Nivel sonoro equivalente por muestra en el tramo 3.....	59
Cuadro 19. Características del sitio a la hora de medir en el tramo 4	60

Cuadro 20. Nivel sonoro equivalente por muestra en el tramo 4.....	60
Cuadro 21. Características del sitio a la hora de medir en el tramo 5	60
Cuadro 22. Nivel sonoro equivalente por muestra en el tramo 5.....	61
Cuadro 23. Características del sitio a la hora de medir en el tramo 6	61
Cuadro 24. Nivel sonoro equivalente por muestra en el tramo 6.....	61
Cuadro 25. Resumen de los valores ponderados en campo	62
Cuadro 26. Variables a evaluar en el modelo para tramo 1	63
Cuadro 27. Evaluación del modelo FHWA para tramo 1	63
Cuadro 28. Variables a evaluar en el modelo para tramo 2	63
Cuadro 29. Evaluación del modelo FHWA para tramo 2	64
Cuadro 30. Variables a evaluar en el modelo para tramo 3	64
Cuadro 31. Evaluación del modelo FHWA para tramo 3	64
Cuadro 32. Variables a evaluar en el modelo para tramo 4	64
Cuadro 33. Evaluación del modelo FHWA para tramo 4	64
Cuadro 34. Variables a evaluar en el modelo para tramo 5	65
Cuadro 35. Evaluación del modelo FHWA para tramo 5	65
Cuadro 36. Variables a evaluar en el modelo para tramo 6	65
Cuadro 37. Evaluación del modelo FHWA para tramo 6	65
Cuadro 38. Resumen de los valores ponderados por tramo.....	65
Cuadro 39. Variables a evaluar en el modelo CORTN.....	66

Cuadro 40. Evaluación del modelo CORTN	66
Cuadro 41. Evaluación del modelo de Valdivia para el tramo 1	67
Cuadro 42. Resumen de los valores obtenidos en modelos y campo	68
Cuadro 43. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro digital para el tramo 1	70
Cuadro 44. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro analógico para el tramo 1	70
Cuadro 45. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro digital para el tramo 2	70
Cuadro 46. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro analógico para el tramo 2	71
Cuadro 47. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro digital para el tramo 3	71
Cuadro 48. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro analógico para el tramo 3	71
Cuadro 49. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro digital para el tramo 4	71
Cuadro 50. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro analógico para el tramo 4	72
Cuadro 51. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro digital para el tramo 5	72
Cuadro 52. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro analógico para el tramo 5	72
Cuadro 53. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro digital para el tramo 6	72
Cuadro 54. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro analógico para el tramo 6	73
Cuadro 55. Validación de cada modelo	73
Cuadro 56. Porcentajes de error para cada validación	74
Cuadro 57. Prueba estadística para los modelos	76
Cuadro 58. Comparación con límites establecidos en Costa Rica	76
Cuadro 59. Resumen de la validación de los modelos	80

Cuadro 60. Datos IRI para los tramos en estudio	83
Cuadro 61. Correlaciones entre variables para mediciones con sonómetro digital	85
Cuadro 62. Correlaciones entre variables para mediciones con el sonómetro analógico	85
Cuadro 63. Regresiones considerando las variables en estudio.....	87
Cuadro 64. Regresiones considerando las variables en estudio e intercepto cero.....	87
Cuadro 65. Estadísticos para la primera ecuación del Cuadro 65	88
Cuadro 65. Prueba de hipótesis para los modelos.....	88
Cuadro 67. Muestreo en el tramo 1	I
Cuadro 68. Muestreo en el tramo 2	VI
Cuadro 69. Muestreo en tramo 3.....	X
Cuadro 70. Muestreo en el tramo 4	XV
Cuadro 71. Muestreo en el tramo 5	XX
Cuadro 72. Muestreo en el tramo 6	XXV
Cuadro 73. Ejemplo de información del TPDA utilizado	XXXV
Cuadro 74. Prueba estadística para el tramo 1	XLIII
Cuadro 75. Prueba estadística para tramo 2.....	XLIII
Cuadro 76. Prueba estadística para tramo 3.....	XLIV
Cuadro 77. Prueba estadística para tramo 4.....	XLIV
Cuadro 78. Prueba estadística para tramo 5.....	XLV
Cuadro 79. Prueba estadística para tramo 6.....	XLV

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

dB_A: Decibeles ajustados con la ponderación 'A'.

GAM: Gran Área Metropolitana de Costa Rica.

IRI: Índice de Rugosidad Internacional

L_{eq}: Nivel sonoro equivalente.

L_{eq}: Nivel sonoro en el percentil 10.

MOPT: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

TPDA: Tráfico Promedio Diario Anual.

----- **PÁGINA EN BLANCO**-----

Segura Herrera, Andrey Gerardo
Análisis del ruido producido por el paso de vehículos en carreteras de la Gran Área
Metropolitana de Costa Rica
Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José, C.R.:
A. Segura H., 2022
xxvi, 100, [45]h; ils. col. – 35 refs.

RESUMEN

En Costa Rica, el ruido es un contaminante del que se tiene poco control en cuanto a carreteras se refiere, pues, de acuerdo con la revisión bibliográfica del presente informe, en el país no existe una regulación vigente que considere el ruido producido por el paso de vehículos, mucho menos un modelo definido que tome en cuenta el impacto ambiental del ruido a la hora de construir o ampliar una carretera. A diferencia del plano internacional, en países como Estados Unidos o Inglaterra, se encontraron modelos que predicen el ruido con base en la velocidad, flujo vehicular, pendiente, entre otros y cuentan con normativa que regula este contaminante.

Es por esto que, con el fin de dar el primer paso para contar con este tipo de reglamento, este proyecto relacionó los modelos internacionales de medición y predicción de ruido con la realidad que se presenta en Costa Rica, por medio de la recolección de datos en campo, tanto de niveles de ruido como de velocidades, pendiente y demás con el fin de poder comparar el nivel de ruido predicho por el modelo y el nivel de ruido real medido en la carretera.

Se evaluaron seis tramos repartidos en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica, considerando que sean secciones de carretera similares y que se puedan obtener los datos necesarios y se compararon los resultados obtenidos con las mediciones realizadas en campo, de los cuales el modelo de predicción inglés (llamado CORTN) es el que mejor se acopló a las mediciones reales en carretera. Además de esto, se buscó relacionar el IRI con el nivel de ruido de una carretera, para conocer si es un parámetro significativo a la hora de evaluar el ruido producido por el paso de vehículos, la cual no es significativa. Además, se obtuvo la significancia de cada variable en el modelo, de los cuales la pendiente fue la más significativa.

RUIDO EN CARRETERA, NORMATIVA SOBRE RUIDO, IRI, NIVEL DE RUIDO, MODELADO DE RUIDO, DISEÑO DE CARRETERAS

Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD.

Escuela de Ingeniería Civil

----- **PÁGINA EN BLANCO**-----

Segura Herrera, Andrey Gerardo

Analysis of the noise produced by the passage of vehicles on roads of the Great Area Metropolitan of Costa Rica

Graduation Project – Civil Engineering – San José, CR:

A. Segura H., 2022

xxvi, 100, [45]h; ils. col. – 35 references

RESUME

In Costa Rica, noise is a pollutant that has little control in terms of roads refers, therefore, according to the bibliographic review of this report, in the country there is a current regulation that considers the noise produced by the passage of vehicles, much least one defined model that takes into account the environmental impact of noise when build or widen a road. Unlike at the international level, in countries such as the United States United States or England, models were found that predict noise based on speed, vehicular flow, slope, among others and have regulations that regulate this pollutant.

This is why, in order to take the first step towards having this type of regulation, this project related the international noise measurement and prediction models with the reality that occurs in Costa Rica, through the collection of data in the roads, both from noise levels such as speeds, slope, vehicular flow and others in order to be able to compare the noise level predicted by the model and the actual noise level measured on the road.

Six stretches distributed in the Great Metropolitan Area of Costa Rica were evaluated, considering that they are similar road sections and that the necessary data can be obtained and compared the results obtained with measurements made in the roads, of which the English prediction model (called CORTN) is the one that best coupled to real measurements on the highways. In addition to this, it was sought to relate the IRI to the noise level of a road, to know if it is a significant parameter when evaluating the noise produced by the passage of vehicles, which is not significant. In addition, the significance of each variable was obtained in the model, of which the slope was the one that showed it the most.

ROAD NOISE, NOISE REGULATIONS, IRI, NOISE LEVEL, NOISE MODELING, ROAD DESIGN

Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD.

School of Civil Engineering

----- **PÁGINA EN BLANCO**-----

Prólogo

Los medios de transporte son una parte muy importante en el quehacer humano, en términos económicos, sociales, desarrollo, entre otros, dado que por medio de estos es que se puede viajar de un punto "A" a un punto "B" con mayor facilidad. A través de los años, el avance tecnológico permite tener cada vez más y mejores condiciones de transportes, de lo que no escapa la flota vehicular de un país o región geográfica.

En algunas ocasiones, este avance conlleva una serie de consecuencias positivas y negativas tanto para el ambiente como para el propio ser humano. Entre los efectos negativos podemos encontrar los niveles de contaminación, la destrucción del ambiente original, que genera problemas a las especies que tienen su hogar cerca de estos proyectos de desarrollo. Entre los factores contaminantes están el humo de los vehículos, la incorrecta disposición de los desechos de piezas vehiculares, el ruido producido por los motores y por el paso de las máquinas sobre el asfalto, entre otros.

Este último es un factor, que a diferencia de los otros dos planteados, tiene menos regulación, al menos en el caso de Costa Rica, pues no se tiene contemplado como un contaminante grave, a pesar de que se ha comprobado que las afectaciones a la salud y bienestar son importantes.

Para lograr el entendimiento de ciertos fenómenos, es necesario conocer los factores que lo producen o pueden producirlo, por ejemplo, la rugosidad de la carretera, la velocidad de los vehículos, el tipo de pavimento, la composición de la flota, entre otros. En nuestro país es muy utilizado el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) para medir la rugosidad, por lo que se tomó en cuenta este parámetro para obtener una correlación entre este y el ruido.

Este trabajo pretende sentar las bases para que se tenga en cuenta el factor ruido en una carretera, tanto en normativa, diseños y contaminación, con ayuda de

investigaciones extranjeras que se puedan implementar en nuestro medio y correlacionar los diferentes factores en carretera con el ruido producido por el paso de automotores.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Justificación

Actualmente, en Costa Rica se quiere dejar atrás el estereotipo de “país en vías de desarrollo” y proponernos nuevas y mejores metas para seguir avanzando y así lograr ser más atractivos a nivel internacional y para los inversores extranjeros. Por esta razón, se debe buscar estar al día en cuanto a los avances sociales, tecnológicos y económicos que se dan a nivel internacional.

Entre los avances importantes para poder desarrollarse como país es tener una infraestructura vial en excelente condición y bien diseñada, no solamente la parte del pavimento y que se cumpla la vida útil de la carretera, sino también todos los aspectos que se involucran en la construcción de ellas. Entre estos factores está el impacto ambiental que produce el ruido debido a la circulación de vehículos, el cual se debe disminuir al máximo posible para evitar traer problemas de salud a la población circundante a la obra.

Sin embargo, existe una problemática actualmente que no se puede dejar pasar por alto y es que en nuestro país no existe una normativa vigente y oficial que indique cómo se debe medir el ruido producido por los vehículos y los diferentes actores que pasan por la carretera. De acuerdo con lo consultado en la página web de INTECO (INTECO, 2020), no hay referencia de la existencia de un modelo que identifique cuáles son los factores que inciden mayormente en el ruido; por lo que es importante el establecimiento de un nivel de ruido máximo regulado para lo que son las carreteras y autovías.

Por lo anterior, esta investigación buscó, por medio de la revisión de modelos utilizados alrededor del mundo, principalmente Norteamérica, Latinoamérica y Europa, llevar a cabo una recopilación de métodos utilizados en estas zonas, con el fin de implementarlos en Costa Rica, analizarlos y proponer un modelo que se ajuste a la realidad de nuestro país, por medio de la validación y comprobación de los instrumentos seleccionados.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Formular un modelo de medición de ruido estándar para carreteras basado en la evaluación de normativa nacional e internacional aplicable en Costa Rica.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar los modelos internacionales, por medio de la revisión bibliográfica de cada uno de ellos, para determinar si es aplicable a la evaluación del ruido en Costa Rica.
- Caracterizar los niveles de ruido producidos por el tránsito vehicular en carreteras del Gran Área Metropolitana de Costa Rica por medio de mediciones de campo con los modelos propuestos en la normativa.
- Distinguir las variables que inciden en el nivel de ruido por medio de la revisión de los manuales y concluir si están contempladas en las distintas correcciones en el modelado.
- Definir la importancia y el impacto que tiene el Índice de Rugosidad Internacional sobre los niveles de ruido, por medio de la evaluación estadística entre los valores de ruido y de este parámetro, para conocer su significancia.
- Interpretar los datos obtenidos en las mediciones de ruido para llevar a cabo una comparación entre cada modelo evaluado para determinar su validez.

- Proponer un modelo acoplado a Costa Rica con base en normativa analizada y validada por medio de mediciones, ya sea tomada de una ya existente o plantear un híbrido entre dos o más modelos.

1.3 Delimitación del problema

1.3.1 Alcance

El desarrollo del proyecto se enfocó en las carreteras del GAM únicamente, específicamente 6 puntos ubicados dentro de la GAM (uno en Alajuela, dos en Heredia, dos en San José y uno en Cartago). Se consideraron las características que estas presenten en el año 2021, generando indicadores cuantitativos de ruido producido por el tránsito vehicular. Además, se contemplaron diferentes actores que se presentaron en los puntos de medición, los cuales fueron caracterizados por medio de los modelos estudiados en la revisión bibliográfica previa.

Se obtuvieron los resultados con base en visitas de campo a los puntos de medición, evaluando aspectos como la ubicación, importancia de la vía, tráfico promedio diario u indicador similar, por medio de informes producidos por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme), específicamente la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional, así como los Anuarios de Información de Tránsito elaborados por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT).

Una vez obtenidos estos resultados, se procedió a evaluar la validez de cada uno de los modelos utilizados y por medio de indicadores estadísticos se decidió cuál de los modelos se ajustó mejor a lo que tenemos en Costa Rica, o si es recomendable hacer una combinación de dos para generar un modelo híbrido que se acople lo mejor posible con la realidad.

1.3.2 Limitaciones

Algunas de las limitaciones que afectaron el desarrollo este proyecto son las siguientes:

- Solamente se contó con datos correspondientes a carreteras de la GAM en el año 2021, por lo que no se podrá saber con certeza si los resultados obtenidos serán los mismos a futuro, dado que en una ventana de tiempo pueden cambiar las condiciones de la carretera y del sitio de medición en sí.
- La caracterización por ruido, producido por el tránsito vehicular, se realizó de manera puntual, fija y con el equipo disponible en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.
- La emergencia nacional por la pandemia causada por el COVID-19 trajo consecuencias principalmente en los tiempos propuestos para trabajar, dado que se requirió de más tiempo para poder planificar los viajes a campo para realizar las mediciones, pues la movilidad se vio afectada por las restricciones vehiculares sanitarias con el vehículo personal, que no solo influyó en esto, sino también en la reducción de vehículos en las carreteras
- Las condiciones climáticas a la hora de realizar las mediciones fueron un factor que influyó en el desarrollo del cronograma de actividades, pues se tenía planeado muestrear en dos sitios diferentes por día, situación que no se pudo cumplir debido principalmente a las lluvias.

1.4 Descripción de la metodología

La metodología que se implementó para la elaboración del proyecto se muestra en la Figura 1.

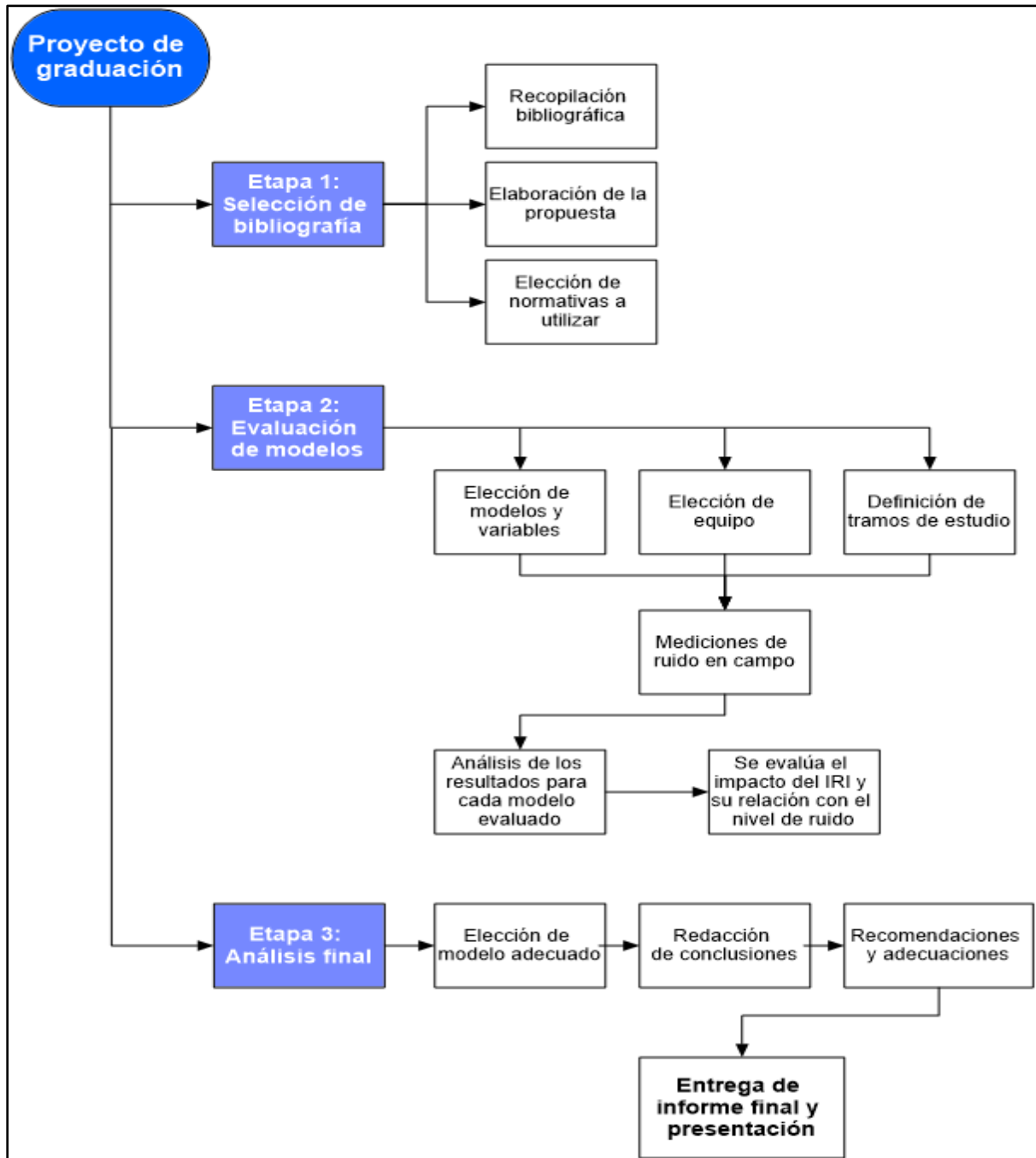


Figura 1. Metodología propuesta para la realización del trabajo

Etapas 1:

- Recopilación bibliográfica: Definición de la bibliografía utilizada en el trabajo, por medio de revisión de la normativa nacional e internacional existente para la medición de ruido en carreteras, así como estudios de impacto ambiental para conocer si existe este tipo de modelado en Costa Rica.
- Redacción de los objetivos, alcance, limitaciones y aspectos a considerados en el proyecto, así como un marco teórico que sustente los conceptos a investigar.
- Elección de la normativa a utilizar y se descartó parte de ella o que esté fuera del alcance, así también con las fuentes de consulta, tales como estudios previos, evaluación de modelos, estudios de impacto ambiental, entre otros.

Etapas 2:

- Elección de los modelos evaluados en el entorno de la GAM y que fueron utilizados para el análisis final.
- Selección del equipo utilizado (sonómetros, trípodes, entre otros) y se presentaron los permisos correspondientes o las solicitudes de préstamo de equipo, tanto al Laboratorio de Ingeniería Ambiental como a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.
- Estudio y definición de los tramos de carretera sujetos al estudio, tomando en cuenta factores como movilización del equipo/personal a cargo, clima del lugar, posibilidad real de realizar la medición y tránsito en el sitio, de los cuales se descartaron varios por falta de alguno de los factores mencionados.
- Verificación de los sitios elegidos para realizar las mediciones de sonido con el equipo disponible y debidamente calibrado. Se recolectan los datos en el sitio para su posterior procesamiento. Varios de los puntos se debieron cambiar debido a que no se contaba con espacio, tiempo ni condiciones para realizar las mediciones de la mejor manera posible.

- Recolección de la información del IRI en los tramos seleccionados para el estudio.
- Se analizaron los datos recolectados y se evaluaron en los modelos que se eligieron anteriormente, para así comparar los datos de campo con los resultados del modelo y deducir su validación.
- Evaluación del impacto del Índice de Rugosidad Internacional en los niveles de ruido, por medio de la valoración de una comparación mediante el calibrado del modelo de ruido vs IRI.

Etapas 3:

- Una vez evaluados todos los modelos y validados estadísticamente, se procedió a elegir el modelo que mejor se ajustó a la realidad del país. Como uno de los modelos elegidos arrojó resultados satisfactorios, no fue necesario realizar el hipotético modelo híbrido y se recomendó la implementación del modelo validado.
- Análisis final de los resultados obtenidos, así como la redacción y exposición de los resultados obtenidos por medio de las conclusiones, recomendaciones y adecuaciones con las que debe contar el modelo definitivo.
- Entrega del informe, en forma física y digital, al Comité Evaluador, se defendió públicamente y se entrega una copia a las unidades académicas implicadas en el estudio, así como al Sistema de Bibliotecas, Documentación e Información de la Universidad de Costa Rica.

1.5 Marco teórico

Los conceptos involucrados en este trabajo, se describen a detalle para una mejor comprensión al estudiar el documento.

1.5.1 Ruido

El sonido es la propagación de una onda mecánica a través de algún medio (aire, agua, entre otros) que se genera por un cambio de presiones en la superficie o elemento que lo produce, conocido como emisor. Estas ondas llegan ya sea a órganos auditivos (seres vivos) o máquinas que se construyen con este fin (sonómetros).

Existen tres características que distinguen los sonidos (Soporte multimedia, 2020): timbre, altura e intensidad. De estas tres, las dos últimas son medibles, las cuales se describen a continuación:

- La altura nos permite definir si un sonido es agudo o grave, se mide en Hertz.
- La intensidad nos permite definir “qué tan fuerte” es un sonido y se mide en decibelios.

El oído humano saludable es capaz de escuchar frecuencias desde los 20 Hz hasta los 20 000 Hz. (Observatorio de la Sostenibilidad en España, 2008).

Cuadro 1. Rango audible por el ser humano

Frecuencia	Rango audible	Tono
Menor a 20 Hz	Infrasónico	
20 Hz a 400 Hz	Audible	Grave
400 Hz a 1 600 Hz		Medio
1 600 Hz a 20 000 Hz		Agudo
Mayor a 20 000 Hz	Ultrasónico	

Fuente: Calidad del Aire en las Ciudades, Clave de la Sostenibilidad Urbana, 2008

Tomado de Sandoval, 2020

Para medir la intensidad, se registra el cambio de presión producido por la onda. Al ser una presión, las unidades son Pascales (Pa). El oído humano es capaz de percibir cambios desde los 20 mPa hasta los 20 Pa. Sin embargo, al ser esta escala demasiado grande, se decide crear una escala logarítmica que permite caracterizar la intensidad de una manera menos amplia y más sencilla. Es acá donde nace lo que conocemos como decibelios (dB). Es una escala logarítmica, la cual se calcula como $dB=20\log\left(\frac{P}{P_{ref}}\right)$ donde P es la presión sonora en el momento y P_{ref} es la presión de referencia (Soporte multimedia, 2020).

Cada fuente de sonido produce su propia onda, por lo que un receptor puede recibir el impacto de varias ondas a la vez, las cuales se superponen a la hora de escuchar el sonido. Pero, al ser una escala logarítmica, no se puede sumar linealmente, es decir, si una fuente produce 70 dB y otra fuente produce 60 dB, la suma no es 130 dB, sino que se debe descomponer la escala para sumar las intensidades. Un ejemplo se muestra a continuación (Sansgundo, s.f.):

$$60 \text{ dB} = 10\log(P_{60}/P_{ref}) \Rightarrow (P_{60}/P_{ref}) = 10^6$$

$$70 \text{ dB} = 10\log(P_{70}/P_{ref}) \Rightarrow (P_{70}/P_{ref}) = 10^7$$

$$\therefore 70 \text{ dB} + 60 \text{ dB} = 10\log(10^7 + 10^6) = 70.4 \text{ dB}$$

En donde P_{60} y P_{70} son la presión generada en los 60 y 70 decibelios respectivamente.

Como los decibelios no se miden en una escala lineal, no se puede ponderar o promediar de manera directa. Es por esto que es necesario definir un sistema de ponderación que tome en cuenta todo el rango auditivo. Para ello, existe la ponderación 'A', en la cual se basan la mayoría de los manuales y normativas revisadas, pues esta comprende todo el rango de frecuencias audible por el ser humano, lo que permite que se asemeje mucho a la percepción real del oído humano. (Roberts, ¿Qué son las ponderaciones de frecuencia A, C y Z?, 2012).

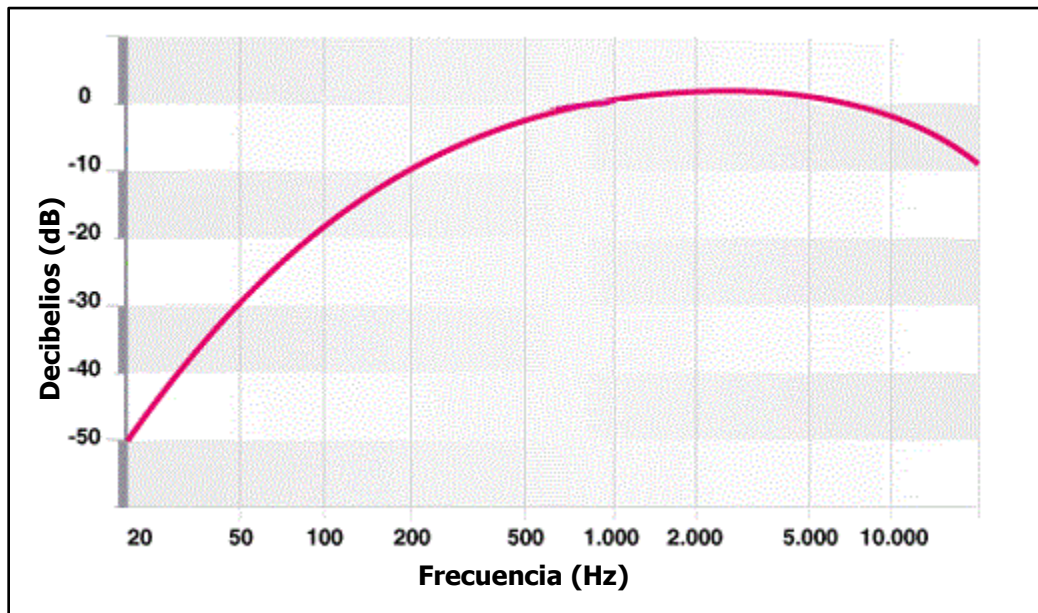


Figura 2. Ponderación 'A' de acuerdo con el rango de frecuencias

Fuente: Roberts, 2012, modificado por Andrey Segura

Para lograr la ponderación, es necesario descomponer la escala logarítmica de los decibelios para obtener el nivel de energía y sumar estos a lo largo de un período de tiempo, para luego volver a convertirlo a escala de decibelios (Roberts, Obtener el promedio de ruido - ¿Cómo calculo el promedio de las mediciones acústicas?, 2013). El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Introducir en la hoja de cálculo las muestras individuales (tomadas cada cierto tiempo).
- Calcular el valor de presión sonora, realizando las operaciones inversas para eliminar el múltiplo de 10 y el logaritmo, dividiendo los valores entre 10 y aplicando la función exponencial. Así, se obtiene el nivel de presión, el cual sí se puede sumar y ponderar de manera lineal.
- Para ponderar linealmente, debemos conocer el total, por lo que se suma toda la presión a lo largo del período de muestreo y se divide entre el total de muestras.

De esta manera, obtenemos el promedio de presión sonora a lo largo del período de muestra.

- Para finalizar, a este resultado, se aplica de nuevo el logaritmo y se multiplica por 10 para obtener el resultado promedio en decibelios, que es lo que al final se necesita para comparar con los valores obtenidos en los modelos.

A parte del nivel sonoro equivalente A, existe otro índice muy utilizado para evaluar los niveles de ruido (mayormente en el Reino Unido) llamado L10, el cual se define como “El nivel de ruido que es superado por el 10% de las mediciones...” (Cirrus Research S.L., 2016). Este indicador es un poco diferente a la ponderación ‘A’ equivalente, el cual es evaluado en el manual FHWA y el Valdivia, dado que el L10 ubica el valor mostrado en el percentil 90 de las muestras y este valor es el que el modelo de predicción de ruido CORTN maneja como válido para tomar el nivel de ruido en la zona. (Department of Transport Welsh Office, 1988)

Además, el sonido se ve afectado por el fenómeno de propagación, el cual se puede describir como la pérdida de intensidad del sonido a través del medio de viaje de la onda. El ruido se propaga de forma esférica, de acuerdo con la siguiente ecuación. (Fernández, 2017)

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (1)$$

Donde W es la potencia y r el radio de distancia de la fuente al receptor. En muchos estudios, las mediciones no se pueden realizar en sitios que proponen, por lo que podemos utilizar esta herramienta para poder conocer el nivel sonoro a la distancia requerida a partir de la medición tomada desde otro punto. Se puede realizar una relación más entendible y manejable en cuanto a términos se refiere, pues podemos expresar la

propagación en términos de decibelios (que es lo que medimos originalmente con el sonómetro) y las distancias, por medio de la expresión:

$$L_2 = L_1 + 20\log\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \quad (2)$$

Donde el L_2 es la intensidad del sonido recibido por en el punto de estudio, L_1 es la intensidad del sonido percibido en el punto de medición, r_1 es la distancia de la fuente al punto de medición y r_2 es la distancia de la fuente al lugar que queremos conocer el nivel sonoro (Fernández, 2017). Para explicar mejor la situación, en la Figura 3 se muestra un esquema donde ejemplifica mejor el significado de cada variable de la ecuación anterior.

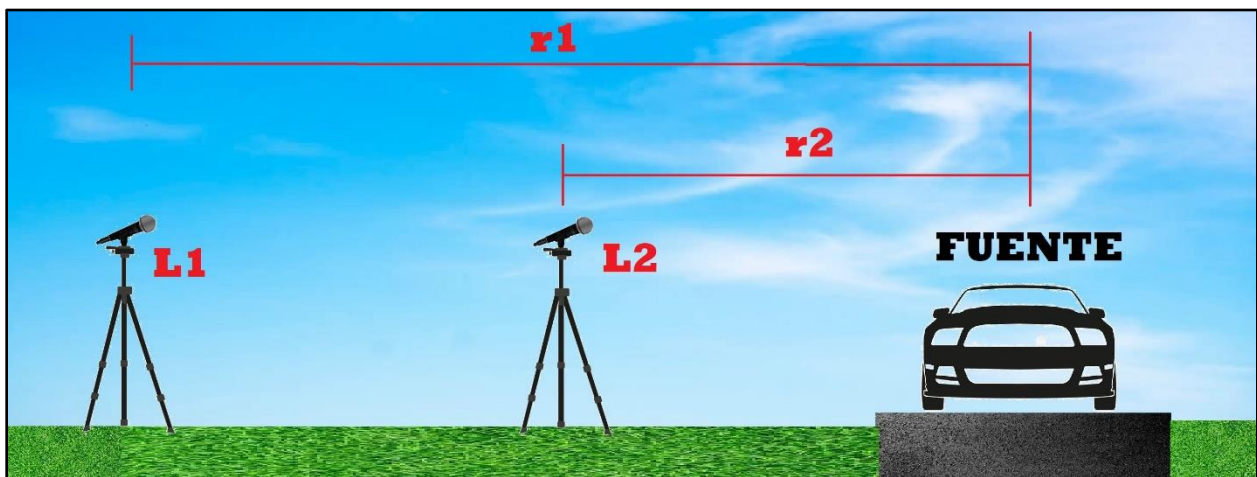


Figura 3. Cálculo de nivel sonoro del punto 1 al 2

También es importante tener en cuenta que existe la atenuación por absorción del aire (Sistema de Información Acústica, 2021), que puede alterar los resultados en caso de exceso de viento a la hora de medir. El documento citado anteriormente, indica que el aire no es homogéneo en su densidad ni se encuentra en reposo, por lo tanto, afecta el movimiento de las ondas a través de él, pues es el medio por el cual se propagan las ondas, convirtiendo parte de la energía en calor. La atenuación depende de la frecuencia de la onda, la temperatura y la humedad del sitio. Indica también que en cuanto mayor

es la frecuencia, mayor es la atenuación, lo que nos dice que los sonidos agudos son los que más energía pierden a la hora de viajar por el aire. Esto se refleja en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Atenuación del sonido de acuerdo a su frecuencia

Frecuencia (Hz)	Atenuación de dBA por cada 100 dBA medido
125	0.03
250	0.066
500	0.157
1 000	0.382
2 000	0.953

Fuente: (Sistema de Información Acústica, 2021)

El ruido se puede definir como la emisión de ondas sonoras de forma inarticulada, generalmente de sensación desagradable, el cual contamina el aire y genera deterioros en la salud de la población, generalmente problemas de audición y estrés. El ruido es molesto y peligroso para el vivir cotidiano del ser humano, dado que, además de generar problemas a la hora de comunicarse, la exposición al ruido severo se puede traducir en graves problemas de salud, no sólo física, si no mental.

De acuerdo con el Programa de Investigaciones en Infraestructura del Transporte – Lanamme (2017), el ruido se puede caracterizar de acuerdo con la intensidad relacionada con la energía generada por las fuentes de ruido, la composición espectral se relaciona con la presión acústica de cada frecuencia en las que se descompone el sonido, así como la variación temporal del ruido. Se debe excluir el ruido generado por fuentes externas a las que se requieren estudiar, como por ejemplo, el ruido de un martillo hidráulico en una construcción a la hora de realizar mediciones de ruido por el paso de vehículos.

1.5.2 Tipos de ruido

De acuerdo con Beery (1998), citado por (Rivera, 2017) existen diferentes tipos de sonido: constantes y variables; también pueden actuar como tonos simples, puros o

compuestos por varios tonos, lo que implica que muchas veces algunas frecuencias quedan ocultas dentro de otras, lo que explica que los sonidos no causen el mismo efecto sobre el ente receptor.

El ruido se puede clasificar de acuerdo con su fuente de origen, para este efecto se cuenta con cuatro categorías (Rivera, 2017):

- Ruido Industrial: producido por maquinaria de uso industrial, se da tanto en espacios internos como externos.
- Ruido producido por tránsito de vehículos: constituye una de las principales fuentes de contaminación sonora en el ambiente, puede ser causado por vehículos automotores, ferrocarriles o aeronaves.
- Ruido producido por actividades domésticas: se relaciona con el uso de artefactos de uso cotidiano como los sistemas de calefacción, ventilación, aspiradoras y similares.
- Ruido causado por actividades de la industria de la construcción: es el generado por actividades propias de este sector como la movilización de materiales y grúas, mezclas de concreto y martillos hidráulicos.

De acuerdo con (Viro, 2002) se puede clasificar el ruido o sonido de la siguiente manera:

- Continuo: son producidos a lo largo de un periodo de tiempo largo y con un nivel sonoro constante.
- Fluctuante: su amplitud varia con el tiempo, en esta clasificación ingresa el ruido producido por el tránsito vehicular.
- Impulsivo: presentan duración temporal muy breve, un ejemplo de este es el disparo de un arma de fuego.

- Intermitente: ocurren durante lapso cortos como el despegue de un avión.

Es importante regular las emisiones de ruido, dado que se pueden producir muchos problemas de salud asociados a exposiciones prolongadas a ruidos muy fuertes, como por ejemplo trastornos auditivos, pérdida total de la audición, hipoacusia (incapacidad de percibir sonidos total o parcialmente en uno o ambos oídos); así como varias enfermedades indirectas como el estrés, depresión, problemas cardiovasculares, perturbaciones del sueño, daños al sistema nervioso, entre otras (OSPAT, 2019).

1.5.3 Regulación del ruido a nivel nacional e internacional

Se muestra la normativa que rige en Estados Unidos, Inglaterra y Chile referente a ruido y que se utilizó para poner en contexto los modelos y tener un punto de comparación entre estos países y Costa Rica.

Para los Estados Unidos, de acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés), dejó a cargo de cada Estado la regulación de ruido, controlado por medio de la Agencia de Control de Contaminación (PCA por sus siglas en inglés). De acuerdo con esta agencia, los niveles permitidos se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 3. Límites de ruido para los Estados Unidos

Zona de actividad	L_{Aeq} (dBA)
A: Zonas en las que la calma tiene una importancia crucial y es una necesidad pública (Exterior)	57
B: Zonas de ocio, juego, deportivas, parques, iglesias, residencias, moteles, hoteles, escuelas, bibliotecas y hospitales (Exterior)	67
C: Urbanizaciones y actividades no incluidas ni en A ni B (Exterior)	72
D: Zonas no urbanizadas ni desarrolladas	No definido
E: Zonas de juego, parques, iglesias, residencias, hoteles, escuelas, bibliotecas y hospitales (Interior)	52

Fuente: (Damián, Flores, Flores, & Téllez, 2001)

Para el Reino Unido, según el estudio de medición de ruido de dicho país, el nivel máximo permitido es de 85 dBA (Cirrus Research S.L., 2016). A pesar de que es un poco más alto

que lo establecido en el modelo norteamericano, es necesario tomar en cuenta que para este límite se toma en cuenta que se mide el nivel de presión sonora equivalente que se supere el 10% del tiempo (Cirrus Research S.L., 2016).

Para Chile, está mejor documentado lo que refiere a límites de ruido vehicular. De acuerdo con el Decreto 7 del Ministerio del Medio Ambiente, los límites permitidos se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Límites permitidos de ruido en el escape para Chile

Vehículo	Transporte de	Características			NPS máxima (dBA)
		Asientos	PBV	Potencia motor (kW)	
Liviano	Pasajeros	≤9	-	-	74
		>9	≤2		76
			>2 y <2.7		77
	Comercial	-	≤2		76
			>2 y <2.7		77
Mediano	Pasajeros	≤9	-	-	74
		>9	≤3.5	-	77
			>3.5	<150	78
				>150	80
	Comercial	-	≥2.7 y <3.5	-	77
			≥3.5	<75	77
				≥75 y <150	78
				≥150	80

Fuente: Decreto 7 del Ministerio del medio ambiente, 2015

Para las motocicletas, la división queda evidenciada en el siguiente cuadro.

Cuadro 5. Límites aplicables en la mufla para motocicletas en Chile

Cilindrada (c.c.)	NPS máximo (dBA)
≤80	75
>80 y <175	77
≥175	80

Fuente, Decreto 7 del Ministerio del Medio Ambiente, 2015

Cabe resaltar que dicho decreto únicamente aplica para vehículos nuevos, que sean livianos y medianos, así como para motocicletas, previo a su inscripción, por medio de

dos ensayos: estático (medido con el automóvil detenido y el sonómetro en el escape) y dinámico (el ensayo se hace en vehículos sobre una pista de ambiente controlado, rectilínea con el sonómetro a un lado de esta). Para los pesados no aplica (Ministerio del Medio Ambiente, 2015). De igual manera, existe el Decreto 38, que indica que los límites a utilizar serán los recomendados por la OMS, sin embargo, en uno de sus apartados indica que no aplica para el tránsito vehicular, por lo que no se incluyen en este informe. (Ministerio del Medio Ambiente, 2011).

En Costa Rica, es escasa la normativa vigente en cuanto a ruido en carreteras se refiere, únicamente la Ley de Tránsito (Reglamento No. 39428-S: Reglamento para el Control de Contaminación por Ruido, 2015), la cual expresa únicamente la existencia de tres fuentes sonoras en carretera, sin entrar en mayores detalles sobre el automotor ni las características especiales de este; tampoco contempla regulaciones por zonas ni franjas horarias. Entre los principales ruidos generados por los vehículos a la hora de transitar, se pueden mencionar el sonido producido por la interacción de la llanta con el pavimento, el ruido de motor, efecto aerodinámico y el causado por la mufla.

Cuadro 6. Niveles de ruido permitidos por el MOPT en la mufla

Categoría	Nivel sonoro máximo (dBA)
Automóvil	90
Vehículo de carga liviana y microbuses	92
Busetas y autobuses	94
Vehículo de carga pesada	96
Motocicletas y bicimotos (entre 0 y 250 cc)	94
Motocicletas y bicimotos (más de 250 cc)	96
Vehículos equipados con freno de motor	112

Fuente: Reglamento para el control de ruido, 2015

Para tratar de ecualizar lo mostrado en los otros modelos, se tomará como base la Directriz sobre procedimiento para la medición de ruido de fondo y ruido de impacto o impulso (Ministerio de Salud, 2019), documento que indica los pasos a seguir para realizar

las mediciones de ruido y evaluar el Reglamento N°39428-S. La directriz establece niveles permitidos de acuerdo con la zona receptora. Los límites se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Límites permitidos por zona receptora Costa Rica para interiores

Zona receptora									
Residencial		Comercial		Industrial		Tranquilidad		Mixta	
Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche
65	45	70	55	70	60	50	45	70	45

Fuente: Directriz sobre procedimiento para la medición de ruido de fondo y ruido de impacto o impulso

Donde la franja horario conocida como día comprende de 6:00 a.m. a 20:00 p.m. Cabe resaltar que los límites propuestos son para zona interior; por lo que se tomaron estos como base de evaluación, dado que no se especifican límites para exteriores en el reglamento.

1.5.4 Índice de rugosidad internacional (IRI)

De acuerdo con lo citado por (Sandoval, 2020), el índice de rugosidad internacional se define como

“La relación del movimiento acumulado por la suspensión del vehículo y la distancia recorrida por el vehículo. Es la relación matemática entre el perfil longitudinal de la superficie de una carretera, asociado a las vibraciones inducidas por la rugosidad del camino, para un vehículo típico de pasajeros y la distancia estándar recorrida por este vehículo a una velocidad de desplazamiento de 80 km/h.”

“El IRI representa el efecto sobre el vehículo del usuario del camino que tienen las desviaciones de la superficie del pavimento (causa) respecto a una superficie plana teórica con dimensiones suficientes para afectar la dinámica del vehículo y la calidad al manejar.” (Pradena, 2010).

El IRI nace principalmente para responder a la necesidad de cuantificar, en una escala entendible y universal, el confort y la regularidad de una carretera de una forma rápida y práctica, pues es importante para un pavimento cumplir con condiciones buenas de confort a la hora de conducir.

El primer paso del procedimiento para calcular el IRI consiste en medir las cotas o elevaciones de terreno que permitan representar el perfil real del camino, esto se realiza a través de un sistema clasificatorio asociado a la precisión obtenida por parte del instrumento de auscultación de la superficie de rueda. (Lanamme UCR, 2014) La escala estándar de medición para el IRI se presenta en la Figura 4.

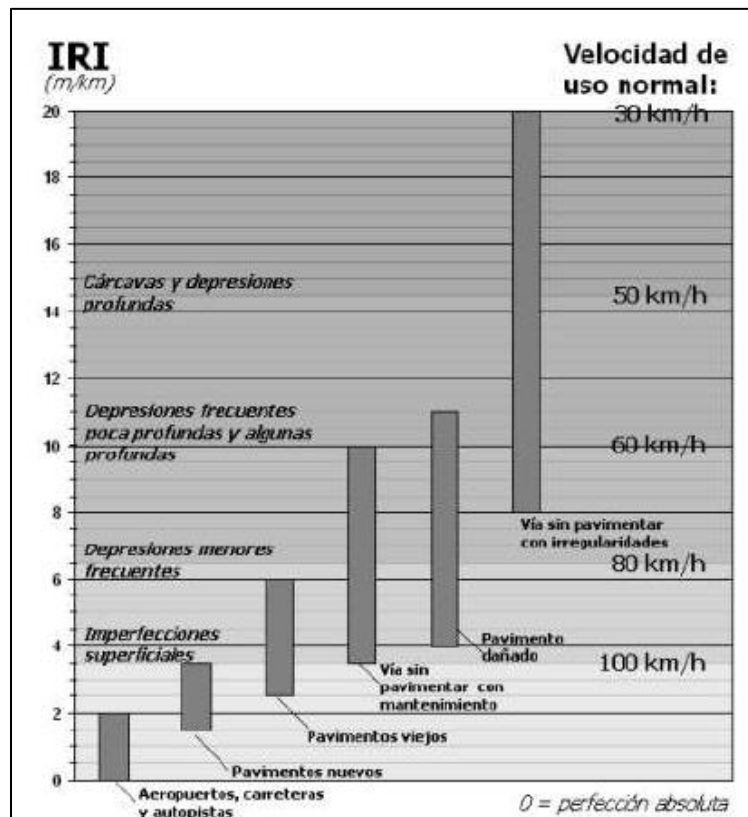


Figura 4. Escala estándar para la medición del IRI para diferentes carreteras según el Banco Mundial

Fuente: Circular LM-PI-C1 del Programa de Infraestructura en Transporte, Lanamme UCR, 2014

Para el cálculo del IRI se utiliza un solo perfil medido a lo largo de una de las huellas de las llantas de un vehículo, con una distancia de muestreo no mayor a 300 mm para obtener mediciones precisas. Se asume que el perfil presenta una pendiente constante entre dos puntos sucesivos de medición.

De acuerdo con (Sandoval, 2020), una de las conclusiones de su trabajo final de graduación, permite relacionar el pavimento de la carretera con los niveles de ruido, pues según su trabajo, a mayor porosidad y menor rugosidad de la carretera, menor será la emisión de ruidos por parte de los vehículos.

Además, se tiene referencia de otro estudio realizado en Colombia en el cual se relaciona el IRI con el ruido producido en las carreteras. De acuerdo con (Cepeda, 2019), una conclusión de su trabajo de investigación describe que

“El IRI de acuerdo a los análisis estadísticos es significativo en la generación de ruido vehicular, obteniendo un aumento de 0.24 dBA por cada unidad incrementada en el valor del IRI. Sin embargo, el ruido vehicular está representado en mayor medida por el tráfico vehicular, principalmente por el volumen de vehículos comerciales en donde se presentan variaciones de hasta 10 dBA aproximadamente de acuerdo al análisis de sensibilidad realizado”.

1.5.5 Modelos internacionales utilizados

A continuación, se muestra el desarrollo y los detalles de cada uno de los tres modelos a utilizar, lo cual se explica en el capítulo 2, sección 2.1 el porqué de su elección.

1.5.5.1. *Noise Measurement Handbook, Estados Unidos*

La primera normativa que se estudió fue la norteamericana, fue producida por el Departamento de Transporte de Estados Unidos, específicamente la Administración

Federal de Carreteras (FHWA) con el fin de unificar en el país los lineamientos para la medición de ruido.

Para esta investigación, se utilizó específicamente la sección “4.0 Validación de la FHWA TNM para un proyecto de carretera propuesto sobre alineación existente” del manual, el cual, de acuerdo con la Tabla 1-1 del citado documento, es la sección que se debe utilizar para realizar la validación del modelo en alineamientos ya existentes.

En cuanto a las características del sitio necesario para realizar las mediciones, reza que las ubicaciones posibles a utilizar se guiarán por la ubicación de los receptores de sonido, las cuales tienen como restricción ser áreas residenciales, es decir, zonas de uso humano frecuente, que tenga en cuenta representatividad en este rubro, sin que las edificaciones obstruyan la línea entre la calzada y el aparato receptor de sonido. Se debe procurar que el único sonido que perturbe el sitio sea el producido sobre la calzada, o al menos que sonidos externos no afecten de manera significativa (casi inaudible).

En cuanto al flujo vehicular, este indica que se debe realizar un conteo de automóviles en ambos sentidos de circulación y obtener el registro de velocidad en ambas direcciones. El manual divide los vehículos en cinco categorías, a saber:

- Automóviles (A): Peso menor a 4 500 kg.
- Camiones medianos (MT): Entre 4 500 y 12 000 kg, con dos ejes y seis neumáticos.
- Camiones pesados (HT): Superior a 12 000 kg con 3 ejes o más.
- Autobuses (B): Vehículos de 9 o más pasajeros.
- Motocicletas: Con no más de dos o tres ruedas.

Para las mediciones en campo, se necesita un sonómetro o aparato de registro de nivel sonoro (micrófono con preamplificador). El sonómetro se debe colocar a 1.5 m sobre el

nivel del suelo, a una distancia mayor a 7.5 m de paredes o maleza que pueda reflejar el ruido. No se indica separación específica con la calzada.

Este manual estudia la variable de nivel sonoro equivalente ponderado A de una hora, denotado como $L_{eq}(h)$. Esta describe el nivel de ruido ponderado a lo largo de una hora. Para realizar el muestreo se recomienda tomar mediciones durante: 10 minutos si la variación en el registro es igual o menor que 10 dB, 15 a 20 minutos si está entre 10 y 30 dB y de 30 minutos para 30 dB o más.

Otra variable por tomar en cuenta es el tipo de pavimento que, según la FHWA se divide en:

- Hormigón asfáltico denso (DGAC).
- Hormigón asfáltico de grado abierto (OGAC).
- Cemento Portland concreto (PCC).

El estudio aplica para pavimentos que no sean de reciente colocación ni que estén cerca de cumplir con su vida útil, es decir, que tengan un cierto uso sin estar completamente desgastado.

En cuanto a la meteorología de la zona, se debe evitar mediciones bajo la lluvia o con el pavimento mojado, además de tener en cuenta el comportamiento del viento, el cual no debe superar los 17 km/h. También es necesario llevar el control de la temperatura.

La ecuación que rige este modelo es la siguiente (Quintero, De Frías, & Henríquez, 2019):

$$LRE = 10 \log(10^{0.1 \cdot Leq(d)_{auto}} + 10^{0.1 \cdot Leq(d)_{mediano}} + 10^{0.1 \cdot Leq(d)_{pesado}}) [dB_A] \quad (3)$$

De donde tenemos que:

$$Leq(d)_i = L_0E_i + \Delta tráfico_i + \Delta distancia_i + \Delta pendiente_i + \Delta segmento_i [dB_A] \quad (4)$$

Siendo:

L_0E_i el nivel equivalente de emisión (dB_A) para el vehículo "i" que corresponda, los cuales se distinguen por:

$$L_0E_i = 38.1 * \log(v) - 2.4 [dB_A] \quad (5)$$

$$L_0E_i = 33.9 * \log(v) + 16.4 [dB_A] \quad (6)$$

$$L_0E_i = 24.6 * \log(v) + 38.5 [dB_A] \quad (7)$$

De donde la ecuación (5) corresponde a automóviles, la (6) corresponde a vehículos medianos y la (7) corresponde a vehículos pesados. "v" corresponde a la velocidad media de los vehículos en km/h.

Además, se debe hacer una corrección por intensidad de tráfico:

$$\Delta tráfico_i = 10 * \log\left(\frac{N_i * d_o}{v_i}\right) - 25 [dB_A] \quad (8)$$

La corrección por distancia a la fuente y tipo de suelo está dada por:

$$\Delta distancia_i = 10 * \log\left(\left(\frac{d_o}{d}\right)^{1+\alpha}\right) [dB_A] \quad (9)$$

Donde N_i es la intensidad de vehículos tipo "i" por hora (veh/h), d_o es la distancia de referencia (15.2 m), v_i la velocidad de circulación del vehículo "i" (km/h), d es la distancia

perpendicular entre la línea central de carril al observador y α es el parámetro de sitio cuyo valor depende de las condiciones de sitio. El valor α puede ser 0 para líneas de visión superiores a 3 metros de altura respecto al suelo y de 0.5 para alturas inferiores a tres metros o interrumpida por árboles, suelos cubiertos por césped (suelo absorbente de ruido).

La corrección por pendiente está dada por:

Cuadro 8. Corrección por pendiente

Pendiente del tramo	Corrección (dBA)
0 a 2%	0
3 a 4%	2
5 a 6%	3
Más de 7%	5

Fuente: (Quintero, De Frías, & Henríquez, 2019)

La corrección por segmento no se tomará en cuenta, debido a que este cambia de acuerdo con el ángulo en el que se encuentre el sonómetro respecto al tramo en estudio. En este estudio se realizaron las mediciones perpendiculares a la carretera, lo que representa un valor de cero (0) para la corrección.

1.5.5.2. *Calculation of Road Traffic Noise, Inglaterra*

Esta normativa fue publicada por el Departamento de Transporte de Londres, Inglaterra, con el fin de estandarizar la medición de ruido en el país. A parte de esto, ha sido utilizada en muchas partes del mundo para realizar mediciones o como base para sus propios manuales, muestra de esto es que está citado en publicaciones como en el artículo de revista "Environmental Modelling & Software (Gulliver, y otros, 2015), según el estudio publicado por Damián, Flores, Flores y Téllez (Damián, Flores, Flores, & Téllez, 2001), este modelo es utilizado también en Australia por las autoridades, además de estudios como el de comparación de modelos de predicción de ruido elaborado en España y

Panamá (Acústica 2000, 2000) y (Quintero, De Frías, & Henríquez, 2019) e inclusive, es tomado en cuenta para realizar validaciones en Chile y comparado con el modelo propuesto en la ciudad de Valdivia (Álvarez Rodenbeek & Suárez, 2008).

En cuanto a la elección del sitio, no especifica las características que se deben presentar, sin embargo, implícitamente se indica que sirve para cualquier tipo de sitio, teniendo en cuenta que la elección del lugar está sujeta a posibles correcciones por forma del lugar, barreras, tipo de suelo, distancia, reflexión de sonido, entre otras.

En cuanto al tráfico vehicular, se utilizará el flujo máximo esperado entre las 6:00 horas y las 24:00 horas. Los tipos de vehículos está separado en dos categorías:

- Vehículos pesados: Todo vehículo con peso vacío mayor a 1 525 kg.
- Vehículos livianos: Todo vehículo con peso vacío inferior a los 1 525 kg.

La velocidad se tomó de acuerdo con el tipo de carretera en estudio, en concordancia con el párrafo 14.2 del manual CORTN, que se especifica en el Cuadro 9, así como también tener en cuenta si el tramo en estudio tiene algún tipo de pendiente o no.

En cuanto al tipo de equipo, no se especifica el tipo de micrófono ni qué accesorios son necesarios, pero, se infiere que son sonómetros dado que lo que se analizará son ruidos. En cuanto a la colocación del equipo sí se especifica, se dice que debe estar a 1.2 m sobre el nivel del suelo y a 3.5 m de la línea externa de la calzada. Se puede colocar a una distancia mayor a 4 m, pero hay que tomar en cuenta ruidos que afecten externamente y se debe realizar corrección por distancia.

La variable por estudiar es el percentil 10 de dos posibles espacios de tiempo: en una hora, denotado como L10 (1 h) o en 18 horas, expresado como L10 (18 h). Esta medición indica el ruido excedido por sólo el 10% del tiempo durante una hora o 18 horas de acuerdo con el intervalo de tiempo a estudiar.

Las mediciones se pueden realizar durante una hora o durante 18 horas como se dijo anteriormente. La cantidad de mediciones, así como el período de medida depende del flujo vehicular, del cual no debe ser un tiempo inferior a 5 minutos de muestreo, con mediciones no inferiores a 5 por minuto.

Otro factor por tomar en cuenta es el pavimento, que se divide en dos: de tipo bituminoso y pavimentos de hormigón, a los cuales aplica una corrección diferente para cada uno. Además, otro factor que es necesario evaluar es el tipo de suelo entre la calzada y la estación de medida, dado que se debe aplicar una corrección por absorción si existe suelo de tierra, césped, cultivos, entre otros. La corrección no aplica si es piso pavimentado o similar.

De igual manera, existe una restricción para el viento, el cual debe ser inferior a 7 km/h en dirección paralela a la carretera e inferior a 36 km/h en cualquier otra dirección.

La ecuación para este modelo es (Gulliver, y otros, 2015):

$$L_{10}(1h) = L_0 + \Delta f + \Delta g + \Delta p + \Delta d + \Delta s + \Delta c + \Delta a + \Delta r [dB_A] \quad (10)$$

Donde:

$$L_0 = 42.2 + 10 * \log (q) [dB_A] \quad (11)$$

Tomando q como el flujo de tráfico en una hora (veh/h).

En cuanto a las correcciones, tenemos:

$$\Delta f = 33 * \log \left(v + 40 + \frac{500}{v} \right) + 10 * \log \left(1 + \frac{5 * p}{v} \right) - 68.8 (dB_A) \quad (12)$$

$$p = \frac{100 * f}{q} [\%] \quad (13)$$

Donde v es la velocidad media del flujo, p es el porcentaje de vehículos pesados, f el flujo de vehículos pesados. La velocidad se deduce basado en el esquema que nos proporciona el párrafo 14.2 del manual CORTN. La caracterización y elección de velocidad se clarifica en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Elección de velocidad para el modelo

Clasificación de la carretera	Velocidad de tráfico (km/h)
Carreteras especiales (rurales) excluyendo vías de acceso	108
Carreteras especiales (urbanas) excluyendo vías de acceso	97
Autopistas de doble vía excluyendo vías de acceso	97
Calzadas de una vía de más de 9 m de ancho	88
Calzadas sencillas de 9 m de ancho o menos	81
Autovías sujetas a un límite de velocidad de 80 km/h	80
Calzadas sencillas sujetas a una velocidad de 80 km/h	70
Autovías de menos de 80 km/h y más de 50 km/h	60
Calzadas sencillas de menos de 80 km/h y más de 50 km/h	50
Carreteras con límite inferior a los 50 km/h	50

Fuente: Manual CORTN

*Las casillas marcadas de color amarillos corresponden a carreteras no sujetas a límites de velocidad.

$$\Delta g = 0.3 * G [dB_A] \quad (14)$$

Donde G es la pendiente de la carretera (%), que aplica para cuando existe flujo vehicular ascendente en calzadas simples.

$$\Delta p: \begin{cases} -1 & \text{en caso de pavimento bituminoso permeable con } vel. < 75 \text{ km/h} \\ -3.5 & \text{para pavimento impermeable} \end{cases} [dB_A] \quad (15)$$

$$\Delta d = -10 * \log \left(\frac{\sqrt{(d + 3.5)^2 + h^2}}{13.5} \right) [dB_A] \quad (16)$$

Donde d es la distancia del punto de medida al origen del ruido (Si $d < 4$, usar $d = 4$) y h es la altura del suelo al sonómetro.

$$\Delta c: \begin{cases} 5.2 * I * \log \left(\frac{3}{d + 3.5} \right) \text{ para } H < 0.75 \\ 5.2 * I * \log \left(\frac{6H - 1.5}{d + 3.5} \right) \text{ para } 0.75 \leq H < \frac{d + 5}{6} [dB_A] \\ 0 \text{ para } H > \frac{d + 5}{6} \end{cases} \quad (17)$$

Donde H es la altura promedio de propagación (m), d la distancia del eje central de la carretera al receptor e I está basada en el porcentaje "s" de suelo absorbente entre la fuente y el receptor.

Las correcciones Δa y Δr dependen de la ubicación del equipo y del tramo de estudio. Estas se basan en los ángulos de posicionamiento del micrófono respecto al segmento. Al colocar el micrófono en posición perpendicular a la carretera, estas correcciones no aplican a estos casos.

1.5.5.3. *Modelo matemático para la medida de L_{eq} en zonas urbanas de Chile (Modelo Valdivia), Chile*

De acuerdo con (Álvarez Rodenbeek & Suárez, 2008), este modelo es una adaptación realizada para la ciudad de Valdivia, Chile, a partir del modelo propuesto por el mismo Sánchez para el territorio español. Este modelo basa todas sus correcciones en el modelo original (Álvarez Rodenbeek & Suárez, 2008), lo que cambia son los valores de coeficientes de cada variable.

El modelo no especifica para las zonas a las que aplica, por lo que se infiere que se puede utilizar para cualquier espacio. Este modelo considera por aparte el flujo de vehículos ligeros, vehículos pesados y autobuses. Cuenta también con una corrección para las distintas velocidades de circulación.

Tampoco da las especificaciones del tipo de equipo a utilizar, pero, por la misma razón expuesta en el modelo anterior, se asume que son sonómetros. Estos sí deben estar colocados a 1.2 m sobre el nivel de suelo, a 25 m del centro de la calzada.

Al igual que el modelo norteamericano, este mide el nivel sonoro ponderado A en una hora (L_{eq} (h)). No indica ni duración, ni intervalo ni repeticiones para las mediciones de campo.

En cuanto al asfalto, el modelo lo divide en cuatro posibles superficies: asfalto liso, asfalto rugoso, hormigón y adoquinado. Es necesario conocerlo para hacer la corrección por tipo de superficie de rodadura. A parte de ello, no muestra un control para las situaciones climáticas

La ecuación que domina este modelo (Quintero, De Frías, & Henríquez, 2019) es la siguiente:

$$L_{Aeq} = 33.6 + 10 * \log(Q_l + 9.2 * Q_p + 6 * Q_b) + C_{vel} + C_{pav} [dB_A] \quad (18)$$

Donde Q_l , Q_p y Q_b son los flujos de vehículos livianos, pesados y autobuses respectivamente.

C_{vel} : Es la corrección por velocidad, que viene dada por:

Velocidad (km/h)	Corrección (dBA)
< 50	0
60	1
70	2
80	3
90	4

C_{pav} : Es la corrección por el tipo de pavimento, que corresponde a:

Tipo de pavimento	Corrección (dBA)
Asfalto liso	-0.5
Asfalto rugoso	0
Hormigón	1.5
Adoquinado	4

El manual del modelo no indica explícitamente los límites de lo que se define como “vehículo liviano” ni “vehículo pesado”, por lo que se asume que el límite que los divide es el establecido por la Ley de tránsito de Chile (Ministerio de Justicia, 1984), la cual, en su artículo 12, especifica los tipos de licencia que existen, tomando como conductor profesional para el transporte de carga aquel que posea una licencia tipo A-4 o A-5, el cual puede conducir vehículos con un peso bruto sea mayor a 3 500 kg. Por tanto, se toma este valor como el límite entre vehículos livianos y pesados.

La razón por la que los manuales especifican que se debe tener en vigilancia la dirección y velocidad del viento es debido a que a la hora de realizar las mediciones pueden existir errores significativos, debido a que los sonómetros trabajan con una membrana que vibra cuando percibe las ondas sonoras, por lo que, al recibir el empuje del viento, este puede deformar dicho diafragma y generar una medición del sonido equivocada, que puede ser mayor a lo que realmente genera la fuente (en este caso el paso de los vehículos).

Capítulo 2. Evaluación de los modelos

2.1 Elección de modelo a recomendar

2.1.1 Elección de los modelos revisados y las variables a utilizar

Para iniciar con la normativa que está vigente en Costa Rica, se buscaron modelos de predicción de ruido que pudieron ser utilizados en diferentes proyectos tanto de ampliación, reacondicionamiento y ampliación de carreteras, para conocer si estos modelos se aplican como parte del estudio de impacto ambiental.

Se consultaron los estudios de impacto ambiental de la ampliación de la ruta 1 y ruta 32 (Fideicomiso Ruta Uno, 2001) y (CDG Enviromental Advisors, julio, 2016) respectivamente, en los cuales imperó el mismo resultado: únicamente se tomó en cuenta el ruido a la hora de construir la obra, no para la funcionalidad de la carretera; se toma como algo cualitativo y no cuantitativo, es decir, simplemente se mencionan en los informes sin mayor detalle al respecto.

Para esta investigación, se consideró un modelo norteamericano (Federal Highway Administration, 2017), uno europeo (Department of Transport Welsh Office, 1988) y uno latinoamericano (Sánchez Rivera, González Suárez, Arenas Bermúdez, & Poblete, 1996). El objetivo primordial es comparar tres estándares diferentes de tres regiones distintas en el mundo para deducir cuál de ellas se acopla mejor a nuestra realidad.

Si bien es cierto se utilizaron estos modelos, se realizó una búsqueda más profunda, en la cual se encontraron 9 modelos diferentes alrededor del mundo. Entre ellos están 6 europeos: CORTN del Reino Unido, RLS90 de Alemania, Statens Planverk 96 desarrollado en conjunto por países nórdicos, NMPB Routes-96 de Francia, Sánchez de España, Fagoti

de Italia; además de 3 modelos americanos: FHWA de Estados Unidos, Valdivia de Chile y González de Uruguay (Acústica 2000, 2000).

De todos estos modelos, se buscó que la información estuviera accesible, con lo cual se descartó el uso del modelo alemán por falta de información en español, debido a la limitante del lenguaje técnico. De igual manera, esta fue una de las razones por las que se descartó el modelo francés y el de los países nórdicos.

Aunado a esto, otra razón de descarte fue que algunos de estos modelos no toman en cuenta varias correcciones debido a pendiente, tipo de asfalto y distancia real de medición entre el equipo y la calzada; ejemplo de ello son el modelo francés, el de países nórdicos, el italiano y el español, los cuales únicamente se debe tener el valor de flujo vehicular según el peso de vehículo (la categorización por peso varía entre modelos) (Acústica 2000, 2000). Por lo tanto, el modelo que más correcciones tiene es el CORTN inglés, por lo que este es el elegido para la región europea. Un valor agregado para el uso de este modelo es que es el único que utiliza el nivel sonoro equivalente en el percentil 10, por lo que es interesante evaluar este con respecto a los demás, que utilizan el nivel sonoro equivalente ponderado 'A'.

En cuanto a la región americana, tenemos los tres modelos antes mencionados, de los cuales se utilizará el estadounidense pues es el único encontrado para la parte norte del continente. En contraparte, para Latinoamérica se encontraron dos, de los cuales el modelo de Valdivia, desarrollado en Chile, cuenta con más correcciones que el modelo uruguayo, por lo que se decidió emplear el estándar chileno.

También existe evidencia de su uso en otros países, como lo es Panamá (Quintero, De Frías, & Henríquez, 2019), en donde, dicho sea de paso, el modelo francés no obtuvo resultados satisfactorios; y en congresos internacionales e informes realizados por agencias de acústica (Álvarez Rodenbeek & Suárez, 2008) y (Acústica 2000, 2000).

Se tomó en cuenta que los tres modelos seleccionados tuvieran la mayor cantidad posible de variables en común, con la finalidad de realizar un análisis comparativo entre los tres modelos propuestos por los manuales y dar cabida a una comparación más igualada y definir las diferencias que cada modelo presenta. Entre las variables a analizar para los tres modelos, tenemos:

- Características del sitio.
- Características del flujo vehicular.
- Tipo de equipo a utilizar.
- Ubicación del equipo de medición.
- Variable con la que trabaja el modelo.
- Tipo de pavimento de la zona de rodadura.
- Tipo de suelo circundante entre la calzada y el equipo.
- Duración, intervalo y repeticiones de mediciones.
- Meteorología de la zona de estudio.

Además de esto, es importante realizar la evaluación de los modelos con el fin de que sean una herramienta útil para hacer cumplir la normativa vigente en la zona de estudio. Para nuestro país, ya se comentó en el marco teórico que existe normativa en materia de tránsito, pero sin ser específica para la medición en carretera como un todo, sino que simplemente mide las emisiones de ruido del vehículo en la salida del tubo de escape.

En el Cuadro 10 se muestra un resumen con las principales variables y cuidados de cada modelo expuesto en el marco teórico.

Cuadro 10. Resumen de los modelos de medición

Característica	Modelo		
	FHWA	CORTN	Valdivia
Características del sitio de medición	Incluir áreas residenciales. Zonas de uso humano frecuente.	No específica. Considerar características de sitio para correcciones.	No específica.
Características del flujo vehicular	Automóviles (A). Camiones medianos (MT). Camiones pesados (HT). Autobuses (B). Motocicletas. Obtener registros de velocidad.	Máximo flujo vehicular. Vehículos pesados. Vehículos ligeros. Considerar velocidad y pendiente.	Vehículos ligeros. Vehículos pesados. Autobuses. Se debe tener en cuenta su velocidad.
Tipo de equipo a utilizar	Medidor de sonido digital o analógico.	No específica. Se asume sonómetro.	No específica. Se asume sonómetro.
Ubicación del equipo de medición	Altura de 1.5 m. Separación de 7.5 m de la orilla de la calzada.	Altura de 1.2 m. Separación de 3.5 m de la orilla de la calzada.	Altura de 1.2 m. Separación 25 m del centro de calzada.
Variable con la que trabaja el modelo	Nivel sonoro equivalente ponderado (L_{eq} (h))	Percentil 10 (L_{10} (1 h))	Nivel sonoro equivalente ponderado (L_{eq} (h))
Tipo de pavimento de la zona de rodadura	Hormigón asfáltico denso. Hormigón asfáltico de grado abierto. Cemento Portland concreto.	Pavimentos de tipo bituminoso. Pavimentos de hormigón.	Asfalto liso. Asfalto rugoso. Hormigón. Adoquinado.
Tipo de suelo circundante	-	Sin cubierta o con cubierta natural. Con cubierta artificial.	-
Duración, intervalo y repeticiones de mediciones	Muestreo durante 10 min para 10 dB o menos, 15 a 20 min para 10 a 30 dB y de 30 min para 30 dB o más.	Durante una hora o 18 horas. Muestreo depende del flujo vehicular, por no menos de 5 minutos y no menos de 5 muestras por minuto.	No específica ni duración, ni intervalo ni repeticiones
Meteorología de la zona de estudio	Revisar temperatura y velocidad de viento. No medir bajo lluvia o pavimento mojado.	Revisar velocidades del viento.	-

*Si los recuadros son del mismo color significa similitud, caso contrario, diferencias a la hora de muestrear

Es importante recalcar que el alcance de cada modelo depende de la distancia de referencia a la que en teoría se debería medir, para la cual los modelos FHWA y CORTN son de 15.2 m respecto al eje de carretera, mientras que para el de Valdivia de 25 metros respecto al eje de la carretera.

Se puede observar que todos los posibles factores que afectan las mediciones estudiadas en el marco teórico están cubiertos por correcciones al modelo y se toman en cuenta para obtener resultados realistas.

2.1.2 Consideraciones a la hora de evaluar los modelos

2.1.2.1. *Noise Measurement Handbook, Estados Unidos*

Para este modelo, la división de pesos vehiculares es de 5 categorías, de las cuales 4 se evaluaron en el modelo. Para ello, y con base en los datos de TPDA del MOPT y su división (ANEXO III), se hizo el agrupamiento de cada categoría del informe de TPDA del MOPT como se muestra:

- Automóviles (A): Columnas correspondientes a "Liviano" y "Carga Liv."
- Camiones medianos (MT): Columna "C. 2 ejes".
- Camiones pesados (HT): "C. 3 ejes", "C. 4 ejes" y "C. 5/6 ejes".
- Autobuses (B): Columna "Bus".
- Motocicletas: Sin datos y no evaluado.

Esto con base en la observación de fichas técnicas de diversos vehículos como lo son los tipo sedán, todoterreno, pickups y camiones. Como el modelo únicamente pide el flujo de livianos, medianos y pesados, se considera como:

- Vehículos livianos: A.
- Vehículos medianos: MT y B.
- Vehículos pesados: HT.

Luego, simplemente se realizó el ingreso de los datos recolectados en campo al modelo, con el fin de obtener los resultados de nivel sonoro equivalente para el tramo 1. Dado que todos los muestreos arrojan datos muy similares (el cambio es en el segundo o tercer decimal), esto debido a que la variación en velocidad media es mínima y los demás parámetros se mantienen constantes, simplemente se muestra uno de los resultados para no ser repetitivo.

2.1.2.2. *Calculation of Road Traffic Noise, Inglaterra*

De igual manera que con el modelo anterior, se debió realizar la división de categorías del TPDA de acuerdo con lo estipulado en cada modelo. Se muestra el resultado a continuación:

- Vehículo pesado: Todas las columnas exceptuando la de "Livianos".
- Vehículo liviano: Únicamente la columna "Livianos".

Esto debido a que el peso de corte es de 1 525 kg y todos los vehículos de las categorías ingresadas como vehículo pesado superan fácilmente dicho límite basado en la observación de fichas técnicas. Incluso, algunos de los vehículos livianos, como los vehículos estilo todoterreno sobrepasan dicho límite, sin embargo, para efectos de este estudio, se consideran todos como inferiores a 1 525 kg.

De igual manera, se ingresaron los datos al modelado y se mostrará simplemente un resultado debido a su poca variabilidad en cada muestra.

2.1.2.3. *Modelo matemático para la medida de L_{eq} en zonas urbanas de Chile (Modelo Valdivia), Chile*

Una consideración importante que se hizo por parte del investigador a la hora de evaluar el modelo es que la mayoría de los vehículos tipo pick up y camiones pequeños cuentan con placa del tipo carga liviana (CL), por lo que estos ingresan en la categoría de carga

liviana en las bases de datos de los TPDA y esto dificulta hacer la división entre vehículo liviano y pesado que el modelo exige, dado que el límite establecido es de 3 500 kg. El problema surge debido a que muchos pickups están por debajo de este peso bruto y por lo general los camiones pequeños superan este límite, por lo que se toma la decisión de dividir esta categoría de "Carga Liviana" en dos y se toma la mitad del valor para la categoría "vehículos livianos" y la otra mitad para "vehículos pesados".

Entonces, se tiene la siguiente división:

- Vehículos livianos: Columna "Livianos" y 50% de "Carga Liv.".
- Vehículos pesados: El 50% de "Carga Liv." y las restantes columnas, excepto la de "Buses".
- Autobuses: Únicamente la columna "Buses".

De igual manera, se muestra únicamente un resultado por la misma razón ya descrita anteriormente. Un detalle a tomar en cuenta es que este modelo no tiene corrección por distancia, por lo que el valor obtenido es a 25 m de la fuente, por lo que se debió realizar una corrección por distancia, según se muestra en la página 64 y de acuerdo con la ecuación (2) referente a atenuación por distancia.

2.1.3 Elección y descripción del equipo a utilizar

De acuerdo con el cuadro anterior, se puede notar que el único manual que describe explícitamente el uso de un sonómetro es la estadounidense, las demás no lo piden expresamente. Es por esto que se decide utilizar dos tipos de sonómetro para tener dos puntos de comparación ante los modelos planteados: se utiliza un sonómetro digital y uno analógico.

De acuerdo con la disponibilidad de la Universidad de Costa Rica, específicamente el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela de Ingeniería Civil, se utilizarán dos

sonómetros proporcionados por dicha dependencia. Dichos aparatos se describen en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Características de los sonómetros a utilizar

Característica	Sonómetro	
	Digital	Analógico
Marca	BK Precision	Sper Scientific
Modelo	732A	840005
Placa	UCR-261989	262929
Incertidumbre (dBA)	± 0.1	± 2

También se utilizó equipo complementario como trípodes, cintas métricas y demás de poca relevancia para poder cumplir con las mediciones de separación y altura de la estación de medida.

2.1.4 Definición de los tramos de estudio

El estudio está enfocado en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica, la cual es la que contiene la mayor densidad de población y mayor cantidad de flujo vehicular. Para ubicar dicha zona, se presenta el mapa en la Figura 5.

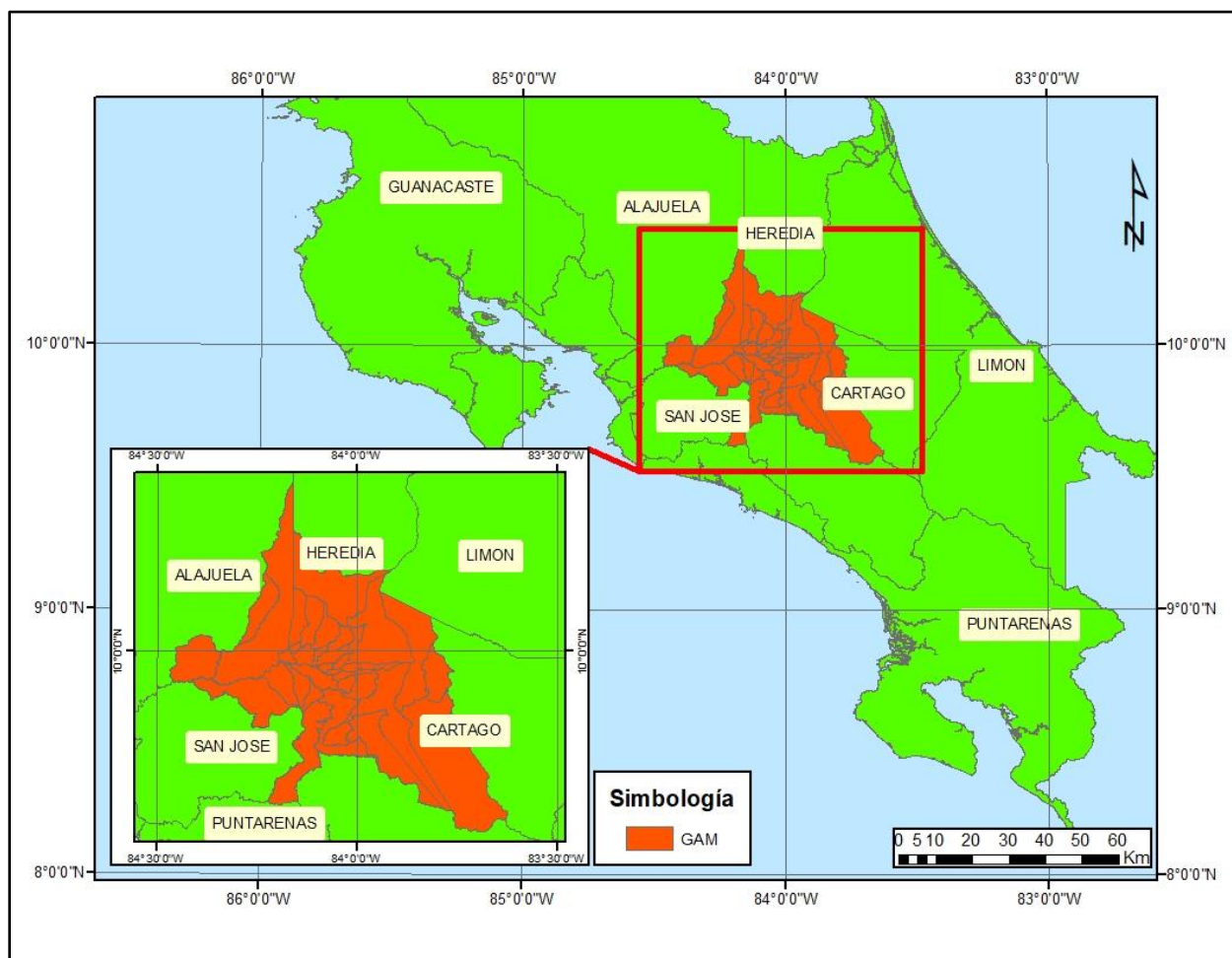


Figura 5. Mapa de los cantones que conforman la GAM

Fuente: Atlas del TEC, 2014

Esta zona está conformada por los siguientes cantones:

Provincia						
San José		Alajuela	Cartago	Heredia		
Cantones	San José	Santa Ana	Alajuela	Cartago	Heredia	Flores
	Escazú	Alajuelita	Atenas	Paraíso	Barva	San Pablo
	Desamparados	Vázquez de Coronado	Poás	La Unión	Santo Domingo	Belén
	Aserrí	Tibás		Oreamuno	Santa Bárbara	San Isidro
	Mora	Moravia		Alvarado	San Rafael	
	Goicoechea	Montes de Oca		El Guarco		
	Curridabat					

Como es la primera vez que se realiza un estudio de esta índole en Costa Rica, se utilizaron tramos que se encuentran en algunas de las carreteras más transitadas del país, con la finalidad de que sea más sencillo obtener datos pertinentes, como por ejemplo el flujo vehicular, pendientes y demás características de interés, así como espacios para colocar el equipo de medición, pues muchas vías no cuentan con espaldón ni espacio suficiente.

Tampoco es posible decir a ciencia cierta que se van a tener las mismas condiciones de estudio, dado que, de acuerdo con la realidad de nuestro país, no se cuenta con carreteras tipo autopistas de alta velocidad ni con infraestructura de primer nivel, pues Costa Rica, aún es un país en vías de desarrollo.

Se eligieron tramos de las principales carreteras nacionales, los cuales cuenten con las condiciones para tomar datos, además de los datos relevantes para el estudio, como lo son el TPDA (en caso de que el conteo no se pueda realizar en sitio), composición de tráfico en el punto o en un punto cercano, velocidad establecida, pendiente de carretera, tipo de pavimento y que tenga asentamientos humanos cercanos (sin estar en focos céntricos de ciudades) o zonas de tránsito humano frecuente, pues al final de cuentas, la salud es lo que se ve afectada por los niveles altos de ruido.

Además, de acuerdo con lo establecido en los modelos, las mediciones se deben realizar en sitios donde exista espacio suficiente para poder colocar el equipo a la distancia requerida y que sea un espacio seguro para la persona operante del equipo. También se establece que no se debe realizar la medición cerca de zonas con intersecciones, con el fin de evitar ruido excesivo por el paso de vehículos en carreteras aledañas y picos de ruido en las aceleraciones iniciales.

Es importante considerar que Costa Rica no es un país con una topografía plana, muchas de las carreteras principales tienen pendientes pronunciadas que al final de cuentas

afectan sustancialmente los niveles de ruido, especialmente los vehículos de carga. Por esta razón, se realizó el estudio de ruido en seis tramos: tres donde el relieve sea plano y tres donde se cuente con pendientes considerables, en aras de considerar el efecto que pueda tener la pendiente en el ruido producido.

Por consiguiente, considerando los puntos antes expuestos, se decide utilizar los siguientes puntos de medición:

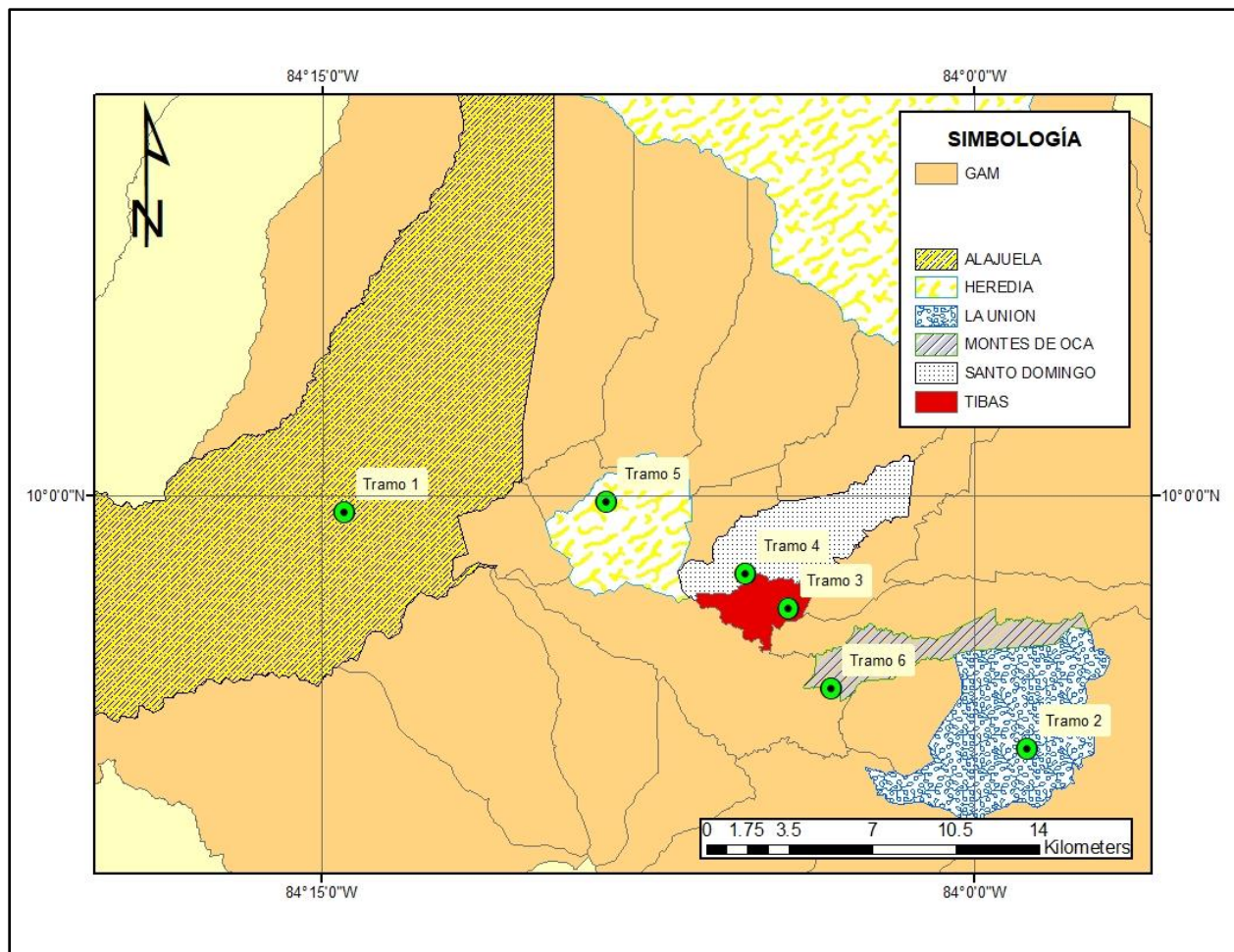


Figura 6. Ubicación de los tramos por cantón

Fuente: Atlas del TEC, 2014

- Tramo 1:
 - Provincia: Alajuela.
 - Cantón: Alajuela.
 - Distrito: El Coyol.
 - Ruta: 1.
 - Frente a Hotel Aeropuerto, costado norte de la carretera.
 - Tramo plano con suficiente espacio para colocar el equipo a la distancia requerida. Existe un pequeño foco poblacional al sur de la carretera, conocido como El Roble a aproximadamente 40 metros de distancia.
 - El sitio se encontraba rodeado de maleza baja y con grava alrededor del punto de medición, sin barreras entre la estación de medida y el límite del extremo opuesto de la carretera.



Figura 7. Puntos de referencia a la estación 1

Fuente: Google Maps



Figura 8. Ubicación de la estación 1

Fuente: Google Earth



Figura 9. Ubicación del equipo estación 1

Fuente: Google Earth

- Tramo 2:
 - Provincia: Cartago.
 - Cantón: La Unión.
 - Distrito: Tres Ríos.

- Ruta: 2.
- Frente a Restaurante El Campanario.
- Tramo plano con suficiente espacio para colocar el equipo. A ambos lados de la carretera hay asentamientos humanos considerables, aproximadamente a 40 metros de la carretera.
- En el punto de medición existía una losa de concreto, por lo que no hay interferencia con la maleza. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que este tramo sí cuenta con una barrera medianera metálica cubierta por maleza que interfiere la visibilidad al otro lado de la calle. Además de esto, el extremo opuesto de la carretera tiene una tapia levantada a aproximadamente 40 metros del límite de calzada.

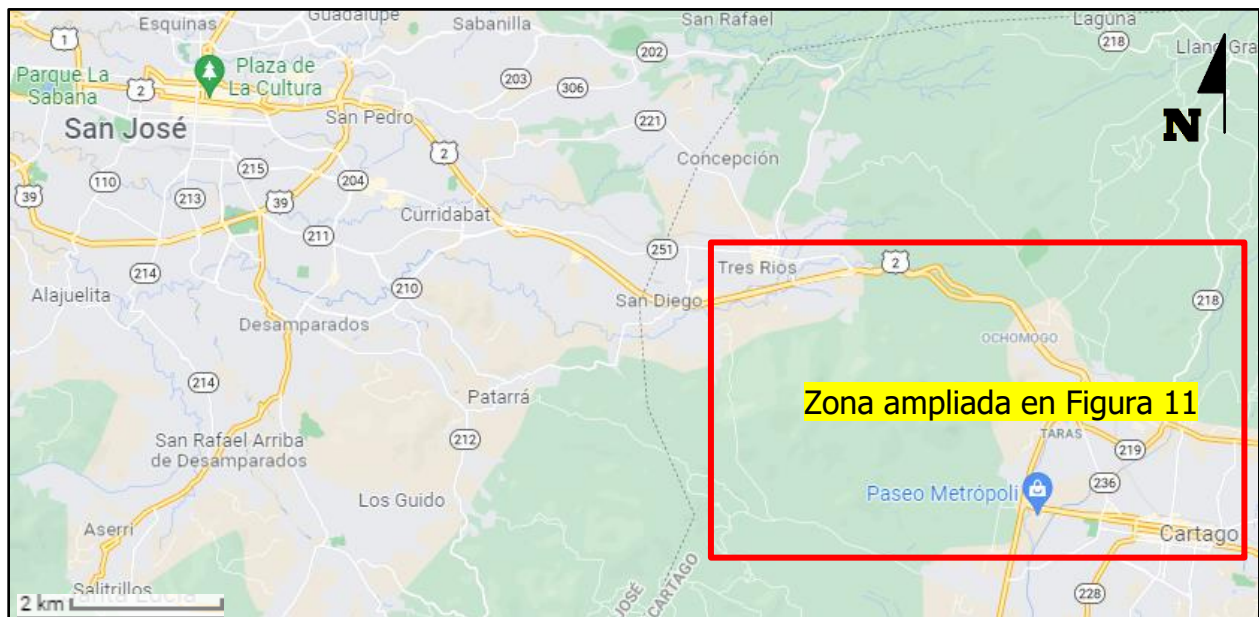


Figura 10. Puntos de referencia a estación 2

Fuente: Google Maps

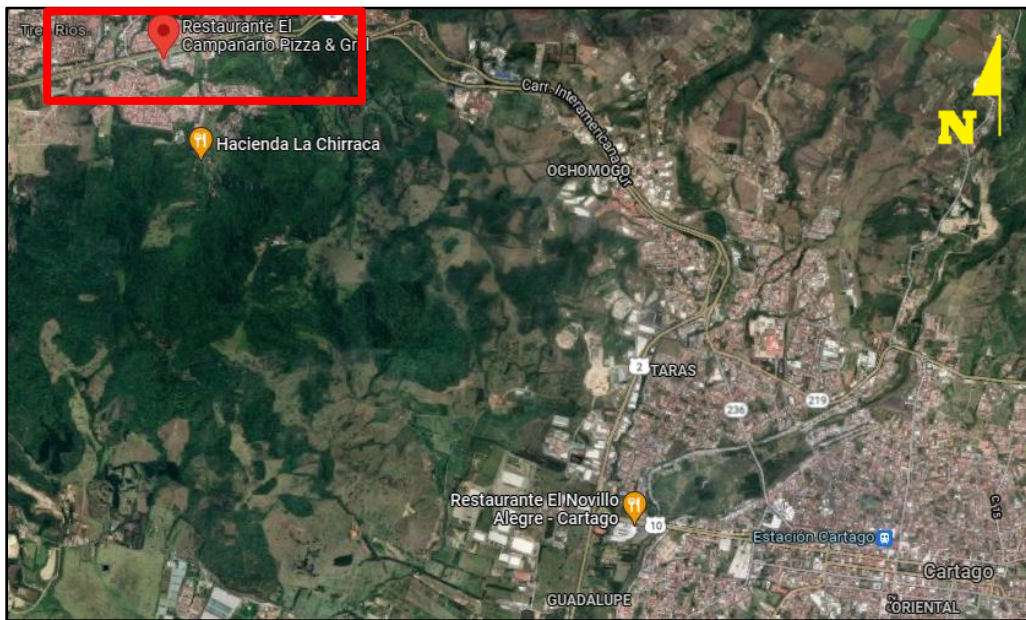


Figura 11. Ubicación de la estación 2

Fuente: Google Earth



Figura 12. Ubicación del equipo estación 2

Fuente: Google Earth

- Tramo 3:
 - Provincia: San José.
 - Cantón: Tibás.
 - Distrito: Anselmo Llorente.
 - Ruta: 32.
 - Frente a Tibás Urbano.
 - Tramo plano con suficiente espacio para colocar el equipo. Es una zona con condominios y residenciales, además de locales comerciales a cerca de 25 metros de la carretera.
 - Este sitio se encontraba rodeado de maleza alta, sin embargo, únicamente se encontraba alrededor del equipo, de frente no existía ningún tipo de barrera. Acá existía una isla medianera de concreto, sin barandas.

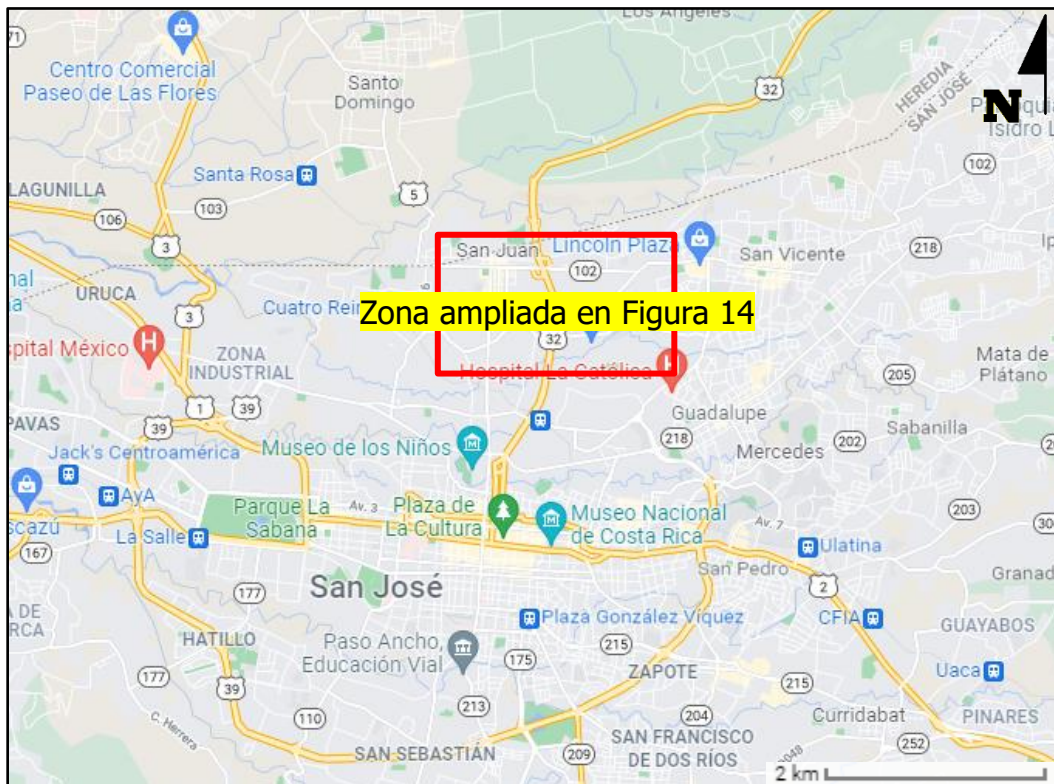


Figura 13. Puntos de referencia a estación 3

Fuente: Google Maps

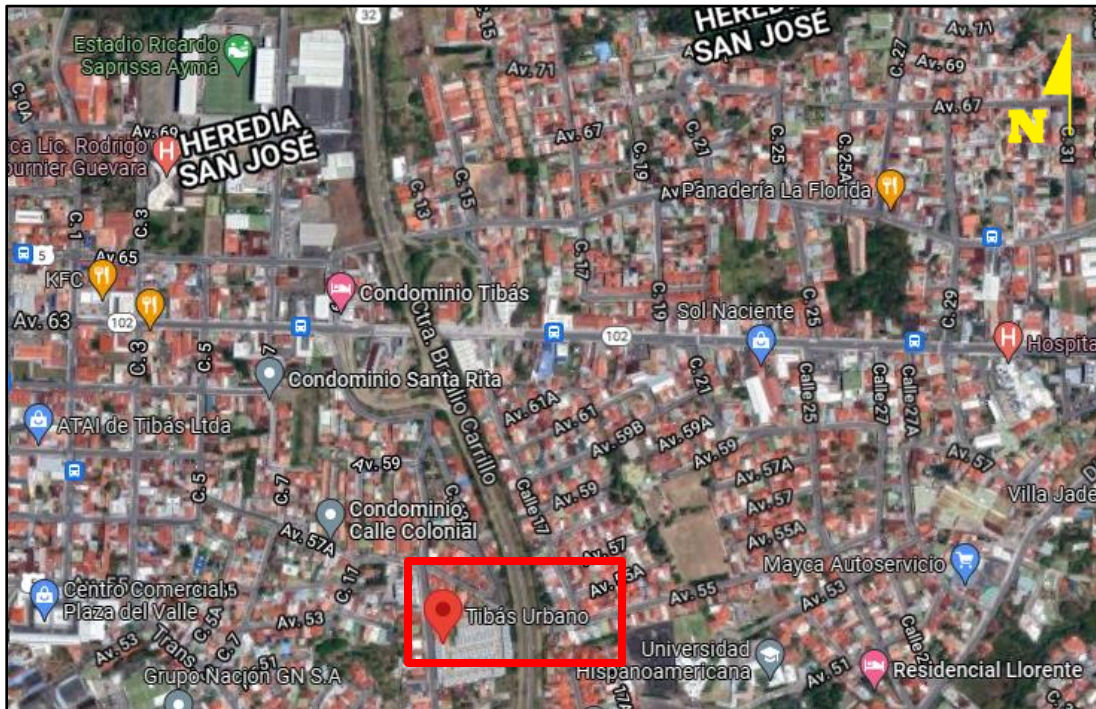


Figura 14. Ubicación de la estación 3

Fuente: Google Earth



Figura 15. Ubicación del equipo estación 3

Fuente: Google Earth

- Tramo 4:
 - Provincia: Heredia.
 - Cantón: Santo Domingo.
 - Distrito: Santo Tomás.
 - Ruta: 5.
 - 100 metros este del cementerio municipal de Santo Domingo, costado norte de la carretera.
 - Tramo con pendiente pronunciada, con espacio suficiente para colocar el equipo. Los asentamientos humanos más cercanos al punto se encuentran a 17 metros.
 - En este sitio el equipo estaba rodeado de maleza mediana e igualmente con la parte que da a la carretera sin obstáculos. La calzada se compone de dos carriles por sentido sin isla medianera.



Figura 16. Puntos de referencia a estación 4

Fuente: Google Maps

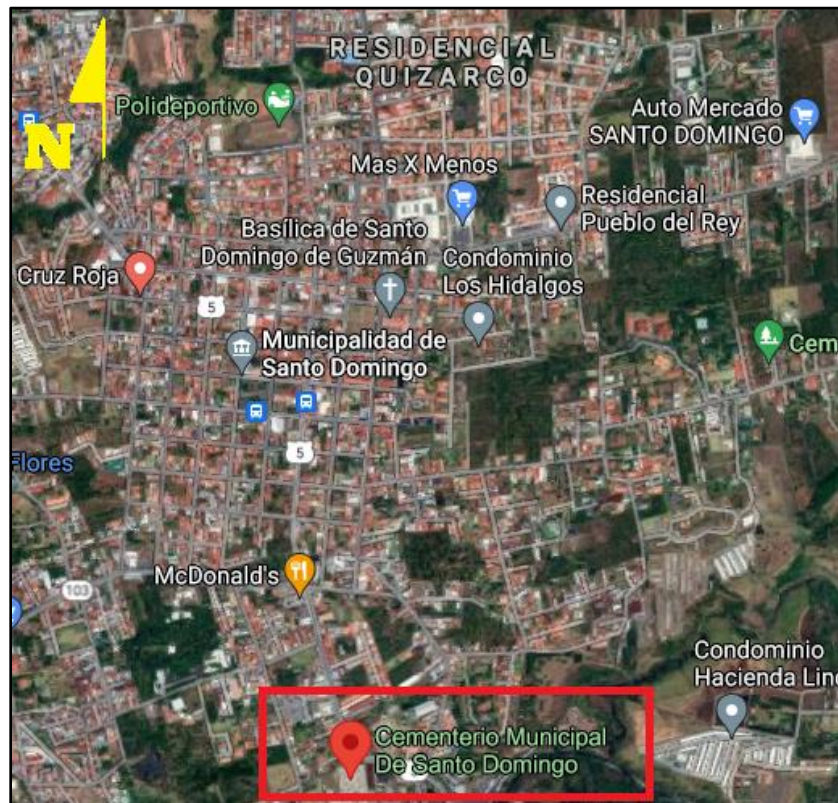


Figura 17. Ubicación de la estación 4

Fuente: Google Earth

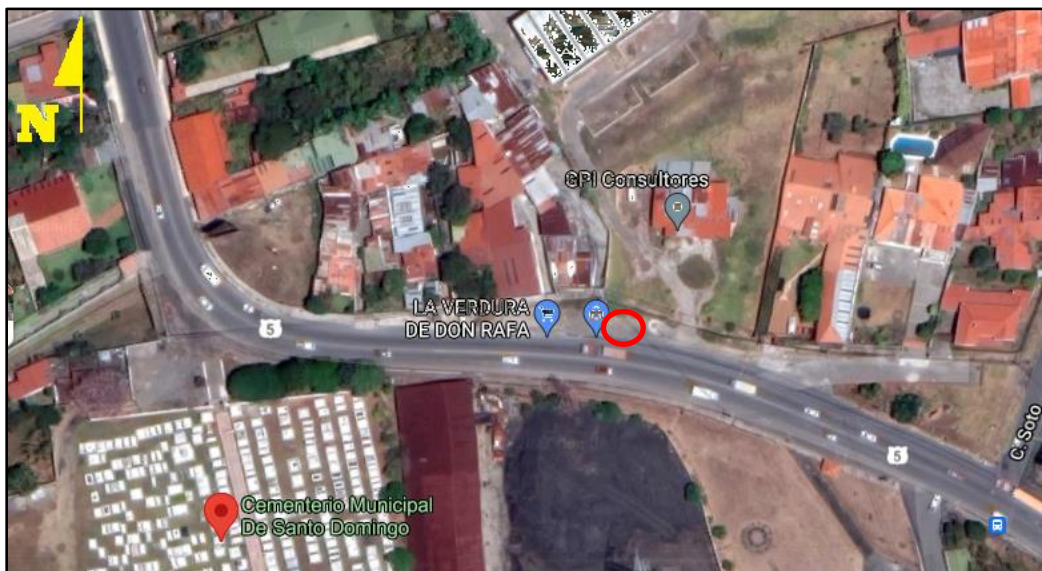


Figura 18. Ubicación del equipo estación 4

Fuente: Google Earth

- Tramo 5:
 - Provincia: Heredia.
 - Cantón: Heredia.
 - Distrito: San Francisco.
 - Ruta: 3
 - Frente a Condominio Hacienda San Agustín, costado sur de la carretera.
 - Tramo con pendiente pronunciada, con espacio para colocar el equipo. Existen condominios a ambos lados de la carretera, así como locales comerciales a ocho metros de distancia.
 - Este punto estaba rodeado por losa de concreto y entre el equipo y la calzada únicamente se encontraba el espaldón y la acera, sobre la cual estaba colocado el equipo. La calzada contaba con cuatro carriles y no existía isla medianera.

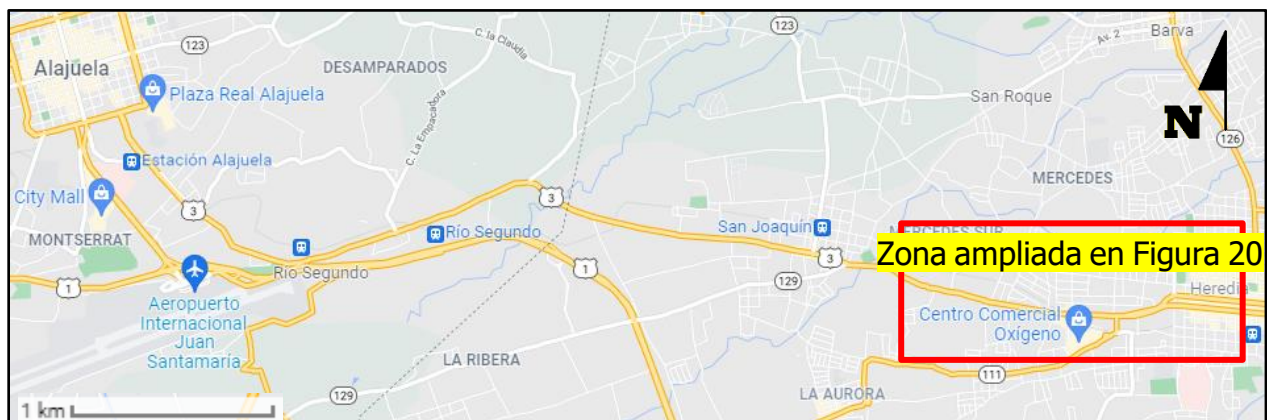


Figura 19. Puntos de referencia a estación 5

Fuente: Google Maps

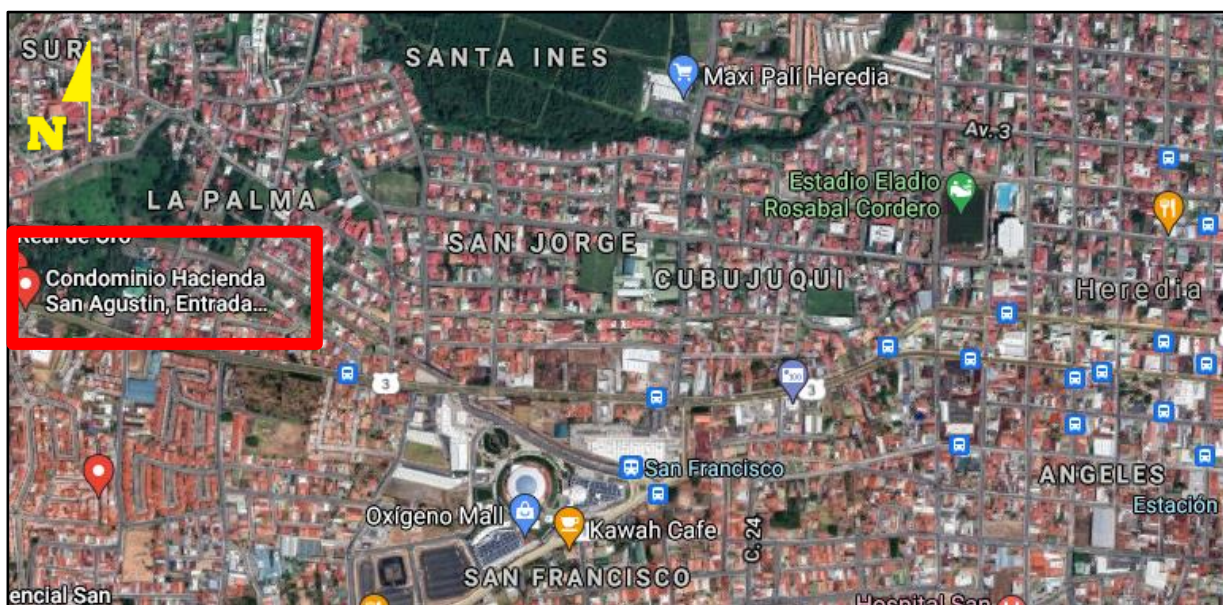


Figura 20. Ubicación de la estación 5

Fuente: Google Earth



Figura 21. Ubicación del equipo estación 5

Fuente: Google Earth

- Tramo 6:
 - Provincia: San José.
 - Cantón: Montes de Oca.
 - Distrito: San Pedro.
 - Ruta: 39.
 - 100 metros sur de Autos M y R.
 - Tramo con pendiente con suficiente espacio para colocar equipo. Existen focos poblacionales alrededor del punto de medición, además de comercios a aproximadamente 20 metros de distancia.
 - Este punto contaba con una peculiaridad y es que en medio de los dos carriles existía una medianera que estaba invadida por maleza baja, sin barrera vehicular.

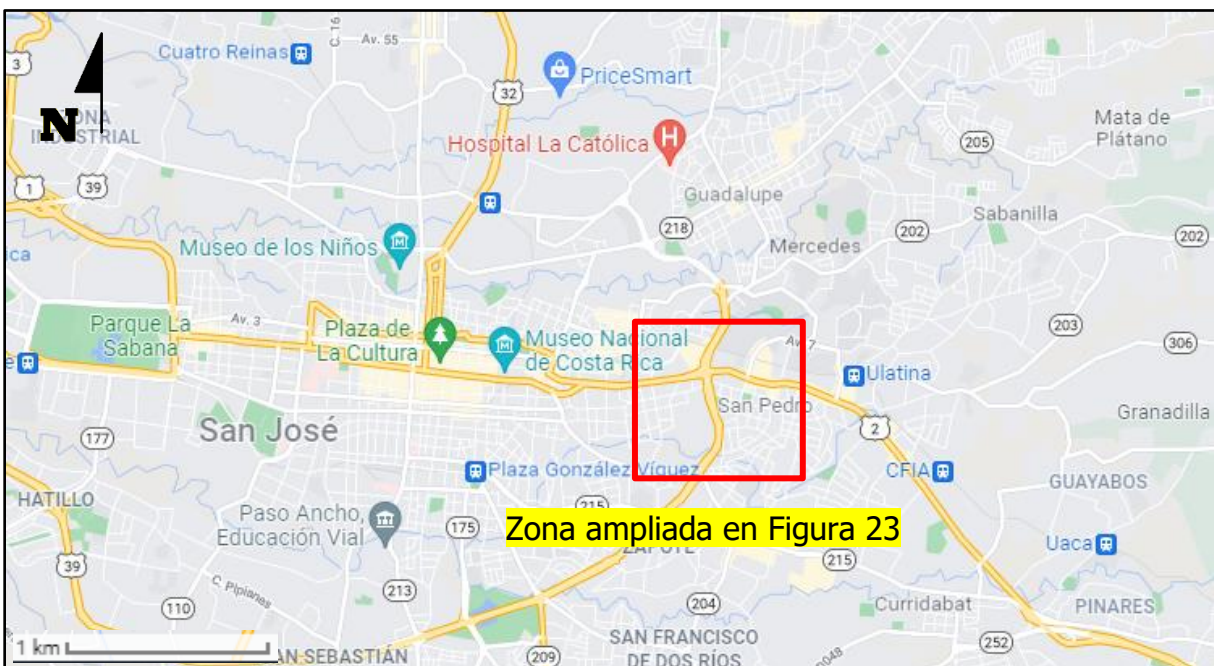


Figura 22. Puntos de referencia a estación 6

Fuente: Google Maps

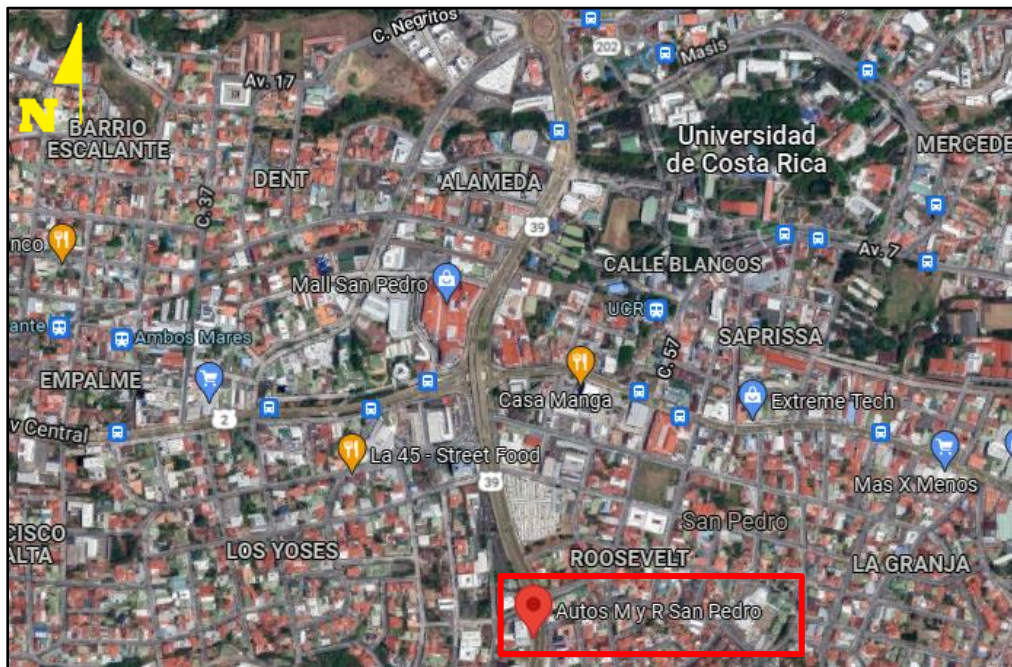


Figura 23. Ubicación de la estación 6

Fuente: Google Earth



Figura 24. Ubicación del equipo estación 6

Fuente: Google Earth

El registro fotográfico de los tramos se encuentra en el ANEXO II.

Para el estudio, se realizaron tres muestreos (todo el procedimiento) en tres días y horas diferentes, con el fin de cubrir mayores variaciones en diferentes horas del día y días de la semana.

Las características de los tramos se pueden encontrar en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Características de los tramos

Tramo	Parámetro							
	Carriles	TPDA ¹ (veh/día)	Límite de velocidad (km/h) ²	Ancho de calzada (m)	Pendiente (%)	Pavimento	Suelo circundante	T. de muestreo (min)
1	4	45 430	80	15.6	0.3	Bituminoso permeable	Grava con maleza (70 cm)	22
2	4	51 372	80	24.6	0.5	Bituminoso permeable	Concreto	22
3	4	35 138	80	21	2.2	Bituminoso permeable	Grava	23
4	2	16 340	60	7.6	12.6	Bituminoso permeable	Grava y concreto	26
5	4	32 080	60	12	4	Bituminoso permeable	Concreto	23
6	5	69 193	80	21.5	5.6	Bituminoso permeable	Maleza baja	21

Los valores de ancho de calzada y de pendiente se toman con ayuda de softwares de información geográfica, tales como Google Earth , obteniendo de estos los perfiles de las carreteras y midiendo la pendiente en el tramo de estudio. El tiempo de muestreo se obtiene con base en lo recomendado por el manual CORTN, en su párrafo 41.2, el cual especifica cómo obtener el tiempo de muestreo por medio de la siguiente fórmula.

¹ Los valores se toman con base en los reportes generados por la Secretaría de Planificación Sectorial. Se utilizan los valores del TPDA para el 2019, exceptuando los tramos 4 y 6, los cuales presentan datos del año 2016 y 2015 respectivamente.

² Los valores se toman con base en el GeoPortal del MOPT (mapa de velocidades) y revisión de sitio (demarcación y rótulos)

$$t_{min} = \frac{4000}{q} + \frac{120}{r} [min] \quad (19)$$

De donde q es el flujo vehicular por hora, cuya restricción es que el flujo debe ser mayor a 100 veh/h y r es la cantidad de muestras por minuto, que no debe ser inferior a 5 muestras. Para efectos de este estudio, se toma el TPDA y se divide entre 24 horas para obtener el valor de q para cada tramo y se utilizan 6 muestras por minuto, para así cumplir con el mínimo establecido por el manual y que sea fácil de contabilizar los intervalos de tiempo (una muestra cada 10 segundos) dado que la medición se realiza manualmente. Además, el manual de la FHWA pide también que el muestreo debe ser por un período de entre 15 y 20 minutos o más en caso de que la variación en los decibelios sea mayor a 10 dBA y menor a 30 dBA que, como se observa en los cuadros de mediciones de campo, todas las medidas oscilan entre 50 y 80 dBA.

2.2 Toma de datos experimentales

Los datos en bruto y procesados se pueden consultar en el ANEXO I y ANEXO IV respectivamente ANEXO . El procesamiento de los datos (suma y ponderación de mediciones) se llevó a cabo de acuerdo a lo establecido en el marco teórico. En este apartado se muestran únicamente los resultados obtenidos a la hora de procesar los datos.

2.2.1 Datos obtenidos en el tramo 1 (Alajuela, El Coyo):

Cuadro 13. Características del sitio a la hora de medir en el tramo 1

Variable	Valor de variable				
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Promedio	Desv. Estándar
Fecha	20/8/2021	23/8/2021	25/8/2021	-	-
Hora de inicio	08:15	10:00	08:20	-	-
Dist. del equipo a la calzada (m)	6	6	6	6	0
Altura (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	0
Tiempo	Soleado	Nublado	Nublado	-	-
Temperatura (°C)	25	24	22	24	1.53
Velocidad de circulación medida (km/h)	83 (70 pesados)	83 (70 pesados)	82 (70 pesados)	83 (70 pesados)	0.58 (0 para pesados)

Cuadro 14. Nivel sonoro equivalente por muestra en el tramo 1

Muestra	Sonómetro digital		Sonómetro analógico	
	L _{eq} (dBA)	L ₁₀ (dBA)	L _{eq} (dBA)	L ₁₀ (dBA)
1	78.2	81.4	78.0	81.0
2	77.9	80.9	77.8	80.9
3	77.8	80.4	77.6	80.7
Ponderado	78.0	80.9	77.8	80.9

2.2.2 Datos obtenidos en el tramo 2 (La Unión, Cartago):

Cuadro 15. Características del sitio a la hora de medir en el tramo 2

Variable	Valor de variable				
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Promedio	Desv. Estándar
Fecha	30/8/2021	31/8/2021	01/9/2021	-	-
Hora de inicio	09:00	08:00	08:30	-	-
Dist. del equipo a la calzada (m)	6	6	6	6	0
Altura (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	0
Tiempo	Nublado	Nublado	Soleado	-	-
Temperatura (°C)	22	23	24	23	1.00
Velocidad de circulación medida (km/h)	70 (70 pesados)	70 (70 pesados)	70 (70 pesados)	70 (70 pesados)	0 (0 para pesados)

Cuadro 16. Nivel sonoro equivalente por muestra en el tramo 2

Muestra	Sonómetro digital		Sonómetro analógico	
	L _{eq} (dBA)	L ₁₀ (dBA)	L _{eq} (dBA)	L ₁₀ (dBA)
1	80.7	82.5	79.6	82.0
2	77.1	80.9	79.7	81.0
3	78.1	80.3	81.0	81.7
Ponderado	78.9	81.2	80.2	81.6

2.2.3 Datos obtenidos en el tramo 3 (Tibás, San José):

Cuadro 17. Características del sitio a la hora de medir en el tramo 3

Variable	Valor de variable				
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Promedio	Desv. Estándar
Fecha	02/9/2021	03/9/2021	04/9/2021	-	-
Hora de inicio	10:30	08:30	10:30	-	-
Dist. del equipo a la calzada (m)	6	6	6	6	0
Altura (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	0
Tiempo	Soleado	Nublado	Soleado	-	-
Temperatura (°C)	24	25	26	25	1.00
Velocidad de circulación medida (km/h)	80 (80 pesados)	80 (80 pesados)	80 (80 pesados)	80 (80 pesados)	0 (0 para pesados)

Cuadro 18. Nivel sonoro equivalente por muestra en el tramo 3

Muestra	Sonómetro digital		Sonómetro analógico	
	L _{eq} (dBA)	L ₁₀ (dBA)	L _{eq} (dBA)	L ₁₀ (dBA)
1	77.2	79.1	80.4	81.0
2	77.7	80.7	76.8	80.0
3	77.5	80.0	77.4	81.0
Ponderado	77.5	79.9	78.5	80.7

2.2.4 Datos obtenidos en el tramo 4 (Santo Domingo, Heredia):

Cuadro 19. Características del sitio a la hora de medir en el tramo 4

Variable	Valor de variable				
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Promedio	Desv. Estándar
Fecha	27/8/2021	30/8/2021	31/8/2021	-	-
Hora de inicio	08:30	11:00	10:30	-	-
Dist. del equipo a la calzada (m)	6	6	6	6	0
Altura (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	0
Tiempo	Soleado	Nublado	Nublado	-	-
Temperatura (°C)	22	23	21	22	1.00
Velocidad de circulación medida (km/h)	50 (25 pesados)	50 (25 pesados)	50 (25 pesados)	50 (25 pesados)	0 (0 para pesados)

Cuadro 20. Nivel sonoro equivalente por muestra en el tramo 4

Muestra	Sonómetro digital		Sonómetro analógico	
	L _{eq} (dBA)	L ₁₀ (dBA)	L _{eq} (dBA)	L ₁₀ (dBA)
1	76.8	78.1	78.9	78.0
2	75.8	77.7	82.1	77.5
3	74.4	77.7	78.1	80.0
Ponderado	75.8	77.8	80.1	78.5

2.2.5 Datos obtenidos en el tramo 5 (San Francisco, Heredia):

Cuadro 21. Características del sitio a la hora de medir en el tramo 5

Variable	Valor de variable				
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Promedio	Desv. Estándar
Fecha	20/8/2021	23/8/2021	26/8/2021	-	-
Hora de inicio	10:00	08:30	08:00	-	-
Dist. del equipo a la calzada (m)	6	6	6	6	0
Altura (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	0
Tiempo	Soleado	Nublado	Soleado	-	-
Temperatura (°C)	24	22	23	23	1.00
Velocidad de circulación medida (km/h)	60 (40 pesados)	55 (40 pesados)	60 (40 pesados)	58 (40 pesados)	2.89 (0 para pesados)

Cuadro 22. Nivel sonoro equivalente por muestra en el tramo 5

Muestra	Sonómetro digital		Sonómetro analógico	
	L _{eq} (dBA)	L ₁₀ (dBA)	L _{eq} (dBA)	L ₁₀ (dBA)
1	74.6	76.6	74.9	78.0
2	77.6	80.6	75.6	79.0
3	77.2	79.2	74.6	78.3
Ponderado	76.7	78.8	75.0	78.4

2.2.6 Datos obtenidos en el tramo 6 (Montes de Oca, San José):

Cuadro 23. Características del sitio a la hora de medir en el tramo 6

Variable	Valor de variable				
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Promedio	Desv. Estándar
Fecha	01/9/2021	02/9/2021	06/9/2021	-	-
Hora de inicio	11:30	08:00	08:30	-	-
Dist. del equipo a la calzada (m)	6	6	6	6	0
Altura (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	0
Tiempo	Soleado	Soleado	Nublado	-	-
Temperatura (°C)	26	24	23	24	1.53
Velocidad de circulación medida (km/h)	70 (60 pesados)	70 (60 pesados)	70 (60 pesados)	70 (60 pesados)	0 (0 para pesados)

Cuadro 24. Nivel sonoro equivalente por muestra en el tramo 6

Muestra	Sonómetro digital		Sonómetro analógico	
	L _{eq} (dBA)	L ₁₀ (dBA)	L _{eq} (dBA)	L ₁₀ (dBA)
1	74.1	77.5	74.8	78.0
2	74.8	77.0	77.4	79.5
3	77.1	78.8	77.0	79.5
Ponderado	75.5	77.7	76.5	79.0

Para la obtención de estos datos, se utilizó una cinta métrica para cuantificar la ubicación del equipo y su altura. Para la ubicación, se toma la medida entre el punto justo debajo del sonómetro y la línea de borde de la calzada más próxima, horizontal al suelo y perpendicular a dicha línea. Para la temperatura se utilizó un termómetro digital al momento de iniciar el muestreo. Para la velocidad, se utilizó la recomendación dada por

el manual de la FHWA, inciso 9 de la sección 4.5.1., donde reza “si no es posible medir con pistola de velocidad, conduzca en ambas direcciones lo más cercano al tiempo de medición y trate de alcanzar la velocidad promedio del flujo vehicular.” Por tanto, al no contar con pistola, se utiliza el vehículo personal para realizar la medición de velocidad promedio, con ayuda del velocímetro del propio vehículo.

Cuadro 25. Resumen de los valores ponderados en campo

Tramo	Sonómetro digital		Sonómetro analógico		Desv. Estándar L_{eq}	Desv. Estándar L_{10}
	L_{eq} (dBA)	L_{10} (dBA)	L_{eq} (dBA)	L_{10} (dBA)		
1	78.0	80.9	77.8	80.9	0.14	0
2	78.9	81.2	80.2	81.6	0.92	0.28
3	77.5	79.9	78.5	80.7	0.71	0.57
4	75.8	77.8	80.1	78.5	3.04	0.49
5	76.7	78.8	75.0	78.4	1.20	0.28
6	75.5	77.7	76.5	79.0	0.71	0.92

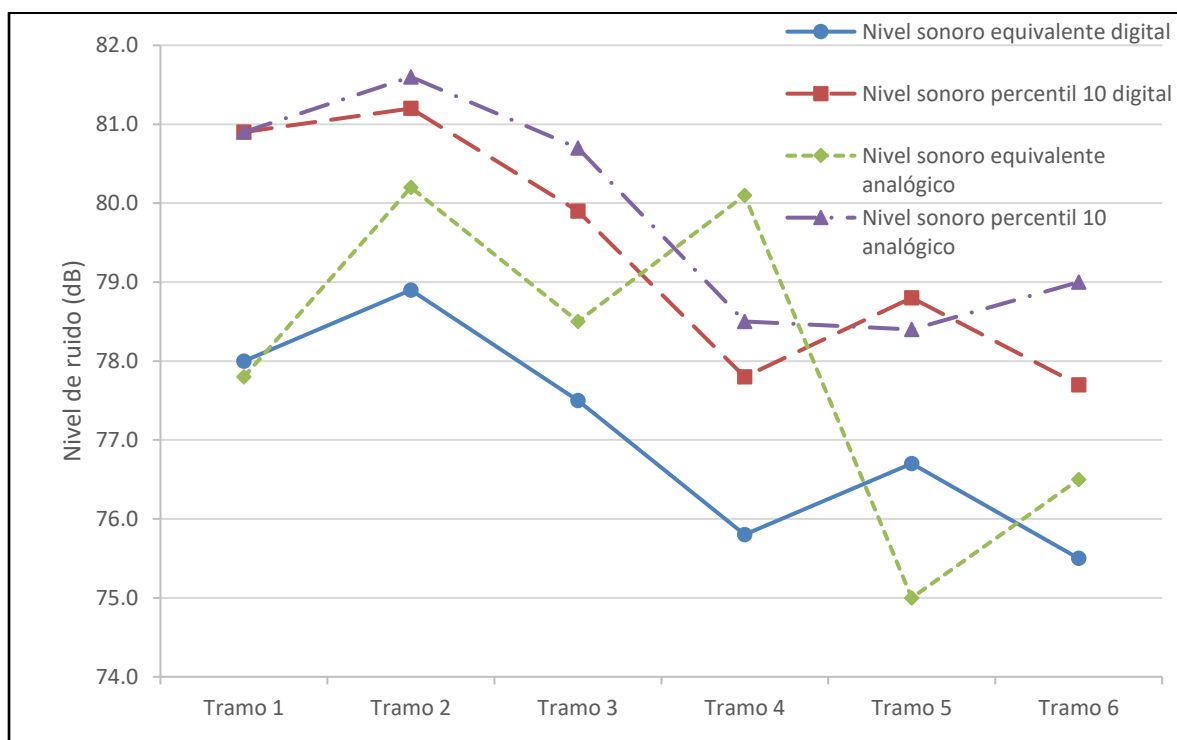


Figura 25. Gráfico comparativo de los valores de campo

Capítulo 3. Análisis de resultados

3.1 Evaluación de los modelos con los datos experimentales

3.1.1 Modelado de ruido con FHWA

Para la evaluación del modelo norteamericano, se utilizó el procedimiento y las reglas descritas en la sección 1.5.5.1 de este documento. Se muestra el procedimiento de cada tramo por aparte, al final, está el cuadro resumen que contiene los valores ponderados de interés. Una vez evaluado el modelo, se obtuvieron los siguientes resultados:

Cuadro 26. Variables a evaluar en el modelo para tramo 1

Distancia de referencia (m)	15.2
Distancia de medición (m)	13.8
α	0.5
Pendiente (%)	0.3

Cuadro 27. Evaluación del modelo FHWA para tramo 1

Tipo de vehículo	Velocidad (km/h)	Flujo vehicular (veh/h)	Nivel eq. emisión (dBA)	Correcc. Tráfico (dBA)	Correcc. Distancia (dBA)	Correcc. Pendiente (dBA)	Nivel sonido eq. (dBA)
Livianos	82.0	1501	70.5	-0.6	0.6	0.0	70.6
Medianos	82.0	220	81.3	-8.9	0.6	0.0	73.0
Pesados	70.0	171	83.9	-9.3	0.6	0.0	75.2
Ponderado total							78.1

Cuadro 28. Variables a evaluar en el modelo para tramo 2

Distancia de referencia (m)	15.2
Distancia de medición (m)	18.3
α	0.5
Pendiente (%)	0.5

Cuadro 29. Evaluación del modelo FHWA para tramo 2

Tipo de vehículo	Velocidad (km/h)	Flujo vehicular (veh/h)	Nivel eq. emisión (dBA)	Correcc. Tráfico (dBA)	Correcc. Distancia (dBA)	Correcc. Pendiente (dBA)	Nivel sonido eq. (dBA)
Livianos	70.0	1792	67.9	0.9	-1.2	0.0	67.6
Medianos	70.0	247	78.9	-7.7	-1.2	0.0	70.0
Pesados	70.0	101	83.9	-11.6	-1.2	0.0	71.1
Ponderado total							74.6

Cuadro 30. Variables a evaluar en el modelo para tramo 3

Distancia de referencia (m)	15.2
Distancia de medición (m)	16.5
α	0.5
Pendiente (%)	2.2

Cuadro 31. Evaluación del modelo FHWA para tramo 3

Tipo de vehículo	Velocidad (km/h)	Flujo vehicular (veh/h)	Nivel eq. emisión (dBA)	Correcc. Tráfico (dBA)	Correcc. Distancia (dBA)	Correcc. Pendiente (dBA)	Nivel sonido eq. (dBA)
Livianos	80.0	1271	70.1	-1.2	-0.5	2.0	70.4
Medianos	80.0	80	80.9	-13.2	-0.5	2.0	69.2
Pesados	80.0	113	85.3	-11.7	-0.5	2.0	75.1
Ponderado total							77.1

Cuadro 32. Variables a evaluar en el modelo para tramo 4

Distancia de referencia (m)	15.2
Distancia de medición (m)	9.8
α	0.5
Pendiente (%)	12.6

Cuadro 33. Evaluación del modelo FHWA para tramo 4

Tipo de vehículo	Velocidad (km/h)	Flujo vehicular (veh/h)	Nivel eq. emisión (dBA)	Correcc. Tráfico (dBA)	Correcc. Distancia (dBA)	Correcc. Pendiente (dBA)	Nivel sonido eq. (dBA)
Livianos	50.0	539	62.3	-2.9	2.9	5.0	67.3
Medianos	50.0	137	74.0	-8.8	2.9	5.0	73.0
Pesados	25.0	5	72.9	-20.0	2.9	5.0	60.8
Ponderado total							74.3

Cuadro 34. Variables a evaluar en el modelo para tramo 5

Distancia de referencia (m)	15.2
Distancia de medición (m)	12
α	0.5
Pendiente (%)	4

Cuadro 35. Evaluación del modelo FHWA para tramo 5

Tipo de vehículo	Velocidad (km/h)	Flujo vehicular (veh/h)	Nivel eq. emisión (dBA)	Correcc. Tráfico (dBA)	Correcc. Distancia (dBA)	Correcc. Pendiente (dBA)	Nivel sonido eq. (dBA)
Livianos	60.0	1191	65.3	-0.2	1.5	2.0	68.7
Medianos	60.0	114	76.7	-10.4	1.5	2.0	69.8
Pesados	40.0	32	77.9	-14.2	1.5	2.0	67.2
Ponderado total							73.5

Cuadro 36. Variables a evaluar en el modelo para tramo 6

Distancia de referencia (m)	15.2
Distancia de medición (m)	16.75
α	0.5
Pendiente (%)	5.6

Cuadro 37. Evaluación del modelo FHWA para tramo 6

Tipo de vehículo	Velocidad (km/h)	Flujo vehicular (veh/h)	Nivel eq. emisión (dBA)	Correcc. Tráfico (dBA)	Correcc. Distancia (dBA)	Correcc. Pendiente (dBA)	Nivel sonido eq. (dBA)
Livianos	70.0	2707	67.9	2.7	-0.6	3.0	73.0
Medianos	70.0	148	78.9	-9.9	-0.6	3.0	71.4
Pesados	60.0	29	82.2	-16.4	-0.6	3.0	68.2
Ponderado total							76.0

Cuadro 38. Resumen de los valores ponderados por tramo

Tramo	L_{Aeq}
1	78.1
2	74.6
3	77.1
4	74.3
5	73.5
6	76.0

3.1.2 Modelado de ruido con CORTN

De igual manera que con el modelo anterior, se procede de acuerdo a lo descrito en la sección 1.5.5.2 de este documento. Dado que para todos los muestreos se usan las mismas variables, únicamente se mostrará un resultado, que es igual para los tres muestreos y por lo tanto, igual al ponderado total del tramo. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Cuadro 39. Variables a evaluar en el modelo CORTN

Parámetro	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6
Vel. Flujo (km/h)	70	80	80	50	50	80
Flujo total (veh/h)	1893	2141	1464	681	1337	2883
Flujo pesados (veh/h)	743	700	407	305	378	527
Porc. Pesados (%)	39.3	32.7	27.8	44.8	28.3	18.3
Pendiente (%)	0.3	0.5	2.2	12.6	4.0	5.6
Pav. Permeable	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Altura (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Dist. equipo (m)	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Alt. Propagación (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Porc. Suelo absorb. (%)	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Cuadro 40. Evaluación del modelo CORTN

Tramo	Nivel base (dBA)	Correcc. Flujo (dBA)	Correcc. pendiente (dBA)	Correcc. pavimento (dBA)	Correcc. distancia(dBA)	Correcc. propagación (dBA)	L ₁₀ (dBA)
1	75.2	5.3	0.1	-1.0	1.5	-0.4	80.6
2	75.7	5.4	0.2	-3.5	1.5	0.0	79.2
3	74.1	4.9	0.7	-3.5	1.5	0.0	77.6
4	70.7	4.6	3.8	-1.0	1.5	0.0	79.6
5	73.7	3.0	1.2	-1.0	1.5	0.0	78.4
6	77.0	3.8	1.7	-3.5	1.5	-0.5	80.0

3.1.3 Modelado de ruido con Valdivia

De igual manera que con el modelo anterior, se procede de acuerdo a lo descrito en la sección 1.5.5.3 de este documento. De igual manera, todos los muestreos usan las mismas variables, por tanto, únicamente se mostrará un resultado, que es igual para los tres muestreos y al ponderado total del tramo. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Cuadro 41. Evaluación del modelo de Valdivia para el tramo 1

Tipo de vehículo	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6
Flujo de livianos (veh/h)	1326	1617	1164	457	1075	2531
Flujo de pesados (veh/h)	523	443	272	168	223	300
Flujo de autobuses (veh/h)	45	81	28	56	39	53
Correcc. Velocidad (dBA)	0	2	4	0	0	2
Correcc. pavimento (dBA)	4	0	0	0	0	0
Vel. Media (km/h)	83	70	80	37.5	45	65
Pavimento	Rugoso	Rugoso	Rugoso	Rugoso	Rugoso	Rugoso
Distancia a la medición (m)	13.8	18.3	16.5	9.8	12	16.75
L_{aeq} a 25 m de centro	75.7	73.5	73.4	67.3	68.9	73.1
L_{aeq} corregido	80.8	76.2	77.0	75.4	75.2	76.6

El ejemplo de todos los cálculos realizados para cada modelo se puede consultar en el ANEXO IV.

3.2 Validación de cada modelo

Para concluir si un modelo es candidato o no a ser utilizado, o al menos recomendado, se realiza la comparación entre los valores obtenidos en la etapa de medición de campo y los valores producto de la evaluación de los modelos.

Para tener una mejor idea y comparar los valores obtenidos con cada modelo y campo, se presentan los siguientes cuadros y gráficos resumen.

Cuadro 42. Resumen de los valores obtenidos en modelos y campo

Tramo	Sonómetro digital		Sonómetro analógico		FHWA (dBA)	Valdivia (dBA)	CORTN (dB)
	Leq (dBA)	L ₁₀ (dB)	Leq (dBA)	L ₁₀ (dB)			
1	78.0	80.9	77.8	80.9	78.1	80.8	80.6
2	78.9	81.2	80.2	81.6	74.6	76.2	79.2
3	77.5	79.9	78.5	80.7	77.1	77.0	77.6
4	75.8	77.8	80.1	78.5	74.3	75.4	79.6
5	76.7	78.8	75.0	78.4	73.5	75.2	78.4
6	75.5	77.7	76.5	79.0	76.0	76.6	80.0

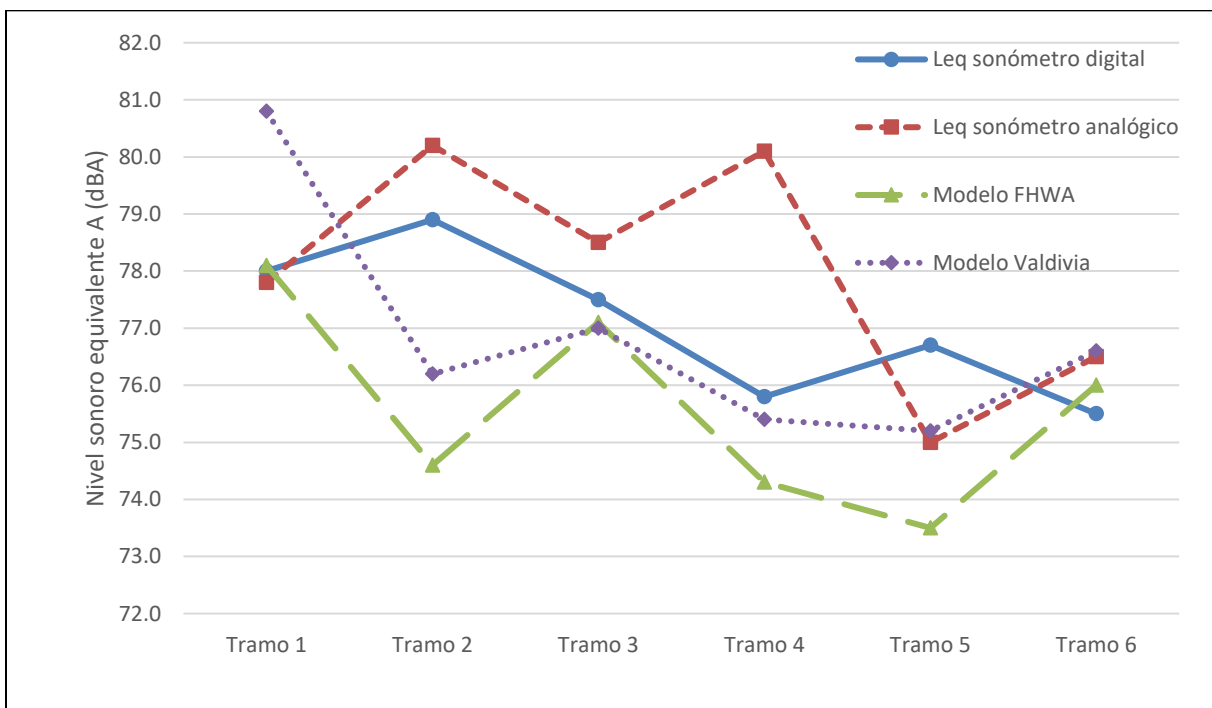


Figura 26. Comparación gráfica de los resultados obtenidos en campo y modelados L_{eq}

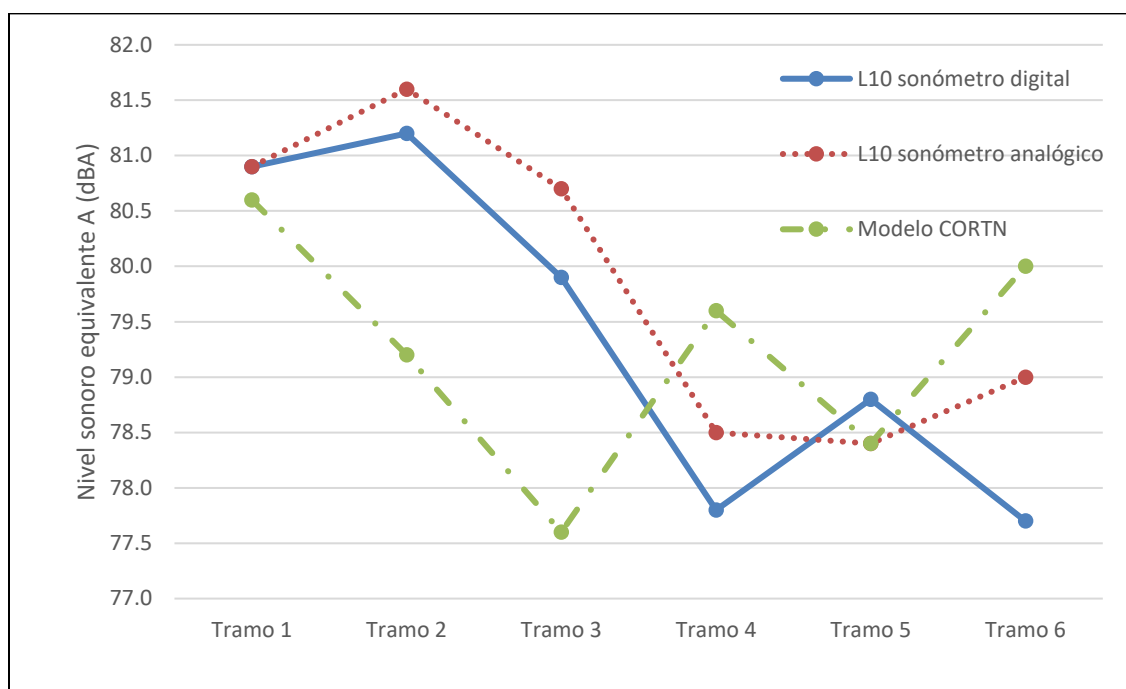


Figura 27. Comparación gráfica de resultados obtenidos en campo y modelado L_{10}

Para validar los modelos contra las mediciones realizadas en campo, se consulta cada manual con el fin de buscar si el propio manual tiene su límite permisible o porcentaje de error máximo.

Para el manual de los Estados Unidos, es decir, el de la FHWA, para que el modelado sea válido, es necesario que la diferencia entre las mediciones teóricas (modelado) contra la experimental (mediciones en campo) sea de ± 3 dBA para cada tramo en estudio.

De igual manera, el modelo inglés CORTN cuenta con su propio límite permisible para poder decidir si el modelo es válido o no. Dicho límite se encuentra en ± 2.5 dBA, pudiendo ampliar este a ± 5 dBA si se utiliza una grabadora de sonido en lugar de los sonómetros. Como este estudio se realiza con sonómetros, el límite máximo permisible para validar el modelo será de ± 2.5 dBA.

Con el modelo chileno no sucede lo mismo, pues, a pesar de consultar el manual original, no se encontró un límite máximo ni de decibelios ni de porcentaje para realizar la

comparación. Es por esto que se utiliza un límite máximo de ± 2.5 dBA para validar el modelo de forma estricta, apoyado en el límite propuesto por el CORTN y además, utilizar el límite menor entre los otros dos modelos implica un menor error entre el valor obtenido en campo y el valor teórico del modelado.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos a la hora de comparar los valores obtenidos en campo con los del modelado.

Cuadro 43. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro digital para el tramo 1

Muestra	L _{eq} (dBA)					L ₁₀ (dBA)		
	Campo	FHWA	Diferencia	Valdivia	Diferencia	Campo	CORTN	Diferencia
1	78.2	78.1	0.1	80.8	2.6	81.4	80.6	-0.8
2	77.9	78.1	-0.2	80.8	2.9	80.9	80.6	-0.3
3	77.8	78.1	-0.3	80.8	3.0	80.4	80.6	0.2
Ponderado	78.0	78.1	-0.1	80.8	2.8	80.9	80.6	-0.3

Cuadro 44. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro analógico para el tramo 1

Muestra	L _{eq} (dBA)					L ₁₀ (dBA)		
	Campo	FHWA	Diferencia	Valdivia	Diferencia	Campo	CORTN	Diferencia
1	78.0	78.1	-0.1	80.8	2.8	81.0	80.6	-0.4
2	77.8	78.1	-0.3	80.8	3.0	80.9	80.6	-0.3
3	77.6	78.1	-0.5	80.8	3.2	80.7	80.6	-0.1
Ponderado	77.8	78.1	-0.3	80.8	3.0	80.9	80.6	-0.3

Cuadro 45. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro digital para el tramo 2

Muestra	L _{eq} (dBA)					L ₁₀ (dBA)		
	Campo	FHWA	Diferencia	Valdivia	Diferencia	Campo	CORTN	Diferencia
1	80.7	74.6	-6.1	76.2	-4.5	82.5	79.2	-3.3
2	77.1	74.6	-2.5	76.2	-0.9	80.9	79.2	-1.7
3	78.1	74.6	-3.5	76.2	-1.9	80.3	79.2	-1.1
Ponderado	78.9	74.6	-4.3	76.2	-2.7	81.2	79.2	-2.0

Cuadro 46. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro analógico para el tramo 2

Muestra	L _{eq} (dBA)					L ₁₀ (dBA)		
	Campo	FHWA	Diferencia	Valdivia	Diferencia	Campo	CORTN	Diferencia
1	79.6	74.6	-5.0	76.2	-3.4	82.0	79.2	-2.8
2	79.7	74.6	-5.1	76.2	-3.5	81.0	79.2	-1.8
3	81.0	74.6	-6.4	76.2	-4.8	81.7	79.2	-2.5
Ponderado	80.2	74.6	-5.6	76.2	-4.0	81.6	79.2	-2.4

Cuadro 47. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro digital para el tramo 3

Muestra	L _{eq} (dBA)					L ₁₀ (dBA)		
	Campo	FHWA	Diferencia	Valdivia	Diferencia	Campo	CORTN	Diferencia
1	77.2	77.1	-0.1	77.0	-0.2	79.1	77.6	-1.5
2	77.7	77.1	-0.6	77.0	-0.7	80.7	77.6	-3.1
3	77.5	77.1	-0.4	77.0	-0.5	80.0	77.6	-2.4
Ponderado	77.5	77.1	-0.4	77.0	-0.5	79.9	77.6	-2.3

Cuadro 48. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro analógico para el tramo 3

Muestra	L _{eq} (dBA)					L ₁₀ (dBA)		
	Campo	FHWA	Diferencia	Valdivia	Diferencia	Campo	CORTN	Diferencia
1	80.4	77.1	-3.3	77.0	-3.4	81.0	77.6	-3.4
2	76.8	77.1	0.3	77.0	0.2	80.0	77.6	-2.4
3	77.4	77.1	-0.3	77.0	-0.4	81.0	77.6	-3.4
Ponderado	78.5	77.1	-1.4	77.0	-1.5	80.7	77.6	-3.1

Cuadro 49. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro digital para el tramo 4

Muestra	L _{eq} (dBA)					L ₁₀ (dBA)		
	Campo	FHWA	Diferencia	Valdivia	Diferencia	Campo	CORTN	Diferencia
1	76.8	74.3	-2.5	75.4	-1.4	78.1	79.6	1.5
2	75.8	74.3	-1.5	75.4	-0.4	77.7	79.6	1.9
3	74.4	74.3	-0.1	75.4	1.0	77.7	79.6	1.9
Ponderado	75.8	74.3	-1.5	75.4	-0.4	77.8	79.6	1.8

Cuadro 50. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro analógico para el tramo 4

Muestra	Leq (dBA)					L ₁₀ (dBA)		
	Campo	FHWA	Diferencia	Valdivia	Diferencia	Campo	CORTN	Diferencia
1	78.9	74.3	-4.6	75.4	-3.5	78.0	79.6	1.6
2	82.1	74.3	-7.8	75.4	-6.7	77.5	79.6	2.1
3	78.1	74.3	-3.8	75.4	-2.7	80.0	79.6	-0.4
Ponderado	80.1	74.3	-5.8	75.4	-4.7	78.5	79.6	1.1

Cuadro 51. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro digital para el tramo 5

Muestra	Leq (dBA)					L ₁₀ (dBA)		
	Campo	FHWA	Diferencia	Valdivia	Diferencia	Campo	CORTN	Diferencia
1	74.6	73.5	-1.1	75.2	0.6	76.6	78.4	1.8
2	77.6	73.5	-4.1	75.2	-2.4	80.6	78.4	-2.2
3	77.2	73.5	-3.7	75.2	-2.0	79.2	78.4	-0.8
Ponderado	76.7	73.5	-3.2	75.2	-1.5	78.8	78.4	-0.4

Cuadro 52. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro analógico para el tramo 5

Muestra	Leq (dBA)					L ₁₀ (dBA)		
	Campo	FHWA	Diferencia	Valdivia	Diferencia	Campo	CORTN	Diferencia
1	74.9	73.5	-1.4	75.2	0.3	78.0	78.4	0.4
2	75.6	73.5	-2.1	75.2	-0.4	79.0	78.4	-0.6
3	74.6	73.5	-1.1	75.2	0.6	78.3	78.4	0.1
Ponderado	75.0	73.5	-1.5	75.2	0.2	78.4	78.4	0.0

Cuadro 53. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro digital para el tramo 6

Muestra	Leq (dBA)					L ₁₀ (dBA)		
	Campo	FHWA	Diferencia	Valdivia	Diferencia	Campo	CORTN	Diferencia
1	74.1	76.0	1.9	76.6	2.5	77.5	80.0	2.6
2	74.8	76.0	1.2	76.6	1.8	77.0	80.0	3.1
3	77.1	76.0	-1.1	76.6	-0.5	78.8	80.0	1.2
Ponderado	75.5	76.0	0.5	76.6	1.1	77.7	80.0	2.3

Cuadro 54. Comparación de resultados obtenidos con el sonómetro analógico para el tramo 6

Muestra	Leq (dBA)					L ₁₀ (dBA)		
	Campo	FHWA	Diferencia	Valdivia	Diferencia	Campo	CORTN	Diferencia
1	74.8	76.0	1.2	76.6	1.8	78.0	80.0	2.0
2	77.4	76.0	-1.4	76.6	-0.8	79.5	80.0	0.5
3	77.0	76.0	-1.0	76.6	-0.4	79.5	80.0	0.5
Ponderado	76.5	76.0	-0.5	76.6	0.1	79.0	80.0	1.0

Cuadro 55. Validación de cada modelo

Tramo	Sonómetro digital			Sonómetro analógico		
	FHWA	Valdivia	CORTN	FHWA	Valdivia	CORTN
1	-0.1	2.8	-0.3	-0.3	3.0	-0.3
2	-4.3	-2.7	-2.0	-5.6	-4.0	-2.4
3	-0.4	-0.5	-2.3	-1.4	-1.5	-3.1
4	-1.5	-0.4	1.8	-5.8	-4.7	1.1
5	-3.2	-1.5	-0.4	-1.5	0.2	0.0
6	0.5	1.1	2.3	-0.5	0.1	1.0

Donde:

 Cumple con el límite establecido por el manual, por lo tanto, es válido.

 No cumple con el límite establecido por el manual, por lo tanto, no es válido.

En el Cuadro 56 se presenta el porcentaje de error asociado a cada valor del modelo. Para parametrizar esta comparación, se separan los valores en tres grupos: válidos, posible validación y rechazados. El criterio de selección utilizado fue colocar límites de validación en cada categoría, de la siguiente manera:

- Válidos: Su porcentaje de error es inferior a 3%.
- Posible validación: Su porcentaje de error se encuentra entre 3% y 4%.
- Rechazo: Su porcentaje de error es superior al 4%.

Esta división se hizo tomando como referencia el valor de ± 3 dB con el que se valida el modelo FHWA, lo que equivaldría a un 4% de error para tomarlo como límite de posible validación del valor o de rechazo. Como límite inferior se estable el ± 2.5 dB utilizado para validar el modelo CORTN y Valdivia, lo que equivale a aproximadamente 3%.

La razón de realizar este análisis es mostrar que, a pesar de que las mediciones se realizaron bajo condiciones complicadas (restricción vehicular, falta de equipo, entre otras), puede ser posible que los valores obtenidos mejoren si el estudio se realiza de manera más detallada y con mejor instrumentación, lo que se puede traducir en una mejor validación de los modelos de predicción.

Cuadro 56. Porcentajes de error para cada validación

Tramo	Error con sonómetro digital (%)			Error con sonómetro analógico (%)		
	FHWA	Valdivia	CORTN	FHWA	Valdivia	CORTN
1	0.2	3.5	0.4	0.4	3.7	0.3
2	5.8	3.6	2.6	7.4	5.2	3.0
3	0.5	0.6	3.0	1.8	1.9	4.0
4	2.0	0.5	2.3	7.8	6.2	1.4
5	4.3	2.0	0.5	2.1	0.2	0.0
6	0.6	1.4	2.8	0.7	0.1	1.3

Donde:

 Cumple con el límite establecido por el manual, por lo tanto, es válido.

 El valor podría ser validado.

 No cumple con el límite establecido por el manual, por lo tanto, no es válido.

Aquí se puede observar que los valores que en el Cuadro 55 no se validaron, tiene un porcentaje de error que los mantiene fuera del rango aceptable, sin embargo, hay cuatro valores (tres del modelo de Valdivia y uno del CORTN) que cumplirían si el rango de

aceptación se aumentara a ± 3 dB o quizás puedan ser validados si las condiciones del estudio mejorasen.

De ser así y utilizando este nuevo criterio, el modelo CORTN se validaría para todos los tramos, el modelo de Valdivia pasaría de tener siete aciertos de doce a diez aciertos de doce, lo que supone un aumento de 24.97% en los datos validados (pasaría de 58.3% de validación a 83.3%). El que no mostró ninguna diferencia fue el modelo de la FHWA, el cual mantuvo como rechazados los mismos cuatro valores que con la categorización inicial, por lo tanto, este modelo no tuvo un buen rendimiento comparado con los otros dos.

Sin embargo, para poder realizar una validación sustentada estadísticamente, se realizó un análisis estadístico para cada modelo comparado con los muestreos de campo para cada tramo, con una significancia del 5%, con el fin de poder verificar si hay diferencia significativa. A continuación, se muestra el detalle de los resultados obtenidos. (Para los detalles, favor consultar el ANEXO V).

Hipótesis nula: No existe diferencia significativa entre los valores del modelo y de campo.

Hipótesis alternativa: Sí existe diferencia significativa entre los valores del modelo y campo.

Al rechazar la hipótesis nula, se confirma que sí existe una diferencia significativa entre los valores comparados. En el Cuadro 57 se observa si se rechaza o no la hipótesis nula para cada tramo.

Cuadro 57. Prueba estadística para los modelos

Tramo	Modelo		
	FHWA	Valdivia	CORTN
1	NO RECHAZO	RECHAZO	NO RECHAZO
2	RECHAZO	RECHAZO	RECHAZO
3	NO RECHAZO	NO RECHAZO	RECHAZO
4	NO RECHAZO	NO RECHAZO	NO RECHAZO
5	RECHAZO	NO RECHAZO	NO RECHAZO
6	NO RECHAZO	NO RECHAZO	NO RECHAZO

Apoyado en el cuadro anterior, podemos confirmar que existe evidencia suficiente para concluir que hay una diferencia significativa entre los valores obtenidos con los modelos y el valor obtenido en campo para los mismos valores que no fueron validados por medio de la diferencia en el Cuadro 55. Por lo tanto, podemos deducir estadísticamente que es correcto no validar los casos en los cuales los modelos presentaron una diferencia que excede el límite permitido por el manual.

Para poder realizar una comparación con los límites máximos de ruido dispuestos por el Ministerio de Salud y la Ley de Tránsito, se tomó como referencia la atenuación que puede sufrir el ruido desde la fuente de sonido hasta el punto más cercano de concentración humana (residencia o zona comercial), el cual será incluido en el cuadro como "Distancia". Para ello, se utiliza el siguiente cuadro comparativo:

Cuadro 58. Comparación con límites establecidos en Costa Rica

Tramo	Distancia (m)	Ruido en punto (dBA)	Ruido atenuado (dBA)	Límite por zona C.R. (dBA)	Límite vehicular C.R. (dBA)	Límite de ruido por EPA (dBA)	Límite de ruido en R.U. (dB) ³	Límite de ruido en Chile (dBA)
1	40	78.0	68.7	70	90	72	85	77
2	40	78.9	72.1	70	90	72	85	77
3	25	77.5	73.9	70	90	72	85	77
4	17	75.8	71.0	70	90	72	85	77
5	8	76.7	80.2	70	90	72	85	77
6	20	75.5	74.0	70	90	72	85	77

³ Este límite se compara con mediciones de L₁₀. Todos los valores obtenidos en los tramos son inferiores a 85 dB.

Donde:

 Cumple con el límite establecido.

 No cumple con el límite establecido.

El valor para el “Límite por zona” se toma como el máximo permitido por el reglamento, es decir, una zona mixta, el cual tiene como máximo 70 dBA. Queda evidenciado que únicamente se cumple para el tramo 1, ubicado a 40 metros del centro de la vía. Los restantes cinco tramos no cumplen, con una excepción del tramo 3, el cual cuenta con barreras de sonido a ambos lados de la carretera, por lo que sería necesario realizar la medición de ruido detrás de las barreras, con el fin de concluir si cumplen o no.

En el caso de la Ley de Tránsito, se toma el valor mínimo, que es 90 para automóviles en la mufla. Queda evidenciado que para el nivel ponderado de ruido a cierta distancia del conjunto vehicular sí se cumple con este límite, por lo que sí cumplirá con los demás. Es la única limitante que existe en Costa Rica para el ruido vehicular, por lo que es la única manera de tratar de tener una comparación entre lo obtenido con lo que dice o deja de establecer la reglamentación.

Sin embargo, hay que hacer la salvedad de que algunas mediciones en campo puntuales superaban los 90 dBA (consultar ANEXO I, estas fueron para vehículos pesados). El límite permitido por la Ley de Tránsito es de 96 dB en la mufla para los vehículos de carga pesada e incluso de 112 dB si están equipados con freno de motor.

En esta investigación se encontró que, a la distancia de medición (seis metros) el límite de 96 fue sobrepasado en varias ocasiones en los diferentes tramos, o al menos estuvieron cerca de sobrepasarse. En el tramo 1 existieron picos de 86 dB, en el caso del tramo 2 hubo ocho datos que estuvieron cerca de los 90 dB y dos que los sobrepasaron. Para el tramo 3, siete valores estuvieron cerca de los 90 dB y se sobrepasó en tres

ocasiones; en el tramo 4 se sobrepasó en dos ocasiones y se estuvo cerca en dos más; para el tramo 5 se sobrepasó en una ocasión y estuvo cerca en 10 ocasiones y para el tramo 6 estuvo cerca de sobrepasarse en cinco oportunidades.

Esta situación demuestra que a pesar de que el reglamento existe, aún hay situaciones en las que los picos de ruido se pueden percibir a cierta distancia y genera malestar para los vecinos de estos lugares, lo que deja en evidencia el poco interés de las autoridades en regular de manera más severa las emisiones de ruido de los vehículos.

Aunado a lo anterior, se observó que los límites de ruido propuestos en los países de los que son originarios los modelos son menores que los de Costa Rica, por lo que tampoco los niveles registrados en nuestras carreteras cumplirían con la normativa de otros países, lo que evidencia la poca importancia que se le da a este contaminante en nuestro país.

Una situación interesante es que para el tramo 5, los valores de las columnas tituladas "Ruido atenuado" aumentan en lugar de disminuir. Esto se explica debido a que el asentamiento humano más cercano a la carretera en cuestión está más cerca que el punto de medición, lo que implica un aumento en el nivel de ruido en lugar de una disminución en este.

3.3 Elección del modelo a utilizar

Como se puede observar en la sección anterior, los modelos tienen un límite permisible en el que se puede decir que son válidos o no. Para el caso del modelo de la Federal Highway Administration, se obtienen resultados buenos para cinco de los seis tramos. El único tramo que no se pudo validar con este modelo es el tramo 2 debido a que ninguno de los predictores pudo ser validado. Nótese que la mayoría de las diferencias son negativas, es decir, el valor obtenido con el modelo fue mayor que el obtenido en campo, lo que quiere decir que lo magnifica los niveles de ruido, lo que indica que el modelo tiene un comportamiento conservador.

Realizado un análisis tanto de datos como de situaciones del sitio, esta falla se puede deber a que, si bien es cierto el modelo toma en cuenta la distancia del centro de calzada al punto de medición, lo que permite incluir la isla separadora entre sentidos de circulación si es que la hay, no especifica qué tipo de isla exista o en qué estado se encuentra esta.

Esta puede ser una de las razones por las cuales no se pudo validar el modelo, dado que la isla separadora consta de barreras vehiculares y en medio una zona de césped el cual, a la hora de realizar las mediciones de campo, este se encontraba alto, aproximadamente un metro de altura, lo que pudo funcionar como una barrera de sonido (tanto las barandas metálicas como la maleza) que hiciera rebotar el ruido producido por el paso de vehículos que circulaban en el sentido que se realizó la medición, lo que genera un aumento en los registros.

La situación expuesta se evidencia en que tanto, para el sonómetro digital como el analógico, las diferencias son negativas, lo que quiere decir que el valor obtenido de las mediciones en campo fue mayor al obtenido con el modelo.

Otra peculiaridad es que para los tramos 4 y 5 hubo una variación con respecto al sonómetro utilizado. Esto se explica con mayor detalle más adelante, para hacer un solo análisis entre los dos instrumentos.

Para el modelo chileno, tenemos una situación similar a la del modelo estadounidense, dado que tampoco es posible validarlo para el tramo 2. Esto se puede deber a que, a pesar de ser un estudio por aparte y con su propio fundamento, es un modelo empírico basado en mediciones de campo y en los otros modelos a nivel mundial, como lo son el FHWA, el CORTN, RLS 90 alemán y principalmente influenciado por el modelo de Sánchez, modelo de origen español, el cual no toma en consideración detalles como el suelo circundante ni las barreras o separadores de sentidos de circulación.

De similar forma, existe una variación para el tramo 1 y el tramo 4 en cuanto al tipo de sonómetro utilizado. Sin embargo, para el caso de la variación del tramo 1, puede ser poco significativa, dado que la diferencia que se da es de 3.0 dBA, muy cercano a los 2.5 dBA propuestos como límite ante la falta de la existencia de este en el propio manual del modelo de Valdivia.

Para el modelo propuesto en el manual Calculation Of Road Traffic Noise sucede algo interesante y es que es el que mejor se ajusta de los tres modelos, con solamente una medición no validada para el tramo 3 con el sonómetro analógico, las demás se mantienen dentro de los límites propuestos por el mismo manual. Esto se debe a que, a pesar de ser un manual más antiguo que los otros dos, este modelo cuenta con correcciones más detalladas y tabuladas con respecto a los otros dos, lo que permite e indica que el modelo se desarrolló con mayor detalle y con los parámetros más controlados por parte del ente investigador del modelo.

A continuación, se resume la cantidad de validaciones por modelo

Cuadro 59. Resumen de la validación de los modelos

Modelo	Validaciones	% de acierto
FHWA	8/12	66.7 %
Valdivia	7/12	58.3 %
CORTN	11/12	91.7 %

Un detalle interesante es que no hubo variación significativa entre el uso de los sonómetros, dado que, para ambos instrumentos, se obtuvo exactamente la misma cantidad de mediciones no válidas, lo que nos hace pensar que no afecta si se usa uno o el otro.

Además de esto, se pudo comprobar estadísticamente que para los modelos no validados, efectivamente existe una diferencia significativa entre los valores obtenidos en campo y

los valores mostrados por el modelo, lo que permite confirmar que estos no son representativos para esas condiciones ni tramos.

Por lo tanto, se puede decir que el predictor que más se ajusta a la realidad de las carreteras estudiadas es el CORTN. Los otros modelos tienen un comportamiento bastante eficiente, sin embargo, su porcentaje de validez es más bajo que el del CORTN. Dado esto, se recomienda el uso del modelo inglés, por lo que no es necesario desarrollar un modelo propio. Para confirmar su validez a nivel nacional, se puede ampliar esta investigación con la aplicación del modelo a más puntos y que se tomen en cuenta carreteras fuera de la GAM o inclusive, de ser necesario se puede realizar una nueva calibración para que se adapte mejor a las condiciones de nuestro país.

Algunas de las fuentes de error que se pueden encontrar están:

- Definición más específica de los flujos vehiculares: Para el modelo FHWA y el de Valdivia, a pesar de que se especificaba un valor para diferenciar livianos de pesados, este no fue suficiente para poder determinar el porcentaje que corresponde a cada uno, pues en la documentación referente al TPDA, a pesar de que viene segmentado en 8 categorías vehiculares, no especifica pesos de cada categoría, por lo que es difícil asignar con certeza una categoría dentro de liviano o pesado (anteriormente se explicó lo que se hizo con el modelo Valdivia). Por lo tanto, se podría realizar el conteo más exacto de las cantidades de vehículos que pasan por el sitio y sus características, con el fin de que, a la hora de realizar la categorización, sea más sencillo determinar los porcentajes de vehículos según su categoría de peso, como lo piden los modelos.
- Disminución del TPDA debido a la restricción vehicular sanitaria por COVID-19 y variación con el tiempo: El TPDA utilizado es del año 2019 o anterior, por lo que puede ser que esté desactualizado, dado que el estudio se realizó en 2021.

Además, las mediciones se realizaron entre semana (de lunes a viernes) días en los cuales existía en Costa Rica la restricción sanitaria que impide la circulación de vehículos de acuerdo a su terminación de placa (dos terminaciones por día).

- Debido a la falta de equipo, las mediciones de pendiente y velocidad se llevaron a cabo de manera tecnológica y visual, con ayuda de otras herramientas. En el caso de la pendiente, se utilizó un software computacional para obtener el valor de pendiente en el punto sobre la carretera más cercano a la estación de medición y en el caso de la velocidad, se utilizó el velocímetro del automóvil para determinar las velocidades medias de circulación (cabe resaltar que es permitido por lo manuales). Para mayor exactitud, sería necesario tener a disposición instrumentación como pistola de velocidad, medidor de pendiente en el sitio, entre otros, para tener el dato en el punto exacto y al momento de medición.
- El error humano a la hora de realizar las mediciones: Al no contar con equipo tecnológico avanzado, las mediciones en campo se hicieron por medio de observación en la pantalla del aparato, es decir, una persona veía el valor registrado en el instrumento y lo escribía en una hoja de cálculo, lo que puede generar un cambio en la lectura o desfase de los tiempos de lectura, que fueron cada 10 segundos. Se podría mejorar este problema utilizando equipo computacional que guarde el valor automáticamente en una base de datos en el momento exacto en el que se debe medir.

3.4 Efecto del IRI en el ruido producido en la carretera

Para evaluar el efecto que tiene el IRI con el nivel de ruido obtenido en campo, se utilizan los datos del “Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica”, en su versión 2018-2019, que fue la que se facilitó para este estudio, elaborado por la Unidad de Evaluación de la Red Vial Nacional, dependencia del Laboratorio Nacional de

Materiales (Lanamme) (Sanabria, Barrantes, & Elizondo, 2019). Dado que para la presente investigación sobre el ruido en carretera se utilizan únicamente seis tramos muy específicos, se consulta el archivo de Excel generado para la elaboración del citado informe de evaluación de la red vial, el cual cuenta con los datos segmentados en tramos relativamente pequeños de las diferentes rutas nacionales. Por lo tanto, se utiliza la información del IRI de las secciones que contengan los tramos de estudio de esta investigación. Los datos de IRI están contemplados en el siguiente cuadro.

Cuadro 60. Datos IRI para los tramos en estudio

Ruta	Sección de control	Longitud se sección (km)	Tramo en estudio que cubre	Valor de IRI (m/km)	Categoría de IRI
1	20010	12.08	1	2.51	Regular
2	30600	5.12	2	1.94	Regular
3	40010	3.61	5	3.36	Regular
5	40050	1.49	4	3.67	Deficiente
32	19012	1.66	3	2.13	Regular
39	19102-19103	-	6	2.76 ⁴	Regular

Con esto, podemos realizar una regresión lineal para poder obtener una correlación entre los datos de IRI como variable dependiente y nivel sonoro como variable dependiente. Los resultados se muestran a continuación.

⁴ El dato IRI para el tramo 6 se debió promediar entre las secciones anterior y posterior (19102 y 19103 respectivamente), dado que no existe una sección en el informe que pase justo por el punto de medición.

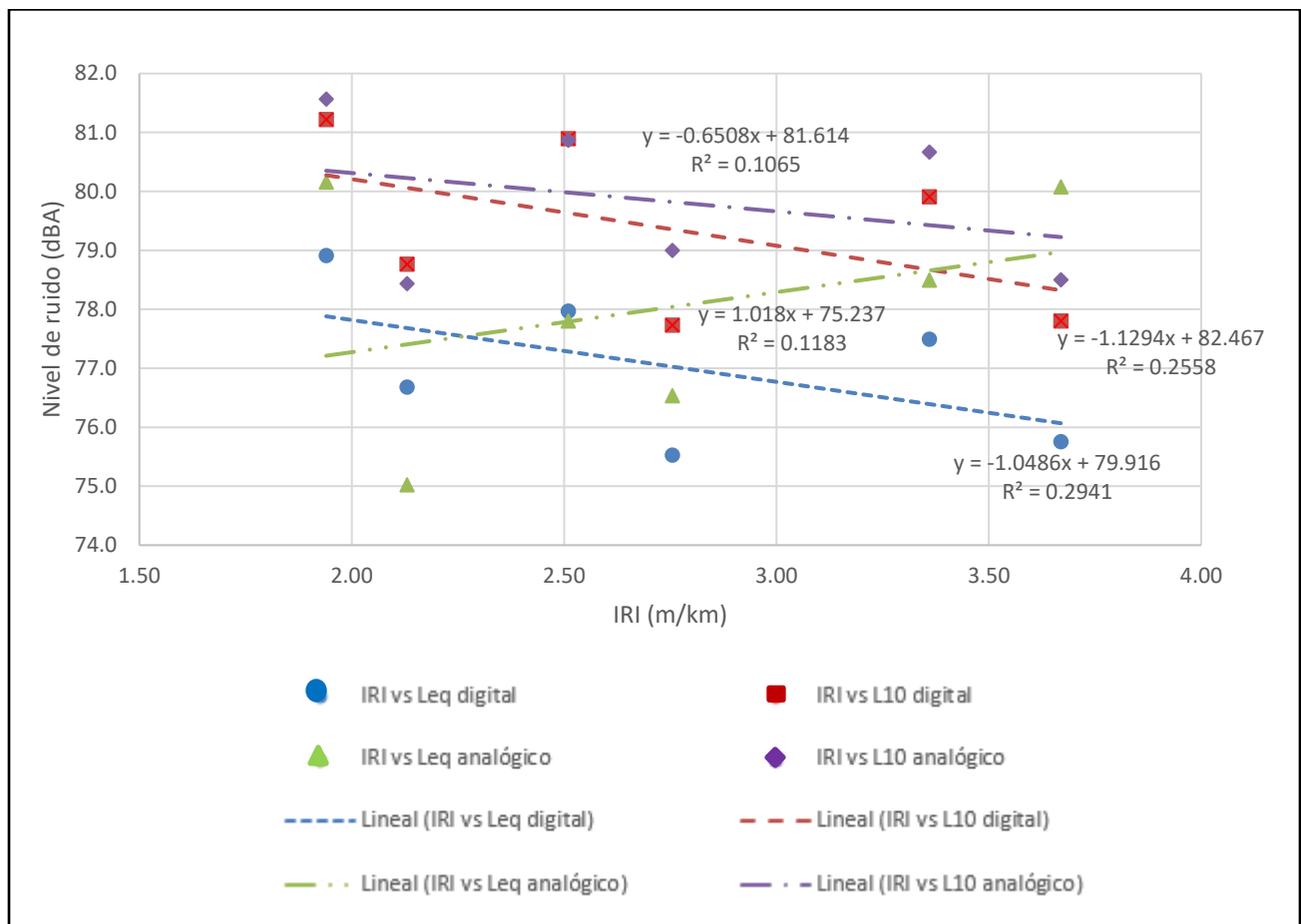


Figura 28. Relación lineal entre el nivel sonoro y el IRI

La relación entre las variables es decreciente en tres de los cuatro casos, lo que significa que podría existir una relación inversa entre el IRI y el ruido generado. Sin embargo, con esta información no es suficiente para decidir qué tan significativa es la variable en el modelo de regresión ni se tiene certeza que el modelo tiene un buen ajuste a los datos. Por esta razón, se decide añadir otras variables al modelo de regresión, como lo son la pendiente, la velocidad y el TPDA para cada uno de los casos.

Como se puede observar en la Figura 28, la correlación directa entre el IRI y el nivel sonoro no es muy buena, dado que el R^2 , el cual expresa la proporción de la varianza de la variable dependiente que está explicada por la variable independiente, en ninguno de

los casos supera el 30% de explicación de varianza por parte del IRI, lo que significa que no hay una relación buena entre el nivel sonoro y simplemente el IRI como variable independiente. Es por esto que se decide realizar una regresión en donde se vean involucradas variables como el TPDA, velocidad de circulación de los vehículos y pendiente.

Cuadro 61. Correlaciones entre variables para mediciones con sonómetro digital⁵

Relación	Ecuación	R ²
L _{eq} - IRI - Pendiente	78 - 0.23 Pend.+ 0.01 IRI (2.15) (0.13) (0.90)	0.65
L _{eq} - IRI - TPDA	81.04 - 0.0000147 TPDA - 1.24 IRI (3.97) (0.00004) (1.05)	0.32
L _{eq} - IRI - Velocidad	75.91 - 0.84 IRI + 0.05 v (4.18) (0.81) (0.04)	0.5
L ₁₀ - IRI - Pendiente	79.97 - 0.30 Pend. + 0.25 IRI (2.26) (0.14) (0.94)	0.71
L ₁₀ - IRI - TPDA	83.28 - 0.0000105 TPDA - 1.27 IRI (4.78) (0.00005) (1.26)	0.26
L ₁₀ - IRI - Velocidad	76.71 - 0.84 IRI + 0.07 v (4.43) (0.86) (0.05)	0.58

Cuadro 62. Correlaciones entre variables para mediciones con el sonómetro analógico

Relación	Ecuación	R ²
L _{eq} - IRI - Pendiente	74.81 - 0.05 Pend. +1.25 IRI (5.20) (0.32) (2.17)	0.13
L _{eq} - IRI - TPDA	76.28 - 0.0000136 TPDA + 0.84 IRI (6.90) (0.00007) (1.82)	0.13
L _{eq} - IRI - Velocidad	75.21 + 1.02 IRI + 0.0003 v (8.53) (1.65) (0.09)	0.12
L ₁₀ - IRI - Pendiente	79.11 - 0.3 Pend. + 0.73 IRI (2.13) (0.13) (0.89)	0.67
L ₁₀ - IRI - TPDA	80.38 + 0.000016 TPDA - 0.44 IRI (4.62) (0.00005) (1.22)	0.14
L ₁₀ - IRI - Velocidad	75.38 - 0.33 IRI + 0.08 v (3.94) (0.76) (0.04)	0.58

⁵ Desde el Cuadro 61 hasta el

Cuadro 64 se muestran los valores de error estándar para cada uno de los coeficientes de cada modelo de regresión

Se evidencia que para ninguna de las relaciones existe una buena correlación, dado que los valores de R^2 simple y ajustado son muy lejanos a 1, lo que significa que la relación entre los datos no es nada buena. Además, si se observa el valor de error estándar para cada caso, se observa que este es relativamente bajo, lo que significa que la dispersión es baja y las variables muestran significancia en cada uno de los modelos evaluados.

De la información anterior, podemos entonces deducir que, de todos los factores independientes analizados, el que más representa los datos es el de la pendiente, el cual presenta los mayores valores de correlación de determinación. En cuanto a los valores de error típico, se tienen valores bajos, lo que refleja una buena correlación para una significancia del 95%.

Para mejorar las correlaciones, se realiza una regresión múltiple con los valores de las variables independientes evaluados en la función logaritmo en base 10. Realizado este análisis, se obtienen mejores valores para la variable pendiente, con un R^2 de aproximadamente 0.80 para todos los casos, lo que significa que la pendiente representa más los datos si se le aplica la escala logarítmica. Tanto para el TPDA y la velocidad se realizó el mismo análisis, el cual, caso contrario a la pendiente, empeoró los coeficientes de correlación, por lo tanto, se descarta el uso de la función logaritmo para ambas variables.

Es por esto que se realizará un nuevo análisis entre las variables L_{eq} , L_{10} , logaritmo de la pendiente, velocidad y TPDA, tanto simple como con intercepto igual a cero, con el fin de mejorar el ajuste para los datos.

Como se observa en el Cuadro 63, al realizar la regresión considerando todas las variables que se han venido tomando en cuenta, la correlación mejora sustancialmente respecto a las demás regresiones realizadas anteriormente. Sin embargo, aún se puede recurrir a

una herramienta extra: Incluir que el intercepto del modelado sea igual a cero. Los resultados se muestran en el

Cuadro 64, las correlaciones mejoran mucho más, incluso, con valores cercanos a la unidad. Sin embargo, si se revisa a detalle el error estándar de cada uno de los coeficientes, se observa que para una significancia del 95%, el error aumenta considerablemente si es eliminado el intercepto de las regresiones, por lo que se puede deducir que este sí es un parámetro significativo para el modelado, amparados también en el Cuadro 65, en el cual se muestra que es el único parámetro que muestra significancia de acuerdo con la prueba t.

Cuadro 63. Regresiones considerando las variables en estudio

Relación	Ecuación	R ²
L _{eq} - IRI - log ₁₀ (Pend) - vel - TPDA	79.1 - 0.000022TPDA + 0.007v - 1.76log ₁₀ (Pend) - 2.44IRI (4.47) (0.00004) (0.09) (1.94) (8.20)	0.86
L ₁₀ - IRI - log ₁₀ (Pend) - vel - TPDA	80.6 - 0.000022TPDA + 0.013v - 2.21log ₁₀ (Pend) - 1.13IRI (3.46) (0.00002) (0.07) (1.50) (6.35)	0.94
L _{eq} - IRI - log ₁₀ (Pend) - vel - TPDA	84.6 - 0.00005TPDA - 0.25v - 6.17log ₁₀ (Pend) - 24.77IRI (10.38) (0.0001) (0.22) (4.49) (19.04)	0.69
L ₁₀ - IRI - log ₁₀ (Pend) - vel - TPDA	79 - 0.00001TPDA - 0.009v - 2.35log ₁₀ (Pend) - 4.29IRI (5.34) (0.00005) (0.11) (2.31) (9.80)	0.82

Cuadro 64. Regresiones considerando las variables en estudio e intercepto cero

Relación	Ecuación	R ²
L _{eq} - IRI - log ₁₀ (Pend) - vel - TPDA	-0.00015TPDA + 1.24v + 17.7log ₁₀ (Pend) - 19.96IRI (0.0005) (0.78) (19.98) (102.01)	0.990
L ₁₀ - IRI - log ₁₀ (Pend) - vel - TPDA	-0.00016TPDA + 1.27v + 17.6log ₁₀ (Pend) - 18.98IRI (0.0005) (0.80) (20.35) (103.9)	0.990
L _{eq} - IRI - log ₁₀ (Pend) - vel - TPDA	-0.000093TPDA + 1.07v + 14.6log ₁₀ (Pend) + 6.04IRI (0.0005) (0.84) (21.50) (109.73)	0.988
L ₁₀ - IRI - log ₁₀ (Pend) - vel - TPDA	-0.00012TPDA + 1.22v + 17.0log ₁₀ (Pend) - 13.20IRI (0.0005) (0.78) (19.97) (101.93)	0.990

A pesar de la buena correlación que se logró, es importante mencionar que, para todas las regresiones realizadas, con un nivel de significancia del 95%, no hay suficiente evidencia para decir, con certeza, que las variables utilizadas sean significativas para el modelo de acuerdo con el siguiente cuadro donde se analiza el estadístico t para los

modelos. A continuación, se muestra un ejemplo de los estadísticos t obtenidos para el modelado de la primera ecuación del Cuadro 63 con el intercepto y sin el intercepto.

Cuadro 65. Estadísticos para la primera ecuación del Cuadro 66

Variable	Error típico con intercepto	Estadístico t	Error típico sin intercepto	Estadístico t	Estadístico t para 95%
Intercepto	4.47	17.69	-	-	-2.78
IRI	8.20	-0.30	102.01	-0.20	-2.78
Pendiente	1.94	-0.91	19.98	0.88	-2.78
Velocidad	0.09	0.07	0.78	1.59	-2.78
TPDA	0.00005	-0.55	0.0005	-0.31	-2.78

En el siguiente cuadro se observan los estadísticos para cada una de las regresiones planteadas en el cuadro 63.

Cuadro 66. Prueba de hipótesis para los modelos

Relación	Estadístico F	Valor crítico de F
L_{eq} - IRI - $\log_{10}(\text{Pend})$ - vel - TPDA	1.61	0.53
L_{10} - IRI - $\log_{10}(\text{Pend})$ - vel - TPDA	3.89	0.36
L_{eq} - IRI - $\log_{10}(\text{Pend})$ - vel - TPDA	0.56	0.75
L_{10} - IRI - $\log_{10}(\text{Pend})$ - vel - TPDA	1.14	0.6

Es posible observar que para tres de los modelos el estadístico F es mayor que su valor crítico, lo que nos dice que efectivamente, los coeficientes del modelo tienen una alta significancia y son válidos, o sea, distintos de cero. Caso contrario ocurre con el modelo presentado en la tercera fila, que son las mediciones de campo como nivel sonoro equivalente con el sonómetro analógico, el cual el estadístico F es menor que su valor crítico, por lo que no se puede decir con certeza que los coeficientes de este modelo sean válidos. Por lo tanto, se descarta el uso de este.

Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Existen muchos modelos de predicción de ruido a nivel mundial. Estos se desarrollan principalmente en Europa, evidencia de esto es que para este estudio se descartó el uso de cinco modelos europeos: uno italiano, un alemán, uno español, uno francés y uno que se desarrolló en conjunto por los países nórdicos, en comparación con el descarte de un modelo americano (modelo González de Uruguay).
- Los tres modelos propuestos se pudieron evaluar exitosamente, dado que se tuvo acceso a todos los datos necesarios para realizar la evaluación de estos, como lo son pendientes, TPDA, velocidades y demás características descriptivas de los sitios, gracias a esto se pudo llevar a cabo satisfactoriamente la comparación con lo obtenido por medio de las mediciones en campo, sin embargo, como se mencionó en la sección anterior, los resultados se pueden mejorar aún más con datos y mediciones más exactas.
- A pesar de que los modelos se comportaron de manera eficiente en la mayoría de los tramos, el que mejor se comportó fue el CORTN inglés, por lo cual se deduce que el más apto para aplicarlo a la GAM es este modelo. Además, es el modelo que mayor nivel de detalle en cuanto a las correcciones presenta, lo que significa que tiene más controlados los diferentes factores que pueden variar los niveles sonoros.

- A pesar de todas las limitaciones generadas en el momento de elaborar este informe, entre ellas situaciones particulares como la restricción por COVID-19, se pudieron obtener resultados acordes a lo esperado y que no están alejados de los resultados que se podrían obtener realizando el mismo estudio sin ningún tipo de restricción.
- Al contrario de lo que se piensa popularmente, el estudio demuestra que los niveles de ruido disminuyen ante la presencia de una pendiente en la carretera, aunque el cambio no es muy significativo, sí se nota el cambio de nivel de sonido (hay un cambio de hasta 5 decibelios o más) respecto a los tramos que se pueden considerar planos.
- De la conclusión anterior, se muestra que uno de los principales factores es la velocidad de circulación, pues en los tramos que se obtuvo mayor nivel sonoro es en aquellos que la velocidad de circulación fue mayor, evidenciado en el tramo 6, que contaba con una pendiente del 5.6% y aun así se obtuvieron registros de ruido similares a los tramos planos debido a que la velocidad de circulación fue mayor que en los tramos 4 y 5, considerados tramos con pendiente. Eso sí, muchos de los valores más altos se registraron en tramos con pendientes, dado que los vehículos de carga tienden a llevar el motor a altas revoluciones, con el fin de dar mayor fuerza al camión y poder sortear la pendiente; de igual manera cuando circulan cuesta abajo, tanto la compresión del motor como el freno de motor generan exceso de ruido.
- Otro factor importante a considerar es la existencia de una barrera en medio de los dos sentidos de circulación, pues como se observa en el modelo FHWA y Valdivia, los resultados de nivel sonoro equivalente varían mucho respecto a lo obtenido en campo, por lo que es importante tener en cuenta este detalle que los

modelos omiten, pues no se considera una corrección para barrera medianera en ninguno de los tres modelos estudiados. Para el caso del modelo CORTN fue el valor que mayor error presentó respecto a los demás tramos, incluso, estuvo cerca de rechazarse su validación.

- Un detalle interesante con base en los resultados obtenidos y la conclusión anterior es que la causante de esta falla en la validez del modelo puede ser la presencia de barrera vehicular en la isla central, dado que es el único tramo que presentaba esta condición, específicamente la barrera metálica, pues el tramo 6 presentaba isla divisoria con zacate alto (igual que el tramo 2) pero con la diferencia de que este no tenía barrera metálica.
- El tipo de sonómetro no influye en las mediciones, dado que no se tiene evidencia de diferencias significativas entre las obtenidas con el sonómetro digital y el analógico, por lo que se puede utilizar cualquiera de los dos para futuros estudios sin problema alguno.
- El nivel sonoro en el percentil 10 (L_{10}) demostró ser más preciso en el estudio que el nivel sonoro equivalente ponderado A (L_{eqA}), pues, a pesar de que para los dos modelos que se evaluaron y utilizan este parámetro se obtuvieron resultados válidos en un 66.7% y 58.3% para FHWA y Valdivia respectivamente, el percentil 10 obtuvo una eficacia de 91.7%, mucho mayor comparado con el otro parámetro.
- La normativa de ruido vigente en el país no es suficientemente clara ni suficiente para controlar las emisiones de este contaminante. Como queda en evidencia en este estudio, cinco de los seis tramos tienen problemas de ruido, por lo que sería conveniente realizar un diseño de barrera de ruido para aislar la carretera de las zonas residenciales y comerciales, con el fin de hacer cumplir el límite máximo

permitido por el Ministerio de Salud. Además, los únicos límites que existen son para interiores y no se tiene ninguna limitación para exteriores.

- En el país no existe una regulación para el ruido producido en las carreteras como un sistema, es decir, por el paso de vehículos. Es importante tomar en cuenta este contaminante a la hora de elaborar estudios de impacto ambiental, pues únicamente se menciona de forma cualitativa y no cuantitativa, por lo que no hay forma real de medir el impacto que una nueva carretera va a producir en cuanto a ruido se refiere a la hora de la puesta en operación de la vía.
- La relación directa entre el IRI y el nivel de ruido no es significativa por sí sola ni se obtiene una buena correlación entre las variables del modelo. Sin embargo, se puede decir que la relación entre estas dos variables es decreciente.
- La variable más significativa a la hora de hacer el análisis individual es la pendiente, pues es la que más correlación presentó de las tres evaluadas, el IRI no presentó una significancia alta como se planteó al inicio de la investigación.

4.2 Recomendaciones

- Para dar mayor amplitud a este estudio, se debe llevar a cabo el muestreo en más tramos, así como llevar a cabo más tomas de muestra a distintas horas del día para poder obtener una ponderación de resultados que abarque más variaciones en la carretera a lo largo del día.
- Evaluar los modelos descartados en este estudio podría arrojar resultados distintos, por lo que se deberían evaluar para conocer su validación, con base en su comportamiento respecto a las mediciones realizadas en el entorno real y

conseguir mayores opciones para la redacción de una normativa a nivel nacional que regule el nivel de ruido en carreteras.

- Se recomienda el uso del modelo CORTN para la predicción de ruido en un alineamiento futuro, en una ampliación y en cualquier estudio (específicamente los EIA de SETENA) que se quiera realizar referente a ruido en carreteras, con la finalidad de tomar en cuenta el diseño de barreras acústicas de ser necesario, pero, tampoco se puede descartar el uso del modelo Valdivia que puede llegar a ser válido.
- Se recomienda estudiar la variación que pueden llegar a tener los resultados si existe o no barrera, realizar un estudio en el cual se concluya la significancia de este aparato a la hora de evaluar los distintos modelos de predicción de ruido.
- Se recomienda tomar en cuenta la evaluación de este estudio una vez finalizadas las restricciones debido al COVID-19, pues el tránsito podría volver a la normalidad e implicaría un cambio en los flujos vehiculares, que, dicho sea de paso, se recomienda cuantificar en el mismo instante que se toman las muestras de sonido y velocidad en la estación.
- Aunado a lo anterior, se puede realizar la caracterización de los vehículos que pasan por el sitio, con el fin de poder obtener con mayor exactitud el flujo de vehículos de acuerdo a lo que pide el modelo y evitar situaciones como las que se realizaron en este estudio, específicamente para el modelo de Valdivia, en donde se debió separar la cantidad de vehículos de carga liviana para incluirlos en dos diferentes categorías en las cuales estos podrían aplicar.

- Un estudio de esta índole se puede llevar a cabo con mayor precisión si se tiene mayor apoyo con la instrumentación, como por ejemplo la implementación de pistolas de velocidad, conteo de vehículos exacto al momento de realizar las mediciones, medición de pendiente exacta en el tramo de estudio, uso de sonómetros que registren todo el espectro de muestreo de forma más exacta, entre otros.
- Elaboración de una base de datos de ruido, una especie de mapa de ruido como los que se tiene en países como Chile, de actualización periódica, con el fin de poder realizar modelaciones para monitorear y dar seguimiento al factor ruido en la GAM.
- Realizar este estudio para carreteras alejadas de la GAM para poder validar su uso en distintas partes del país, con la finalidad de tener más variabilidad en el IRI y mayor cantidad de muestra para hacer las relaciones entre variables y obtener resultados más generalizados.
- Bajar los niveles límite en la mufla para bajar el ruido en conjunto, pues los datos tomados en carretera muestran picos muy altos que son molestos e inclusive superaron el límite en la mufla permitido por la Ley de tránsito.
- Solicitar en los estudios de impacto ambiental un apartado en el que indique el cambio en los niveles de ruido por la construcción, mejoramiento o ampliación de los proyectos de alineamiento y el impacto que este puede provocar en el ambiente que circunde el proyecto por medio de modelos de predicción de ruido, pues no existe una normativa que regule este contaminante en específico.

- De la mano con la recomendación anterior, se puede pensar en una reglamentación incluida en los estudios de impacto ambiental, que controle el estudio del ruido en futuros alineamientos y ampliaciones, con el fin de incluir aspectos de ruido a la hora de realizar el diseño de las carreteras. Por ejemplo, a la hora de realizar una ampliación, utilizar el modelo CORTN para poder predecir el nivel de ruido a futuro en los tramos de estudio, preferiblemente cerca de zonas urbanas, con ayuda de datos como la velocidad de diseño, pendiente de diseño del tramo, TPDA proyectado, tipo de pavimento a utilizar en la carretera, entre otros, necesarios para conocer el nivel de ruido futuro y poder así determinar si es necesario o no un amortiguamiento del ruido, comparando el dato obtenido con el límite que esté vigente a nivel nacional.
- Para poder hacer esto, es necesario tener un límite máximo, el cual debe ser monitoreado, apoyado en la recomendación ya planteada de disminuir los niveles de ruido permitidos. Para ello, sería necesario tener en cuenta la condición de ruido real en carretera con ayuda de sonómetros, por lo que recomiendo implementar ya sea estaciones de medición fija como móviles, con el fin de poder estudiar a mayor detalle variables como el mismo ruido, velocidad y TPDA, pues estos pueden llegar a variar a lo largo del día, lo que podría generar una mayor variación, dado que, por ejemplo el TPDA, no es constante durante todas las horas del día, por lo que puede influir tanto en la medición de ruido real como en la evaluación de los modelos.
- Para poder controlar de mejor manera el ruido, propongo implementar la medición del contaminante en la hoja de la Revisión Técnica Vehicular (RTV), así como la capacitación de la policía de tránsito en el manejo de sonómetros y que se apliquen multas si se incumple con los límites, ya sea el actual o un límite a futuro que sea menor, tal como se recomendó anteriormente.

----- **PÁGINA EN BLANCO**-----

Referencias Bibliográficas

- Acústica 2000. (2000). *Modelos de predicción del ruido de tráfico rodado. Comparación de diferentes estándares europeos*. Madrid, España: Tecniacústica 2000.
- Álvarez Rodenbeek, J. P., & Suárez, E. (2008). *Estudio comparativo de modelos de predicción de ruido de tráfico rodado utilizando mediciones en la ciudad de Osorno*. Puerto Montt: Acústica Austral.
- Álvarez, J. (2008). Estudio comparativo de modelos de predicción de ruido tráfico rodado utilizando mediciones de ruido en la ciudad de Osorno. *VI Congreso Iberoamericano de Acústica FIA*. Buenos Aires: FIA.
- Berglund, B., Lindvall, T., & Schwela, D. (27 de Agosto de 2021). *Guidelines for community noise*. Obtenido de World Health Organization: <https://www.who.int/docstore/peh/noise/Comnoise-1.pdf>
- CDG Enviromental Advisors. (julio, 2016). *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto: "Rehabilitación y ampliación de la ruta nacional N° 32, sección: La intersección con la ruta nacional N° 4-Limón"*. San José, Costa Rica.
- Cepeda, M. (2019). *Determinación de la relación entre el índice de rugosidad internacional (IRI) y la generación de ruido vehicular*. Tunja, Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Cirrus Research S.L. (2016). *Guía para terminología de medición de ruido*. Londres, Reino Unido: Cirrus Research S.L.
- Damián, S., Flores, M., Flores, M., & Téllez, R. (2001). *Instituto Mexicano del Transporte*. Obtenido de <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnicapt187.pdf>

Department of Transport Welsh Office. (1988). *Calculation of Road Traffic Noise*. Londres, Inglaterra.

Federal Highway Administration. (15 de Setiembre de 2017). Noise measurement handbook. New Jersey, Washington D.C., Estados Unidos.

Fernández, P. (20 de diciembre de 2017). *Acústica (I): propagación en campo abierto y nivel desde altavoces*. Obtenido de Hispasonic: <https://www.hispasonic.com/tutoriales/acustica-i-propagacion-campo-abierto-especificaciones-altavoces/43364>

Fideicomiso Ruta Uno. (2001). *Evaluación ambiental y social de las obras impostergables (OBIS) del corredor vial San José-San Ramón*. San José, Costa Rica.

Gulliver, J., Morley, D., Vienneau, D., Fabbri, F., Bell, M., Goodman, P., . . . Fecht, D. (2015). Development of an open-source road traffic noise model for exposure assessment. *Environmental Modelling & Software*, 183-193.

Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (23 de setiembre de 2020). *INTECO*. Obtenido de <https://www.inteco.org/blog/noticias-2/post/normas-tecnicas-permitiran-minimizar-el-impacto-a-la-salud-originado-por-ruidos-y-vibraciones-174>

Ministerio de Justicia. (7 de febrero de 1984). Ley 18 290 de tránsito. Santiago, Chile.

Ministerio de Salud. (24 de enero de 2019). Directriz sobre procedimiento para la medición de ruido de fondo y ruido de impacto o impulso. San José, San José, Costa Rica.

Ministerio del Medio Ambiente. (2011). *Decreto 38*. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/leyfacil/recurso/ruidos-molestos>

Ministerio del Medio Ambiente. (24 de Febrero de 2015). *Decreto 7*. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1084472>

Observatorio de la Sostenibilidad en España. (2008). *Calidad del Aire en las Ciudades*. Madrid, España: Mundi-Prensa.

OSPAT. (8 de febrero de 2019). *10 efectos nocivos del ruido sobre la salud*. Obtenido de Obras del Personal de la Actividad del Turf: <https://www.ospat.com.ar/blog/salud/10-efectos-nocivos-del-ruido-sobre-la-salud/>

Pradena, M. (2010). Análisis de la Regularidad Superficial de Caminos Pavimentados. Santiago, Chile: Revista de Construcción, Universidad Pontificia Católica de Chile.

Programa de Infraestructura del Transporte del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. (2014). Estudios Técnicos Realizados para la Aplicación del Índice de Regularidad Superficial en Costa Rica. San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica.

Quintero, J., De Frías, E., & Henríquez, F. (2019). *Uso de modelos matemáticos para el cálculo de ruido en las principales avenidas de Panamá*. Panamá: Universidad Tecnológica de Panamá.

Reglamento No. 39428-S: Reglamento para el Control de Contaminación por Ruido. (23 de noviembre de 2015). *Diario Oficial La Gaceta, San José, Costa Rica*.

Rivera, J. (2017). *Efecto del Ruido Generado por Operaciones Aeronáuticas en el Desarrollo*. San Pedro de Montes de Oca: Proyecto de graduación para optar por el grado de Máster en Ingeniería de Transporte y Vías, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.

Roberts, C. (10 de Septiembre de 2012). *¿Qué son las ponderaciones de frecuencia A, C y Z?* Obtenido de Cirrus Research S.L.: <https://www.cirrusresearch.es/blog/2012/09/que-son-las-ponderaciones-de-frecuencia-a-c-y-z/>

Roberts, C. (18 de enero de 2013). *Obtener el promedio de ruido - ¿Cómo calculo el promedio de las mediciones acústicas?* Obtenido de Cirrus Research: <https://www.cirrusresearch.es/blog/2013/01/obtener-el-promedio-de-ruido-como-calculo-el-promedio-de-las-mediciones-acusticas/>

Sanabria, J., Barrantes, R., & Elizondo, A. L. (2019). *Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica años 2018-2019*. San José, Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme).

Sánchez Rivera, J., González Suárez, J., Arenas Bermúdez, J., & Poblete, V. (1996). *Modelo matemático para la medida del Leq en zonas urbanas de Chile*. Barcelona: Tecni Acústica.

Sandoval, J. (2020). *Evaluación del impacto del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) sobre las emisiones de dióxido de carbono, niveles de ruido y material particulado producidos por el tránsito vehicular en carreteras en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.

Sansgundo, A. (s.f.). *Acústica en edificación: Conceptos básicos*. Obtenido de Arquitectos de Cádiz: <https://www.arquitectosdecadiz.com/wp-content/uploads/2017/12/03.01.-Conceptos-b%C3%A1sicos.-Aislamiento.-Alejandro-Sansgundo.pdf>

Sistema de Información Acústica. (18 de octubre de 2021). *Conceptos básicos del ruido ambiental*. Obtenido de SICA web: <https://sicaweb.cedex.es/docs/documentacion/Conceptos-Basicos-del-ruido-ambiental.pdf>

Soporte multimedia. (14 de Noviembre de 2020). *¿Sabes cómo se mide el sonido?* Obtenido de Soporte Multimedia: <https://soportemultimedia.com/sabes-como-se-mide-el-sonido/>

Trevino, M., & Dossey, T. (2009). *Noise Measurements of Highway Pavements in Texas: Technical Report*. Austin, Texas: Universidad de Austin, Center for Transportation Research (CTR).

Viro, G. (2002). Protocolo de Medición para el Trazado de Mapas de Ruido Normalizado. Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aire.

----- **PÁGINA EN BLANCO**-----

ANEXO I

Cuadro 67. Muestreo en el tramo 1

Tiempo de medición	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
00:10	77	78	81	78	77.6	78
00:20	78.5	70	77	80	79.7	81
00:30	75	76	75.7	78	77.8	82
00:40	77	77	78	80	76	76
00:50	81	82	73	82	75	78
01:00	79	79	78.4	78	77.1	80
01:10	77	78	75.8	80	80.4	80
01:20	78	78	76.1	76	73.8	68
01:30	80.5	78	79.1	74	77.3	82
01:40	82	83	77.3	74	72.1	80
01:50	77	75	74.8	74	77.6	78
02:00	81.5	81	70.7	76	75.4	74
02:10	79	78	78.4	76	81.5	78
02:20	75	76	71	70	75.9	80
02:30	76.8	77	72.5	74	76.1	66
02:40	77.5	78	73.3	72	76.3	80
02:50	80	78	76.5	78	75.1	80
03:00	80.9	79	77.5	82	79	80
03:10	76	76	67.9	68	68	80
03:20	68.4	66	73.9	74	78.2	76
03:30	72	74	80.2	81	73	74
03:40	79	74	76.7	78	81.5	80
03:50	76.4	76	80.8	80	73.9	72
04:00	84	85	73.5	70	71.3	74
04:10	79	74	78.1	72	78	72
04:20	75.3	75	78	80	75.9	80
04:30	76.6	76	78.6	80	80.4	76
04:40	77	76	76	76	70.1	70
04:50	67	68	81.4	80	73.6	78
05:00	78.8	78	75.9	75	84	80
05:10	76	76	76.6	74	76.6	72

Cuadro 67. Muestreo en tramo 1 (continuación)

Tiempo de medición	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
05:20	74.5	76	77.8	74	73	78
05:30	74.4	74	71.5	76	76.7	72
05:40	72.5	73	75.7	82	77.8	74
05:50	77.6	77	77.4	78	80	70
06:00	74.1	74	74.7	76	73	76
06:10	85	84	79.3	72	76.4	76
06:20	78.5	78	75.8	80	80	80
06:30	77.7	77	74.2	80	80.4	76
06:40	76.6	76	75.4	72	80.1	80
06:50	76.3	76	82.9	84	74.9	82
07:00	82	82	77.2	80	74.2	74
07:10	77.4	76	83.5	80	71.7	70
07:20	71.1	71	70.8	74	72.5	64
07:30	80.8	81	75.2	78	80.4	80
07:40	74.3	74	71.7	72	68.3	78
07:50	82	82	78	79	77.3	78
08:00	78	80	79.2	76	83	76
08:10	77.9	80	74.1	76	79.5	80
08:20	75.7	76	82.8	76	72.6	72
08:30	82.1	82	76	78	71.3	72
08:40	73.5	75	75.3	74	71.7	60
08:50	79.5	80	79.3	81	78.7	76
09:00	77.5	78	77.6	78	76.6	75
09:10	76.2	76	80	72	79.5	74
09:20	71.4	72	80.8	80	75.3	74
09:30	77.5	78	78.1	78	75.6	72
09:40	81	80	73	78	76.6	74
09:50	80.6	81	75.8	78	74.1	81
10:00	78.6	78	75.4	72	82.9	72
10:10	72.6	72	73.4	76	79.4	78
10:20	81.5	81	74	76	76.4	72
10:30	79.4	79	79.6	78	73.7	70
10:40	72.6	72	68.7	82	79.1	80

Cuadro 67. Muestreo en tramo 1 (continuación)

Tiempo de medición	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
10:50	78.4	78	80.8	82	80.1	78
11:00	80.3	80	76.8	76	81.8	74
11:10	74.1	74	78.6	74	82.7	81
11:20	74.8	76	80.2	82	80	76
11:30	79.6	76	78.2	76	76.4	76
11:40	67	66	77.6	78	74.1	74
11:50	72.6	72	81	72	75.9	80
12:00	82	81	76.6	78	77.6	78
12:10	81	81	82.3	80	75	78
12:20	82	82	76.4	78	74.1	78
12:30	74.8	74	80.6	80	74.5	76
12:40	79.1	78	78.6	78	69.3	68
12:50	76	76	77.4	78	86	84
13:00	70.4	70	72.2	74	80.7	76
13:10	77.8	78	78.7	79	73.8	74
13:20	76.5	74	77.2	84	78.8	78
13:30	77.4	78	76.5	76	69.9	75
13:40	74.6	74	69.3	76	74.6	72
13:50	75	75	74.5	74	78.6	82
14:00	72.1	74	71	72	79.3	76
14:10	74.2	76	76	70	77	80
14:20	84	84	75.4	80	77.7	81
14:30	77.5	78	76.8	76	80.2	74
14:40	80	80	81	78	71.8	66
14:50	78.3	78	80.6	76	79.4	78
15:00	75.2	74	74.1	76	68.9	71
15:10	68.5	68	79.4	76	72.1	76
15:20	69.9	70	83.3	74	79.1	80
15:30	73	74	76.7	74	78	80
15:40	79.9	80	78.3	80	82.9	74
15:50	81.3	81	79.1	80	76.9	80
16:00	76.6	74	73.3	74	81.9	80
16:10	73.3	76	82.4	82	72.2	76

Cuadro 67. Muestreo en tramo 1 (continuación)

Tiempo de medición	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
16:20	73	69	73.3	82	73	76
16:30	82.5	80	79.9	78	74.9	80
16:40	76.5	76	76.5	72	74.2	68
16:50	71.6	71	77.3	77	75.5	74
17:00	70.8	72	81.1	80	77.4	79
17:10	80.4	81	78.6	78	80	71
17:20	79.7	80	72.5	76	78.6	80
17:30	80.9	80	79.5	79	77.6	72
17:40	73.3	72	75.3	72	78.8	78
17:50	73.5	78	80.4	72	78.4	74
18:00	75.3	75	78	78	80.9	81
18:10	68.5	70	69	76	75.9	78
18:20	72.8	74	71.2	60	75.5	82
18:30	83	80	75.4	81	75	80
18:40	74.8	83	68.8	72	70.5	70
18:50	78	76	83	76	72.7	72
19:00	77	78	70.4	68	77.7	80
19:10	73.2	70	78.8	78	75.4	74
19:20	76.9	78	76	76	71.9	74
19:30	75.6	74	74.8	72	80.3	76
19:40	70.6	70	77.3	78	75.7	70
19:50	81.4	81	82	76	78.5	71
20:00	73.5	74	79	81	71.3	72
20:10	77.7	76	76.4	72	75	75
20:20	78.8	78	75.1	68	64.1	71
20:30	75.7	74	80.1	80	76.1	74
20:40	73.6	76	76.7	70	74.4	82
20:50	79.2	78	75.5	78	75.5	75
21:00	75.4	82	80.9	74	72.5	80
21:10	77.2	78	77.4	78	70.6	75
21:20	76.3	69	79.2	74	83.3	78
21:30	81.2	80	71	78	79.3	81
21:40	77.7	78	76.9	78	68.1	72

Cuadro 67. Muestreo en tramo 1 (continuación)

Tiempo de medición	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
21:50	78.2	70	73.2	70	76.4	77
22:00	77.7	78	75.2	74	73.2	67

Cuadro 68. Muestreo en el tramo 2

Tiempo de medición	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
00:10	74.9	76	73.9	70	80.6	93
00:20	72.2	75	75.1	76	71.6	73
00:30	66.9	70	72.5	75	70.6	72
00:40	78.2	71	82.5	88	80	77
00:50	85.4	86	75.7	70	72.9	72
01:00	73.3	75	64.7	68	76.3	75
01:10	68.2	76	72.8	80	79.1	75
01:20	62.9	65	81.3	67	77.6	77
01:30	76.8	75	77.8	74	75.2	80
01:40	76.4	70	71.2	70	79.4	83
01:50	64.2	64	71.3	73	68.7	71
02:00	72.9	80	74.8	72	77.8	77
02:10	84.9	78	76.5	75	74.7	68
02:20	76.6	74	73.5	82	66.1	70
02:30	69.8	78	70.7	80	69.5	74
02:40	70.7	66	81.6	79	75.2	75
02:50	86.4	82	73.6	77	69.4	70
03:00	82.4	81	71.2	70	68.6	70
03:10	76.4	74	60	62	72.1	76
03:20	67.5	72	65	66	74.9	73
03:30	74.2	68	68.7	72	76.2	74
03:40	83.8	80	65.6	66	77.7	90
03:50	69.7	70	72.1	81	71.3	68
04:00	77.6	76	71.5	76	68	76
04:10	67.1	70	67.4	70	79	72
04:20	65.6	76	75.4	75	77.7	71
04:30	79.8	75	71.3	81	69	71
04:40	68.9	70	79.9	78	73.9	72
04:50	85	72	67.4	67	82	74
05:00	65.9	64	73.5	67	77.3	72
05:10	76.6	84	68.1	68	73	67
05:20	75.8	74	65.9	65	81.5	75
05:30	77.7	78	67.1	85	74.2	76

Cuadro 68. Muestreo en tramo 2 (continuación)

Tiempo de medición	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
05:40	63.3	67	75.5	80	70.5	62
05:50	71	82	78.1	71	69.5	71
06:00	80.6	80	80.3	82	90	86
06:10	74.7	78	70.9	71	74.4	72
06:20	73.3	80	80.8	77	77.4	68
06:30	65.9	66	75.1	71	83	81
06:40	82.1	72	67.6	75	76.7	70
06:50	82.3	81	81.6	82	70.7	80
07:00	75.4	74	73.8	69	72.4	66
07:10	72.5	72	82.2	82	62.5	66
07:20	71.3	66	68.7	69	79.1	76
07:30	68.1	74	76.7	81	77.2	76
07:40	88.9	88	69	71	71.6	74
07:50	65.1	65	69	73	80	81
08:00	81.2	78	79	72	80	71
08:10	76.8	80	73.8	76	75.5	72
08:20	70.2	65	77	74	69.9	78
08:30	72.3	68	80	77	76.4	78
08:40	61.6	64	85	96	75.7	76
08:50	73.7	68	80	80	77.3	74
09:00	73.2	74	73.4	75	79.9	73
09:10	77.3	80	73.8	69	80.5	78
09:20	76.6	74	77.9	78	77	74
09:30	73.2	78	68.2	73	68.3	73
09:40	79.5	75	75	72	74	76
09:50	72.8	67	65.5	71	73.1	70
10:00	72.9	68	78.6	72	68.2	67
10:10	70.9	77	74.5	80	77.6	80
10:20	69.2	78	72.3	70	66.5	77
10:30	66.2	70	79.5	73	77.4	74
10:40	65	68	79.1	69	71.9	70
10:50	64.2	67	79	71	75.7	78
11:00	81	80	83	70	65.2	65

Cuadro 68. Muestreo en tramo 2 (continuación)

Tiempo de medición	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
11:10	87.6	89	79.1	73	78	73
11:20	72.4	68	72	73	75	70
11:30	74.8	75	73.8	77	74.8	75
11:40	74.4	66	69.9	67	76.2	75
11:50	67.4	70	76.8	75	71.9	78
12:00	66.2	68	64	68	84.5	84
12:10	71.9	76	78.7	76	77.2	79
12:20	79.9	72	65.6	70	73	74
12:30	76.6	70	77.5	67	76.8	70
12:40	71.5	80	68.1	65	78.2	80
12:50	77.3	78	69.1	70	80	86
13:00	71.4	86	68.5	68	64.3	64
13:10	84.1	76	73.4	71	70.3	70
13:20	75.2	80	74	66	72.8	74
13:30	69.9	70	76	76	70.2	78
13:40	77.3	79	71.1	75	78.4	79
13:50	79.8	78	87.8	90	68.8	72
14:00	80.1	78	71.3	74	78.3	79
14:10	74.2	73	77.6	74	78.6	70
14:20	98	86	81	67	79.4	72
14:30	72.4	83	76.8	76	80.2	74
14:40	87.1	72	81	78	71.8	66
14:50	73.1	80	80.6	76	79.4	78
15:00	87.8	88	74.1	76	68.9	71
15:10	80.4	83	79.4	76	72.1	76
15:20	74.4	78	83.3	74	79.1	80
15:30	67.3	66	76.7	74	78	80
15:40	83.5	82	78.3	80	82.9	74
15:50	72.4	71	79.1	80	76.9	80
16:00	80.6	70	73.3	74	81.9	80
16:10	84.4	94	82.4	82	72.2	76
16:20	78.3	74	73.3	82	73	76
16:30	71.8	80	79.9	78	74.9	80

Cuadro 68. Muestreo en tramo 2 (continuación)

Tiempo de medición	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
16:40	78.3	76	76.5	72	74.2	68
16:50	82.5	88	77.3	77	75.5	74
17:00	76.8	74	81.1	80	77.4	79
17:10	71.4	77	78.6	78	80	71
17:20	80.6	80	72.5	76	78.6	80
17:30	75.5	76	79.5	79	77.6	72
17:40	75.7	75	75.3	72	78.8	78
17:50	72	78	80.4	72	78.4	74
18:00	65.6	74	78	78	80.9	81
18:10	73.1	70	69	76	75.9	78
18:20	68.8	69	71.2	60	75.5	82
18:30	75.6	74	75.4	81	75	80
18:40	77.4	70	68.8	72	70.5	70
18:50	69.3	72	83	76	72.7	72
19:00	74.5	75	70.4	68	77.7	80
19:10	75.2	88	78.8	78	75.4	74
19:20	64.8	68	76	76	71.9	74
19:30	68.4	71	74.8	72	80.3	76
19:40	65.4	70	77.3	78	75.7	70
19:50	68.8	70	82	76	78.5	71
20:00	72.7	69	79	81	71.3	72
20:10	76.8	76	76.4	72	75	75
20:20	73.7	72	75.1	68	64.1	71
20:30	74.3	74	80.1	80	76.1	74
20:40	74.1	68	76.7	70	74.4	82
20:50	69.3	70	75.5	78	75.5	75
21:00	81.8	72	80.9	74	72.5	80
21:10	75.2	75	77.4	78	70.6	75
21:20	66.9	73	79.2	74	83.3	78
21:30	67.1	71	71	78	79.3	81
21:40	73.4	75	76.9	78	68.1	72
21:50	69	74	73.2	70	76.4	77
22:00	74.9	71	75.2	74	73.2	67

Cuadro 69. Muestreo en tramo 3

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
00:10	69.6	75	66.3	65	77.3	71
00:20	67.2	68	70	81	74.8	74
00:30	66.5	68	64.7	64	68.6	74
00:40	65.9	70	76.3	67	72.1	65
00:50	77.7	66	61.9	70	70.2	80
01:00	63.3	81	75.8	75	67.8	73
01:10	70.5	72	68.7	72	73.4	69
01:20	66.5	68	76.4	72	69.9	72
01:30	80.1	78	75.5	80	75.7	80
01:40	91.5	99	74.2	80	78.4	78
01:50	76.8	74	69.7	70	69.3	71
02:00	78.3	69	74.1	68	77.2	80
02:10	83	81	73.6	71	67.8	67
02:20	62.1	68	68.6	68	60.1	60
02:30	73.8	74	70.9	73	84	80
02:40	60.7	66	77.3	70	79	76
02:50	84.5	74	75.4	73	72.9	69
03:00	80	92	73.8	70	73.5	83
03:10	75.4	73	76	68	70.9	73
03:20	70.1	71	72	73	70	76
03:30	66.4	74	78	75	68.3	73
03:40	78.7	75	71.6	80	80	71
03:50	67.2	72	66.5	71	76.3	78
04:00	85	84	76.3	78	78.6	81
04:10	75.7	82	61.6	63	72.4	71
04:20	73.6	68	68.9	71	71.6	71
04:30	69	69	69.4	67	69.4	72
04:40	73	78	76.8	72	78.2	71
04:50	74.9	63	75.8	68	76.2	70
05:00	63	67	70.2	82	62.3	66
05:10	76.2	69	84	82	78.9	72
05:20	72.8	76	78.3	78	63.9	67
05:30	69.7	72	80.2	81	76.8	80

Cuadro 69. Muestreo en tramo 3 (continuación)

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
05:40	79.2	76	81.2	82	76	78
05:50	65.5	68	91.9	92	73	76
06:00	66.6	72	80.8	80	71	80
06:10	75	63	69.4	65	74.2	68
06:20	78.3	68	69.2	72	67.3	69
06:30	78.4	85	67.8	70	76.8	78
06:40	74.4	72	60	61	81	71
06:50	69.8	67	58.8	62	87	83
07:00	69.7	81	67.1	70	76.2	72
07:10	67.4	74	66.4	64	77.7	80
07:20	67.8	72	71.4	78	72.8	72
07:30	79.5	77	82.2	78	65.1	65
07:40	72.7	78	70.7	74	68.8	70
07:50	78.1	79	73.4	73	72.4	74
08:00	70.7	75	70.2	75	66.4	70
08:10	69.7	75	75.1	80	66.2	66
08:20	58.6	80	79.1	80	80	78
08:30	68.6	65	66	69	78.8	75
08:40	66.1	70	70	70	75.8	70
08:50	74.1	74	75.8	76	74.9	73
09:00	66.1	69	66.8	70	71.3	72
09:10	75.3	70	75.8	75	71.3	70
09:20	74.5	70	88	72	81.7	88
09:30	72.5	70	78.2	71	73.6	77
09:40	64.7	68	77.5	70	76.2	69
09:50	70.7	72	75.7	72	77.8	80
10:00	72.2	80	74.7	72	69	68
10:10	72.4	68	74	78	70.2	80
10:20	76.9	73	68.5	70	73.3	81
10:30	79	70	66.2	72	74.2	70
10:40	67.2	68	62.6	61	80.1	68
10:50	66	71	76.8	62	74.6	74
11:00	77	78	64.3	73	80.5	64

Cuadro 69. Muestreo en tramo 3 (continuación)

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
11:10	74.5	75	79.6	70	80	72
11:20	67.2	70	67.2	79	63.8	67
11:30	77.6	70	65	72	73.8	85
11:40	67.4	77	76.5	70	79.2	72
11:50	76.9	79	82	82	76.3	81
12:00	70.3	76	78.4	72	77	73
12:10	76.8	85	74.6	73	74.8	74
12:20	63.7	71	67.3	75	76.4	77
12:30	76.9	73	65.6	70	66.3	73
12:40	78.3	76	77.3	70	79.9	83
12:50	78.4	75	61.8	62	76.7	72
13:00	77.5	73	62.2	76	66.2	65
13:10	77.6	78	79.8	82	66.3	72
13:20	65.7	67	67	77	78.7	71
13:30	70.6	71	70.4	70	67.2	70
13:40	76.2	72	74.6	72	82.8	81
13:50	71.2	75	72	78	72.5	79
14:00	70.4	72	77.1	78	71.8	70
14:10	67.4	81	72	70	77.5	72
14:20	70.2	72	65.3	80	70.8	79
14:30	66.6	63	68.6	70	70.8	82
14:40	55.2	62	82.3	68	74.3	65
14:50	66.2	73	70.6	78	72.5	81
15:00	69.9	74	66.6	70	67.6	79
15:10	68.3	70	76.2	66	79.8	82
15:20	78.5	78	79.3	78	74.2	75
15:30	75.3	75	77.2	73	60.9	62
15:40	77.1	77	82	80	81.4	69
15:50	84.1	84	81.6	76	78.2	81
16:00	68.1	74	75.3	70	67.7	68
16:10	61.5	65	73	74	91	88
16:20	71.8	75	71.1	68	70.8	71
16:30	70.7	70	80.6	80	68.8	73

Cuadro 69. Muestreo en tramo 3 (continuación)

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
16:40	80	68	65.3	62	75.9	65
16:50	76.4	71	64.5	72	67.8	76
17:00	75.3	75	74.4	81	79.9	76
17:10	66.3	65	69.3	69	78.2	67
17:20	68.5	74	69	69	67.8	74
17:30	76.7	76	88	77	77.6	68
17:40	69.7	77	72.9	72	78.3	73
17:50	76.5	78	65.8	66	74.4	70
18:00	57.8	62	80	80	75.5	78
18:10	61.4	64	69.2	76	89	84
18:20	58.7	58	68.6	79	69.6	68
18:30	63.9	78	76.8	63	74.6	70
18:40	70	72	85.7	78	80.5	86
18:50	86	68	84	80	76.8	73
19:00	65.5	81	62.7	70	77.4	75
19:10	75.5	72	76.1	76	68.9	69
19:20	73.7	81	74.6	76	80.3	80
19:30	87.6	85	65.5	67	72.3	74
19:40	82.2	80	58.4	64	62.2	68
19:50	72.1	72	76.7	62	73.8	75
20:00	73.7	72	80	80	81.3	81
20:10	69.7	70	78.6	80	64.3	64
20:20	67.2	70	70.5	71	78.5	77
20:30	70.7	78	69.3	72	77	77
20:40	72.3	74	72.2	66	72	68
20:50	77.2	75	73.2	78	57	64
21:00	70.9	73	70.1	74	66.4	62
21:10	68	70	69.9	80	78.3	65
21:20	72.3	78	74.6	76	68.2	81
21:30	78.2	77	81	80	69.2	64
21:40	74.8	73	79	72	77.4	76
21:50	77.2	77	71.9	71	75.9	70
22:00	86	82	76.6	75	75.1	75

Cuadro 69. Muestreo en tramo 3 (continuación)

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
22:10	71.2	76	74.3	75	74	73
22:20	72.7	73	71.2	73	72.8	79
22:30	71.1	70	65.3	62	78.2	73
22:40	68	70	62.9	62	73.8	66
22:50	77.8	72	68.6	68	68.3	80
23:00	78.4	72	74.7	78	72.3	78

Cuadro 70. Muestreo en el tramo 4

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
00:10	67.5	66	72.3	73	69.4	69
00:20	79.1	72	73.5	72	69.7	72
00:30	72.3	72	85.9	84	68.5	70
00:40	70.9	70	68.5	73	68.3	70
00:50	72.2	70	74.1	63	64.7	68
01:00	68	68	69.5	66	69.2	70
01:10	70.3	71	72.3	74	68.1	71
01:20	70.8	72	77.8	70	63	65
01:30	64	68	66.7	71	72.5	72
01:40	66.2	66	68.7	68	70.6	70
01:50	67.7	67	76.5	76	74	72
02:00	66.6	66	69.4	69	70	70
02:10	70.4	74	70.6	71	67.3	72
02:20	68.4	72	68.6	71	65.1	70
02:30	79.9	82	73	72	78.2	78
02:40	74.5	78	69.5	70	78	72
02:50	71.6	70	69.8	71	75.4	80
03:00	71.8	72	74.7	77	71.5	70
03:10	72.9	73	87	86	71.3	70
03:20	76.9	71	75.2	73	70.8	74
03:30	73.8	74	73.3	71	73.7	68
03:40	67.2	72	67.4	76	59.7	68
03:50	72.3	72	67.1	71	71.5	70
04:00	73	73	65.7	68	70.7	76
04:10	70.7	70	69.7	103	74.3	76
04:20	68.3	72	81.7	78	69.7	72
04:30	65.4	70	79.9	71	69.7	70
04:40	70.4	70	78.3	75	74	72
04:50	70.5	71	70	70	70	71
05:00	71	70	68.9	68	64.5	70
05:10	73.1	70	79.9	76	69	71
05:20	71	71	67.9	72	71.9	71
05:30	78.3	74	71	72	69	71

Cuadro 70. Muestreo en tramo 4 (continuación)

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
05:40	69.8	74	73.9	74	69.7	77
05:50	68.8	68	71.2	70	75.5	78
06:00	69.1	71	69.4	70	74.6	72
06:10	69.4	76	71.5	71	77.2	74
06:20	73	75	62.3	67	69.3	70
06:30	71.6	73	68.9	68	67.7	73
06:40	78.7	72	59.9	59	72.4	76
06:50	68.1	68	56.7	63	63.2	68
07:00	84.1	82	80.5	85	83.1	84
07:10	69.3	69	71.1	68	72.1	73
07:20	68.7	70	72.4	73	66.1	71
07:30	74.7	74	71.6	74	66.1	68
07:40	71.7	71	67.5	71	70.4	70
07:50	75.1	76	72.4	72	69.2	73
08:00	73	72	69.2	70	75.1	72
08:10	70.7	74	69.9	72	69.1	68
08:20	70	70	72.4	75	75.4	72
08:30	68.2	70	71.3	76	68.8	75
08:40	74	81	71.8	68	66.4	66
08:50	72.6	72	63.9	68	66.1	70
09:00	73.1	72	70.4	68	66	67
09:10	65.5	70	71.7	71	68.1	73
09:20	75.4	73	80.1	75	65.6	64
09:30	73.8	72	68.1	70	68.2	68
09:40	85	82	64.3	69	64	64
09:50	84	76	70.4	72	61.9	62
10:00	72.3	72	68.7	66	66.8	72
10:10	84.4	84	71.7	72	67.8	68
10:20	73.4	72	69.5	70	71.1	80
10:30	77.3	72	67.4	70	78.2	76
10:40	64.2	68	70.6	70	78.8	76
10:50	70.4	71	71.2	72	66	64
11:00	67.2	67	71.2	70	67.6	66

Cuadro 70. Muestreo en tramo 4 (continuación)

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
11:10	68.7	70	74.9	78	61.2	62
11:20	77.2	78	77.5	82	67.7	68
11:30	82.5	83	73.5	72	69.4	70
11:40	73.1	70	71.2	70	74	78
11:50	77.9	90	70.8	70	82.5	83
12:00	75.5	74	69.6	70	72.6	74
12:10	76.2	72	69.5	71	87.8	84
12:20	70.9	72	72.6	73	73.7	72
12:30	73.7	72	67.8	71	69.1	70
12:40	72.3	72	73.2	79	66.2	68
12:50	69.6	71	73.9	74	62.9	66
13:00	70.9	71	67.2	66	63.4	65
13:10	73.1	72	67.4	64	67.7	71
13:20	75.8	82	69.3	70	70.4	72
13:30	72	72	59	60	71	74
13:40	74.1	70	68.6	72	62	66
13:50	69	71	78.6	84	65	65
14:00	71.7	71	74.7	74	71	70
14:10	72.7	71	70.9	72	68.7	70
14:20	69.5	78	77.3	79	66.1	64
14:30	62.5	61	69.1	72	70	64
14:40	70.8	96	67.5	71	56.6	61
14:50	94.7	94	71.9	73	71.4	72
15:00	79.3	81	71.5	71	73.1	80
15:10	75.1	74	72.5	70	67.5	70
15:20	64.9	66	70.6	73	79.4	81
15:30	66.3	67	74.4	90	70.2	72
15:40	65.6	63	75.5	75	79.2	90
15:50	60.7	68	73.2	74	71.8	70
16:00	67.6	68	66.3	68	64	68
16:10	77.1	71	71.3	74	70.3	72
16:20	74.8	73	69.7	70	73.8	70
16:30	69.3	68	72.7	67	71.4	71
16:40	69.9	68	78.9	76	70.9	68

Cuadro 70. Muestreo en tramo 4 (continuación)

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
16:50	69.4	70	70	72	73.8	74
17:00	71.4	72	71.8	73	72.2	72
17:10	63.9	66	78.4	80	71	67
17:20	70.4	67	68.8	70	68.4	64
17:30	68.9	72	71	70	74.3	81
17:40	67.7	71	69.6	64	63.9	64
17:50	72.2	72	75.5	72	68.2	71
18:00	61.6	68	72.6	78	78.7	75
18:10	76	86	73.1	70	68.1	64
18:20	74.4	75	71	71	64.3	64
18:30	71.3	72	66	63	74.6	68
18:40	69.8	74	71	70	81	82
18:50	70.5	69	71.8	70	71.2	70
19:00	63.3	65	73.1	67	59.9	61
19:10	70.3	72	69.1	75	80.4	82
19:20	77.8	74	69.9	70	72.6	68
19:30	69.2	70	66.1	69	73.7	72
19:40	67	66	60.2	66	70.9	70
19:50	72.4	70	71.9	72	69.3	72
20:00	78.8	81	80.3	76	69.3	72
20:10	68.8	72	71.4	71	71.1	68
20:20	80.5	75	72.6	73	68.6	66
20:30	80.1	76	68	68	71.5	64
20:40	68	68	70.5	72	67.8	70
20:50	66.4	68	69.8	72	76.8	82
21:00	73.7	72	68.5	72	68	65
21:10	67.8	70	64.9	70	71.5	73
21:20	69.7	68	69.6	71	71	72
21:30	76.7	74	63.2	63	68.3	72
21:40	78.7	78	69.7	67	67.6	67
21:50	74.8	76	68.6	70	67.4	71
22:00	71.6	72	69.4	71	74	73
22:10	63.3	67	75.3	72	70.6	71
22:20	74.8	73	70.1	72	68.7	67

Cuadro 70. Muestreo en tramo 4 (continuación)

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
22:30	73	82	73	72	66.1	69
22:40	69.5	69	73.3	70	66.6	70
22:50	66.2	68	75.3	80	72.1	68
23:00	68.9	66	71.6	71	67.8	66
23:10	66.4	68	77.8	82	63.9	65
23:20	64.7	68	66.9	64	60.1	64
23:30	72.9	76	62.5	68	82.7	82
23:40	68.2	68	72.7	71	58.5	58
23:50	74.4	74	67.2	69	71.8	73
24:00	71	76	70.7	71	77.3	96
24:10	64.5	64	69.5	70	82.2	86
24:20	71.6	73	69.5	72	72.3	72
24:30	72.8	73	71.6	74	68.1	72
24:40	84.2	86	67	72	69.3	72
24:50	72.2	70	73.8	72	69.7	70
25:00	67.2	69	71.2	73	71.7	72
25:10	74.9	74	80	73	81.5	84
25:20	69.3	73	72.7	71	72.4	74
25:30	74.7	73	73.7	75	69.6	70
25:40	68.9	72	92.9	86	76.8	72
25:50	70	72	72.8	73	85	88
26:00	71	72	70.1	66	77.2	76

Cuadro 71. Muestreo en el tramo 5

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
00:10	64.6	68	70.2	67	77.4	75
00:20	73.2	74	73.8	71	66.7	69
00:30	76.1	74	72.8	72	71.4	70
00:40	73.4	72	76.1	75	66.2	72
00:50	70	78	69.6	72	66.6	66
01:00	72.4	72	76.1	72	71.2	62
01:10	66	70	68.5	67	68.9	68
01:20	61.8	64	65.8	66	69.3	72
01:30	75.9	75	64.5	66	60.6	68
01:40	74.1	72	61.7	62	63.6	71
01:50	69.7	72	75.8	75	77.1	74
02:00	71.9	70	75.5	76	73.1	72
02:10	71.5	70	71.4	84	71.1	71
02:20	75.8	74	74.6	74	77.2	69
02:30	67.4	70	74.6	73	76.7	70
02:40	74.5	75	76.7	74	72.6	76
02:50	70.7	70	72.1	72	69.5	71
03:00	77.5	76	87.9	86	76.9	72
03:10	62.1	66	67.4	66	67.6	68
03:20	75.1	72	68.4	69	73.8	70
03:30	73.5	78	64.4	72	71.4	74
03:40	73.5	70	88.2	77	77	74
03:50	65.8	74	68.6	72	72.7	75
04:00	67.9	64	71.3	72	71.2	71
04:10	51.3	57	73.5	74	73.8	74
04:20	57.8	64	60.6	65	86.3	78
04:30	72.3	80	70.9	71	68.8	74
04:40	72.2	70	69.7	70	69.8	66
04:50	77.4	76	65.3	71	73.8	79
05:00	70.7	72	81.8	74	66.9	71
05:10	73.7	72	69.5	76	73.3	70
05:20	72.2	72	76.5	76	84.4	74
05:30	70.8	70	80.2	83	79.5	72
05:40	69.4	70	73.2	68	71	72

Cuadro 71. Muestreo en tramo 5 (continuación)

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
05:50	74	74	84.1	84	68.4	71
06:00	63.5	70	86.5	85	62.9	68
06:10	76.6	74	76.2	73	75.4	75
06:20	70.6	70	69.4	64	89.7	74
06:30	73.3	80	69.3	68	75.5	70
06:40	72	74	75.9	70	73.1	74
06:50	70.3	70	70.9	71	65.7	70
07:00	68.1	70	74.6	74	78.8	74
07:10	81.4	80	69.4	72	61	62
07:20	77.2	73	78.5	72	61.6	60
07:30	67.5	70	73.5	72	60.7	75
07:40	76.6	76	71.9	64	73	74
07:50	74.8	76	70.5	72	75.5	82
08:00	71.1	74	65.4	60	70.1	76
08:10	70.4	74	65.6	66	91.1	80
08:20	73.5	74	70.9	65	70.5	70
08:30	74	78	67.1	72	72.5	72
08:40	74.6	73	75.2	74	80.9	80
08:50	70.3	70	75.3	73	77.7	72
09:00	66.8	67	76.6	79	69.8	73
09:10	70.5	70	65.3	68	78.5	74
09:20	69.5	70	71.9	70	69.3	73
09:30	75.9	68	67.5	69	73	71
09:40	71.2	72	74.5	78	71.6	75
09:50	70.1	72	71.3	75	73.3	72
10:00	80.9	70	86.7	78	70.8	72
10:10	72.7	70	70.7	76	77.3	76
10:20	66.7	68	74.9	70	79	73
10:30	72.3	70	78.3	74	76.8	76
10:40	74.1	68	70.4	71	73.4	71
10:50	76.6	81	72.5	73	69.2	69
11:00	76	74	66.9	64	59.3	72
11:10	70.2	71	74.9	69	55.8	66
11:20	72.9	75	73.8	72	73.4	72

Cuadro 71. Muestreo en tramo 5 (continuación)

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
11:30	70.6	68	76	75	75.3	74
11:40	58.8	56	75.9	80	75.5	76
11:50	50.1	60	79.5	80	75	75
12:00	74.7	70	65.5	68	75.6	76
12:10	64	72	75.9	70	59.9	65
12:20	73.6	72	70.9	70	73.7	70
12:30	67.2	72	68.1	64	75.5	70
12:40	71.9	70	88.2	78	70.1	70
12:50	81.4	82	75.8	79	73	68
13:00	74	75	74.7	75	69	70
13:10	67.4	72	74.3	71	70	68
13:20	72	72	70.7	74	73	81
13:30	69.9	72	75	75	71.7	78
13:40	75.3	73	71.9	71	76.5	73
13:50	72	82	69.9	65	79.8	73
14:00	64	67	64.8	63	70	69
14:10	82.6	76	70.2	65	69.9	70
14:20	76	75	75.7	70	74.7	79
14:30	88.4	88	73.8	74	83.5	82
14:40	74.9	70	75	70	76.8	75
14:50	67.9	72	78.4	73	74.3	74
15:00	69.4	70	70.1	72	75.6	74
15:10	72.1	70	81.8	82	71	71
15:20	77.7	82	74	75	62.5	62
15:30	67.4	80	78.2	77	59.3	64
15:40	69.7	71	67.5	65	77.9	79
15:50	70.1	71	74.3	75	74	74
16:00	85.5	82	61.9	74	72.9	73
16:10	72.1	81	74.5	80	75.8	82
16:20	72.5	70	74.6	79	77.9	72
16:30	70.2	72	69	66	87	82
16:40	66.6	66	71.1	68	64.4	66
16:50	76.7	70	70.8	70	76.8	76
17:00	75.8	72	71.2	73	71.8	66

Cuadro 71. Muestreo en tramo 5 (continuación)

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
17:10	78.2	73	70.9	71	68.2	66
17:20	63.7	70	71.6	74	72	72
17:30	73.5	68	72	70	70.3	66
17:40	63.9	66	74	76	74.9	70
17:50	72.7	72	73.7	74	65.7	68
18:00	71.8	73	86.1	80	70.4	75
18:10	75.3	77	74.1	72	72.9	76
18:20	70.2	69	73.6	70	79.8	77
18:30	65	68	78.3	75	75.3	70
18:40	74.5	76	78.6	72	71.5	70
18:50	72.6	73	80.9	71	64.1	65
19:00	73.6	72	67.5	70	73.4	71
19:10	73.6	73	73.8	65	69.4	71
19:20	69.5	74	82.3	74	71.9	76
19:30	67.9	69	76.4	82	69.5	71
19:40	65.2	83	70.1	75	83.5	81
19:50	73.2	70	87.1	78	69	70
20:00	73.8	67	69.6	68	75.5	73
20:10	66.4	66	67.4	71	75.2	82
20:20	69.3	61	72.2	72	74.8	71
20:30	65.7	74	80.9	73	69.9	70
20:40	70	74	69.3	72	70.7	70
20:50	77.6	78	74.8	74	66.6	67
21:00	73.2	72	69.8	68	80.3	82
21:10	69.7	67	75.8	75	80.2	78
21:20	72	73	80.4	80	60.2	64
21:30	70.1	72	76	75	58.1	54
21:40	74.2	72	68.7	76	55.2	66
21:50	74.8	70	73.3	73	70.8	68
22:00	68.9	72	70	66	74.8	74
22:10	74	72	57.8	60	75.6	75
22:20	66.1	65	73.6	74	75.8	73
22:30	71.1	70	71.8	73	81.9	81
22:40	71.5	70	74.7	75	77.9	75

Cuadro 71. Muestreo en tramo 5 (continuación)

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
22:50	69.8	69	71.4	74	70.6	70
23:00	70.8	70	85.7	84	62.9	68

Cuadro 72. Muestreo en el tramo 6

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
00:10	66.1	70	75.2	69	70.5	79
00:20	72.5	74	71.9	70	65.3	70
00:30	68.9	68	73.6	71	73.5	71
00:40	71.7	75	67.6	71	70.3	70
00:50	78.6	72	70.1	68	70.8	73
01:00	70.4	71	65.3	68	73.6	70
01:10	73.6	70	76.4	75	67.7	74
01:20	67.2	68	76.6	68	65.6	69
01:30	77.9	70	73.8	82	70.8	70
01:40	76.7	76	70.8	72	72.9	71
01:50	67	74	79.6	71	71.9	73
02:00	74.1	72	66.2	72	89	88
02:10	76.6	78	69.7	81	69	75
02:20	74.1	70	64.5	64	69.1	77
02:30	68.7	74	67.5	71	86.2	74
02:40	74.1	74	74	71	77.8	72
02:50	73	86	70.1	92	61.5	64
03:00	77.5	70	76.1	73	71.5	66
03:10	69.8	68	72.7	74	84.9	75
03:20	68.7	68	64	70	68.5	70
03:30	70.3	72	77	82	74.6	73
03:40	67.9	74	75.7	72	79.3	70
03:50	69.7	79	81.3	74	77.6	72
04:00	66.3	75	66	66	75.8	76
04:10	75.9	70	65.1	66	73.7	68
04:20	67.2	68	72.5	68	67	77
04:30	67.5	70	65	74	69	70
04:40	66.4	68	69.5	66	79	71
04:50	69.1	73	76.4	74	74.4	73
05:00	69.7	66	72.9	68	72.2	75
05:10	67.5	71	69.3	67	70.8	74
05:20	74.5	74	62.5	67	76.2	69
05:30	75.3	70	64.3	70	68.9	73
05:40	68.2	69	76.3	70	66.3	75

Cuadro 72. Muestreo en tramo 6 (continuación)

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
05:50	68.3	73	71.5	67	70.5	68
06:00	75.6	72	69.7	69	68.2	69
06:10	67.4	67	64.1	67	66.1	70
06:20	67.9	68	64.3	65	69.8	75
06:30	74.4	74	68.5	76	73.6	72
06:40	80.3	81	70.5	73	67	72
06:50	65.1	64	68.2	68	77	76
07:00	76	78	74.1	73	84	80
07:10	71.6	73	75.1	77	74.9	77
07:20	67.7	70	71	72	71.5	75
07:30	73.4	76	74.3	75	70.6	70
07:40	72.6	76	72.1	70	65.6	67
07:50	74.8	76	77.9	73	72	82
08:00	68	70	75.5	74	76.3	72
08:10	68.3	75	71	76	68.2	68
08:20	66.2	68	72	71	87.4	92
08:30	76.3	71	76.6	73	67.9	73
08:40	66.2	76	66.2	67	67.3	68
08:50	76.1	75	71.1	73	66.2	77
09:00	74.3	79	70.3	68	77	79
09:10	74	72	70.9	77	79.7	74
09:20	78.7	76	76.5	69	75	80
09:30	71.9	66	75.1	77	73.5	78
09:40	75.8	75	72.4	69	67.3	68
09:50	82	78	73.4	75	71.2	73
10:00	64.1	70	63.8	65	80.2	75
10:10	74.4	68	88	92	71.2	66
10:20	69.9	68	65.4	77	67.9	71
10:30	72.7	70	67.2	69	66.3	73
10:40	73.7	79	68	79	77.3	73
10:50	68.5	64	74.1	75	72.4	70
11:00	67.9	70	70	85	76.4	78
11:10	77.6	72	75.2	72	69.4	72
11:20	71.9	74	74.8	77	82	70

Cuadro 72. Muestreo en tramo 6 (continuación)

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
11:30	73.7	73	66.7	72	67.2	80
11:40	78.5	78	64.4	68	77	70
11:50	69.7	73	70.1	67	77.5	70
12:00	69.1	68	76.9	70	71.2	73
12:10	79.9	71	68.4	67	71	67
12:20	75	75	76.3	76	75.5	74
12:30	65.3	69	75.3	80	70.6	73
12:40	81.5	81	72.2	72	68	69
12:50	76	73	71.7	73	76.4	72
13:00	67.2	70	71.5	71	73.8	67
13:10	69.7	75	73.2	68	73.1	70
13:20	75.7	68	69	65	67.8	70
13:30	64.9	67	67.9	77	73.1	74
13:40	74.3	72	70	80	74	77
13:50	74.5	78	78.2	73	72.5	68
14:00	72.8	73	70.1	71	89.6	85
14:10	72	68	75.5	71	74	70
14:20	67.3	67	77.5	68	67.5	80
14:30	72.5	74	73.5	72	75.7	78
14:40	67.5	71	71	72	65.2	72
14:50	71.8	70	60.9	61	72.7	72
15:00	64.7	64	84.6	85	77	73
15:10	80	74	75.5	72	78.5	68
15:20	77.3	76	69.3	79	65.2	78
15:30	69.3	82	73.8	72	73.2	70
15:40	69.3	70	68	70	67.9	70
15:50	69.1	78	67.2	70	74.5	70
16:00	76.2	76	69	80	76.4	82
16:10	76.1	66	74.8	74	74.6	72
16:20	71.7	75	73.4	80	72	70
16:30	71.1	71	69.5	70	74.1	71
16:40	69.7	74	68.3	76	70.1	72
16:50	70.3	73	80	75	72.7	78
17:00	67.8	70	66.8	70	75.2	70

Cuadro 72. Muestreo en tramo 6 (continuación)

Tiempo de medición	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)	Medición Digital (dBA)	Medición analógica (dB)
17:10	73.4	74	66.7	73	71.6	68
17:20	74.4	78	74	76	71.3	71
17:30	73	79	68.4	70	74.2	77
17:40	73.6	71	78.7	72	75.9	72
17:50	69.8	76	74.1	74	66	65
18:00	72.8	73	73.3	76	68	80
18:10	76.8	70	69.3	70	78.6	73
18:20	68.3	81	79.5	80	73.8	70
18:30	69.7	79	78.8	71	74.3	74
18:40	75.6	73	64.7	65	72.6	74
18:50	76.5	69	73.6	72	73.2	73
19:00	71.9	70	71.8	68	73.2	70
19:10	63.9	66	73.3	68	67.3	71
19:20	68	76	68.8	67	70.7	80
19:30	67.5	76	70.7	72	74.6	77
19:40	68.9	67	83.1	83	73.5	72
19:50	77.4	70	76.5	75	74.6	78
20:00	78.5	76	69	68	84	83
20:10	62.5	62	66.6	62	71.2	76
20:20	62.5	73	70.1	68	76.1	78
20:30	72.9	73	69.2	69	70.7	75
20:40	83.9	83	73.6	70	72.3	80
20:50	66.1	68	67.3	67	67.8	77
21:00	64.4	65	75.5	75	81.8	78

ANEXO II



Figura 29. Fotografía de la ubicación de la estación 1



Figura 30. Vista del tramo 1



Figura 31. Vista del tramo 2



Figura 32. Flujo vehicular del tramo 2



Figura 33. Vista del tramo 3



Figura 34. Ubicación del equipo en la estación 3



Figura 35. Vista de la estación 4



Figura 36. Vista del tramo 4



Figura 37. Vista del tramo 5



Figura 38. Vista de la estación 5



Figura 39. Vista del tramo 6



Figura 40. Vista de la estación 6

ANEXO III

Cuadro 73. Ejemplo de información del TPDA utilizado

Ruta:	1	Sección:	20010		Estación	0		
Tramo:	AEROPUERTO JUAN SANTA MARÍA (RADIAL ALAJUELA)(R 153) - MANOLOS (RÍO POAS)(LTE CANTONAL)							
Ubicación:	FRENTE A LA DOS PINOS							
Comentario:								
Año	TPDA	Liviano	Carga Liv.	Bus	C. 2 ejes	C. 3 ejes	C. 4 ejes	C. 5/6 ejes
2013	38 723	65.02	14.75	3.44	8.72	2.82	0.00	5.25
2015	38 372	63.84	16.14	3.39	8.86	1.90	1.15	4.72
2019	45 430	60.74	18.57	2.38	9.26	2.17	0.16	6.72
Nomenclatura:								
Liviano:	Liviano (automóvil, 4x4 y microbús familiar)							
Carga Liv.:	Carga Liviana (pick up y camión pequeño de 2 ejes con eje trasero sencillo)							
Bus:	Buseta de 30 pasajeros o bus de 50 o más pasajeros (incluye también a los buses de más de 2 ejes)							
C. 2, 3, 4 ejes:	Camión No Articulado (de carga, vagoneta y trailer sin carreta)							
C. 5/6 ejes:	Camión Articulado (trailer con carreta, equipo especial y vehículo de 6 o más ejes)							

----- **PÁGINA EN BLANCO**-----

ANEXO IV

Para calcular el valor de nivel sonoro equivalente en campo, se utiliza la ponderación 'A' descrita en el marco teórico. Como ejemplo tomaremos la muestra 1 con el sonómetro digital para el tramo 1. Como se estableció, los valores no se pueden ponderar linealmente, por lo que se debe descomponer la escala logarítmica de la siguiente manera:

$$P = 10^{\frac{dB}{10}} = 10^{\frac{66.1}{10}} = 4.07 MPa$$

Donde P es la presión provocada por ese nivel sonoro, dB es el nivel de ruido en decibelios.

Luego de descomponer cada una de las entradas de la columna de muestra, se suman todas las presiones de todas las muestras para generar un total de presión equivalente (P_{eq}), así:

$$P_{eq} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots = \sum P_i = 3\,240 MPa$$

Ahora, para poder obtener el punto de comparación con la escala de decibelios, devolvemos este valor de presión equivalente a dicha escala, por medio de:

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{P_{eq}}{n} \right) = 10 \log \left(\frac{3\,240 \cdot 10^6}{126} \right) = 74.1 dBA$$

Donde n es la cantidad de muestras registradas.

De la misma manera se procede con la muestra 2 y muestra 3, para al final realizar este mismo procedimiento con los tres valores de las tres muestras, con el fin de obtener un valor de $L_{eq}=75.5 dBA$ como nivel sonoro equivalente para el tramo 1.

Para el modelo CORTN, hay que tener en cuenta que el nivel sonoro a evaluar es en el percentil 10. Acá no hay mucho cálculo que realizar, simplemente es encontrar el valor que se encuentra en la posición correspondiente al 90% del total de muestras ordenadas ascendentemente, que, para el caso del muestreo 1 con sonómetro digital para el tramo 1, se tienen 126 muestras, lo que significa que la posición a tomar es el dato en la posición 113, que corresponde a 81.4 dB. De igual forma se pondera con el método anterior.

Para evaluar los modelos, se utiliza el valor de TPDA y se divide el valor en 24, con el fin de obtener el valor de flujo horario de los vehículos. Esto aplica para todos los modelos y para todos los flujos que se necesitan para evaluar los modelos. Eso sí al ver la hoja del MOPT que reporta los valores de TPDA, se nota que son valores totales de tráfico diario. Para dividir en categorías de acuerdo a cada modelo, se toma el valor que se da en cada columna como un porcentaje y se aplica este para conocer la cantidad de vehículos diaria de acuerdo a la categoría que se requiere. Por ejemplo, para saber la cantidad de automóviles en el modelo FHWA, se tomó el porcentaje de livianos y carga liviana y se aplicó al total de TPDA. Así:

$$N_{diario} = 45\,430 * \frac{60.74 + 18.57}{100} = 36\,024 \text{ veh/día}$$

$$N = \frac{36\,024}{24} = 1\,502 \text{ veh/h}$$

Modelo FHWA

El nivel equivalente de emisión de cada vehículo se obtiene con las ecuaciones 5, 6 y 7 respectivamente para cada categoría; así, para los livianos tenemos:

$$L_0E_i = 38.1 \log(82) - 2.4 = 70.5 \text{ dBA}$$

Además, se utilizaron las ecuaciones 8 y 9 para evaluar la corrección por tráfico y distancia respectivamente. Para mostrar un ejemplo, se tomó como referencia el tramo 1 para este y los otros dos modelos. Se muestra el cálculo:

$$\Delta_{tráfico} = 10\log\left(\frac{1\,501 * 15.2}{82}\right) - 25 = -0.6 \text{ dBA}$$

$$\Delta_{distancia} = 10\log\left(\left(\frac{15.2}{13.8}\right)^{1+0.5}\right) = 0.6 \text{ dBA}$$

Para la corrección por pendiente, simplemente se debe consultar el Cuadro 8.

Así el modelo FHWA, se utiliza la ecuación 4 para cada uno de las categorías de vehículo. Se muestra el ejemplo para el caso de la categoría automóviles del modelo:

$$L_{eq} = 70.5 - 0.6 + 0.6 + 0 = 70.6 \text{ dBA}$$

Estas correcciones se deben realizar para las tres categorías de vehículos, por lo que, de acuerdo con la ecuación 3, se obtiene:

$$L_{eq} = 10\log(10^{0.1*70.6} + 10^{0.1*73} + 10^{0.1*75.2}) = 78.1 \text{ dBA}$$

Modelo CORTN

El modelo CORTN presenta un nivel de ruido base, dado por la ecuación 11. Para este caso, se trabaja con el tramo 1.

$$L_0 = 42.2 + 10\log(1\,893) = 75.2 \text{ dB}$$

Acá, es necesario calcular el porcentaje de flujo de camiones pesados. Esto simplemente se calcula como un porcentaje del total de vehículos por hora de la categoría pesado contra el total del flujo, así:

$$Porc.pesados = \frac{743}{1893} * 100 = 39.3 \%$$

Además, tiene correcciones regidas por las ecuaciones 12, 14, 15, 16 y 17. A continuación, el ejemplo de cálculo para cada una.

$$\Delta f = 33 \log \left(70 + 40 + \frac{500}{70} \right) + 10 \log \left(1 + \frac{5 * 39.3}{70} \right) - 68.8 = 5.3 \text{ dB}$$

$$\Delta g = 0.3 * 0.3 = 0.09 \approx 0.1 \text{ dB}$$

$$\Delta p = -1 \text{ dB}$$

$$\Delta d = -10 \log \left(\frac{\sqrt{(6 + 3.5)^2 + 1.5^2}}{13.5} \right) = 1.5 \text{ dB}$$

$$\Delta c = 5.2 * 1 * \log \left(\frac{6 * 1.5 - 1.5}{6 + 3.5} \right) = -0.4 \text{ dB}$$

Con esto, podemos evaluar el modelo, con ayuda de la ecuación 10:

$$L_{10} = 75.2 + 5.3 + 0.1 - 1 + 1.5 - 0.4 = 80.6 \text{ dB}$$

Modelo Valdivia

Este modelo se evalúa únicamente con una ecuación (18), apoyada con las correcciones mostradas en los cuadros de la sección 1.5.5.3.

$$L_{eq} = 33.6 + 10 \log(1326 + 9.2 * 523 + 6 * 45) + 0 + 4 = 75.7 \text{ dB}$$

El detalle con este modelo es que, para poder compararlo, es necesario realizar una corrección extra, debido a que el modelo indica el nivel de ruido equivalente a 25 m del punto de medición, distancia que en ninguno de los tramos es la de medida. Por lo tanto, es necesario realizar la corrección por atenuación de ruido, para llevarlo de 25 m a 13.8

que es la distancia de medida en el tramo 1. En este caso, no sería una atenuación, si no más bien aumenta el nivel de ruido debido a que está más cerca de la fuente. Entonces:

$$L_{\text{corregido}} = 75.7 + 20 \log \left(\frac{25}{13.8} \right) = 80.8 \text{ dB}$$

Validación de los modelos

Para validar todos los modelos, simplemente se realiza una resta algebraica entre el valor de campo y el valor obtenido con el modelo. Así, para el tramo 1, nivel de ruido equivalente A y con el sonómetro digital tenemos:

$$Dif = 78.2 - 78.1 = 0.1 \text{ dB}$$

De igual manera aplica para todas las demás mediciones.

Porcentaje de error

Este porcentaje de error es simplemente:

$$\% \text{ error} = \frac{|L_{eq \text{ modelo}} - L_{eq \text{ campo}}|}{L_{eq \text{ modelo}}} * 100 = \frac{|78.2 - 78.1|}{78.2} * 100 = 0.2 \%$$

Prueba estadística

Para este apartado, el único cálculo que se realizó es el del valor del estadístico Z, por medio de la ecuación:

$$Z = \frac{\text{Promedio campo} - \text{Valor modelo}}{\left(\frac{\text{desv. est. campo}^2}{n_{\text{campo}}} \right) + \left(\frac{\text{desv. est. campo}^2}{n_{\text{modelo}}} \right)} = \frac{77.9 - 78.1}{\left(\frac{0.2^2}{6} \right) + \left(\frac{0.2^2}{1} \right)} = 1.085$$

Se muestra el ejemplo para el modelo FHWA para el tramo 1.

Atenuación para asentamientos

De igual manera que con el modelo Valdivia, se realizó una atenuación de ruido para obtener el valor de nivel sonoro a una distancia requerida, la cual es la distancia de la fuente al asentamiento humano más próximo para comparar con los niveles permitidos en Costa Rica. Se muestra el ejemplo para el tramo 1.

$$L_{atenuado} = 78.0 + 20 \log \left(\frac{13.8}{40} \right) = 68.7 \text{ dBA}$$

ANEXO V

Cuadro 74. Prueba estadística para el tramo 1

H0: No existe diferencia significativa entre las medias

H1: Existe diferencia significativa entre las medias

Mediciones de campo (dB)	FHWA (dB)	Z calculado	Z teórico	Conclusión
78.2	78.1	1.085	1.645	No rechazo H0
77.9				
77.8	Valdivia (dB)	Z calculado	Z teórico	Conclusión
78.0	80.8	14.579	1.645	Rechazo H0
77.8				
77.6				

Mediciones de campo (dB)	CORTN (dB)	Z calculado	Z teórico	Conclusión
81.4	80.6	0.854	1.645	No rechazo H0
80.9				
80.4				
81.0				
80.9				
80.7				

Cuadro 75. Prueba estadística para tramo 2

H0: No existe diferencia significativa entre las medias

H1: Existe diferencia significativa entre las medias

Mediciones de campo (dB)	FHWA (dB)	Z calculado	Z teórico	Conclusión
80.7	74.6	3.139	1.645	Rechazo H0
77.1				
78.1	Valdivia (dB)	Z calculado	Z teórico	Conclusión
79.6	76.2	2.086	1.645	Rechazo H0
79.7				
81.0				

Mediciones de campo (dB)	CORTN (dB)	Z calculado	Z teórico	Conclusión
82.5	79.2	2.695	1.645	Rechazo H0
80.9				
80.3				
82.0				
81.0				
81.7				

Cuadro 76. Prueba estadística para tramo 3

H0: No existe diferencia significativa entre las medias

H1: Existe diferencia significativa entre las medias

Mediciones de campo (dB)	FHWA (dB)	Z calculado	Z teórico	Conclusión
77.2	77.1	0.584	1.645	No rechazo H0
77.7				
77.5	Valdivia (dB)	Z calculado	Z teórico	Conclusión
80.4	77.0	0.662	1.645	No rechazo H0
76.8				
77.4				

Mediciones de campo (dB)	CORTN (dB)	Z calculado	Z teórico	Conclusión
79.1	77.6	3.574	1.645	Rechazo H0
80.7				
80.0				
81.0				
80.0				
81.0				

Cuadro 77. Prueba estadística para tramo 4

H0: No existe diferencia significativa entre las medias

H1: Existe diferencia significativa entre las medias

Mediciones de campo (dB)	FHWA (dB)	Z calculado	Z teórico	Conclusión
76.8	74.3	1.242	1.645	No rechazo H0
75.8				
74.4	Valdivia (dB)	Z calculado	Z teórico	Conclusión
78.9	75.4	0.837	1.645	No rechazo H0
82.1				
78.1				

Mediciones de campo (dB)	CORTN (dB)	Z calculado	Z teórico	Conclusión
78.1	79.6	1.551	1.645	No rechazo H0
77.7				
77.7				
78.0				
77.5				
80.0				

Cuadro 78. Prueba estadística para tramo 5

H0: No existe diferencia significativa entre las medias

H1: Existe diferencia significativa entre las medias

Mediciones de campo (dB)	FHWA (dB)	Z calculado	Z teórico	Conclusión
74.6	73.5	1.669	1.645	Rechazo H0
77.6				
77.2	Valdivia (dB)	Z calculado	Z teórico	Conclusión
74.9	75.2	0.407	1.645	No rechazo H0
75.6				
74.6				

Mediciones de campo (dB)	CORTN (dB)	Z calculado	Z teórico	Conclusión
76.6	78.4	0.151	1.645	No rechazo H0
80.6				
79.2				
78.0				
79.0				
78.3				

Cuadro 79. Prueba estadística para tramo 6

H0: No existe diferencia significativa entre las medias

H1: Existe diferencia significativa entre las medias

Mediciones de campo (dB)	FHWA (dB)	Z calculado	Z teórico	Conclusión
74.1	76.0	0.096	1.645	No rechazo H0
74.8				
77.1	Valdivia (dB)	Z calculado	Z teórico	Conclusión
74.8	76.6	0.510	1.645	No rechazo H0
77.4				
77.0				

Mediciones de campo (dB)	CORTN (dB)	Z calculado	Z teórico	Conclusión
77.5	80.0	1.525	1.645	No rechazo H0
77.0				
78.8				
78.0				
79.5				
79.5				