



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

CORRELACIÓN ENTRE LOS NIVELES DE RUIDO DE TRÁFICO Y LA
CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PRODUCIDO POR EL
TRÁFICO VEHICULAR EN LA AUTOPISTA GENERAL RUMIÑAHUI

AUTOR

CARLOS ANDRÉS TIPÁN LALA

AÑO

2019



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

CORRELACIÓN ENTRE LOS NIVELES DE RUIDO DE TRÁFICO Y LA
CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PRODUCIDO POR EL
TRÁFICO VEHICULAR EN LA AUTOPISTA GENERAL RUMIÑAHUI.

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero en Sonido y Acústica

Profesor guía
MSc. Miguel Ángel Chávez Avilés

Autor
Carlos Andrés Tipán Lala

Año
2019

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo, Correlación Entre los Niveles de Ruido de Tráfico y la Concentración de Material Particulado Producido por el Tráfico Vehicular en la Autopista General Rumiñahui a través de reuniones periódicas con la estudiante Carlos Andrés Tipán Lala, en el semestre 2019-2, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Miguel Ángel Chávez Avilés
Master of Science in Sustainable Building
CI: 1710724848

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber dirigido este trabajo, Correlación Entre los Niveles de Ruido de Tráfico y la Concentración de Material Particulado Producido por el Tráfico Vehicular en la Autopista General Rumiñahui, del estudiante Carlos Andrés Tipán Lala, en el semestre 2019-2, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Luis Alberto Bravo Moncayo
Doctor en Ingeniería Acústica
CI: 1711710606

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”.

Carlos Andrés Tipán Lala

C.I. 1726320235

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a mi familia por todo el apoyo brindado durante todo este tiempo. Por demostrarme que no estoy solo en situaciones difíciles. Agradezco a cada uno de mis profesores por compartir sus conocimientos y corregir cada una de mis falencias. Y finalmente a la vida por darme más de lo que he podido desear.

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mis padres por ser la inspiración diaria para seguir adelante con mis sueños y anhelos. De ellos aprendí que todo en la vida se lo gana con esfuerzo y valentía. A mis hermanos por siempre estar unidos en cada situación, ya sea esta buena o mala. A Dios por darme toda la sabiduría, inteligencia y talento necesario para forjar un futuro prometedor en este mundo.

RESUMEN

La finalidad del presente estudio es, correlacionar los niveles de ruido de tráfico y concentración de material particulado (PM) producidos en la Autopista General Rumiñahui. Para lo cual se aplicó un análisis de sondeo, ya que este considera las peores condiciones en la evaluación de contaminación atmosférica. La evaluación del aporte de emisiones de la fuente, se basa en un barrido de las condiciones atmosférica, permitiendo identificar la situación ambiental más y menos favorable para la dispersión y propagación de los contaminantes. La primera etapa fue identificar los horarios con mayores niveles de emisión de material particulado y plantear los puntos de medición. Posteriormente se realizó mediciones de nivel de ruido, concentración de material particulado, velocidad y dirección del viento, humedad y temperatura del aire y flujo vehicular. El análisis de factores ambientales permitió identificar si la atmósfera está dentro de los parámetros de estabilidad atmosférica, debido a que el material particulado es susceptible a turbulencias mecánicas y térmicas. Por otro lado, los niveles de ruido varían de acuerdo al nivel de flujo vehicular y condiciones ambientales. Finalmente, se planteó identificar las mediciones de ruido y material particulado que decaen respecto a la distancia, mientras el receptor se aleja de la fuente. El fenómeno físico que describe este comportamiento es la divergencia geométrica para los niveles de ruido y la relación inversa del material particulado con la velocidad del viento para los niveles de concentración de PM_{2.5}. Como resultado el coeficiente de correlación es de 0.88 y con una significancia estadística menor a 0.01, por lo cual se demuestra que ambos contaminantes están correlacionados al venir de una misma fuente de emisión.

ABSTRACT

The purpose of this study is to correlate the levels of traffic noise and concentration of particulate material (PM) produced by the Rumiñahui General Highway. For this purpose a survey analysis was applied, since it considers the worst conditions in the air pollution assessment. The evaluation of the contribution of source emissions is based on a sweep of the atmospheric conditions allowing to identify the better and worst environmental situations for the dispersion and propagation of the pollutants. In the first stage, the schedules with the highest level of emission of particulate material was identified and the measurement points were defined. Subsequently, noise level measurements, particulate material concentration, wind speed and direction, humidity and air temperature, and vehicle flow were collected. The analysis of environmental factors allowed to identify if the atmosphere is within the parameters of atmospheric stability, due to the particulate material is susceptible to mechanical and thermal turbulence. On the other hand, noise levels varies according to the level of vehicle flow and environmental conditions. Finally, it was proposed to identify the noise levels and particulate material that decay with respect to distance while the receiver moves away from the source. The physical phenomena that describe this behavior for noise levels is geometric divergence, and for PM_{2.5} concentration levels it is the inverse relationship of particulate material with wind speed. As a result, the correlation coefficient is 0.88 and with a statistical significance of less than 0.01, which shows that both pollutants are correlated when coming from the same emission source.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Alcance.....	5
1.3 Justificación	6
1.4 OBJETIVOS	6
1.4.1 Objetivo General	6
1.4.2 Objetivos específicos	7
2. MARCO TEORICO.....	7
2.1 Autopista General Rumiñahui.....	7
2.2 Características Físicas del Terreno y de Movilidad.....	9
2.3 Material Particulado - PM2.5.....	14
2.3.1 Modelos de Dispersión de PM.....	17
2.3.2 Efectos del Material Particulado en la Salud Humana	22
2.4 Ruido de Tráfico	23
2.4.1 Ruido de Propulsión.....	23
2.4.2 Ruido Aerodinámico	23
2.4.3 Ruido de Rodadura	24
2.4.4 Efectos del Ruido en la Salud Humana	24
2.5 Velocidad de Cruce.....	26
2.6 Mapas de ruido	27
2.6.1 Modelo Alemán RLS – 90.....	28
3. METODOLOGÍA.....	30
3.1 Monitoreo	30
3.2 Instrumentación	38
3.3 Conteo Vehicular.....	40
3.4 Generación del Mapa de Ruido	40
3.4.1 Curvas de Nivel.....	41
3.4.2 Capa Construcciones	43

3.4.3 Buffer 500 m.....	43
3.4.4 Levantamiento Vial.....	44
3.4.5 Cadna-A - Mapa de Ruido.....	45
4. RESULTADOS	47
4.1 Estabilidad Atmosférica	47
4.2 Análisis de Temperatura y Humedad Relativa.....	51
4.3 Análisis de PM2.5.....	52
4.4 Análisis de Ruido.....	57
4.5 Correlación PM2.5 y Ruido	62
4.6 Análisis de Mapa de Ruido.....	69
4.6.1 Validación del modelamiento.....	69
4.6.2 Límites Máximos de Ruido Ambiental.....	70
4.7 Discusión de resultados.....	76
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
5.1 Conclusiones.....	80
5.2 Recomendaciones	83
REFERENCIAS.....	84
ANEXOS.....	89

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En la actualidad, la contaminación atmosférica es uno de los temas con mayor relevancia, debido a que su mayor concentración se encuentra en áreas urbanas afectando a corto y largo plazo a la salud de sus habitantes. Se la puede definir como la acción de introducir sustancias u otros elementos físicos a un ecosistema equilibrado. Por este motivo se ha dado paso al estudio, control y creación de políticas de calidad del aire por medio de entidades gubernamentales o privadas (Ubilla & Yohannessen, 2017, p. 116).

En este caso el material particulado y el ruido de tráfico mantienen una presencia constante en el día a día de los habitantes de una ciudad en constante crecimiento. Ya que existen varias fuentes de emisión como: tráfico vehicular, industrias, quema de combustible doméstico, fuentes naturales y fuentes no identificadas de origen humano. De acuerdo a la investigación realizada por Karagulian et al (2015, p. 479) existe un 30% de PM_{2.5} y 34% de PM₁₀ en zonas urbanas de Sudamérica siendo una de las regiones con mayor nivel de emisión de PM a comparación con otras regiones del mundo solo por tráfico vehicular.

Según la World Health Organization (2016, p. 27) una de cada nueve muertes en todo el mundo está ligada directamente con la contaminación atmosférica. En América se registran 93.000 muertes anualmente en países de ingresos bajos y medios (Ecuador, Perú, Colombia, etc.), 44.000 muertes en países de ingresos altos (USA, Canadá). En países de ingresos bajos y medios se calcula que existen 18 muertes por cada 100.000 habitantes, en países de ingresos altos 7 muertes por cada 100.000 habitantes. Todos estos decesos están asociados a cáncer de pulmón, obstrucción pulmonar crónica (COPD), accidentes cerebrovasculares y cardiopatías isquémicas. Además, la mayor huella esta sobre la mortandad infantil, ya que más de la mitad de las muertes de niños menores a 5 años se deben a infecciones agudas de las vías respiratorias.

Los niveles de ruido de igual manera han ido aumentando paulatinamente conforme al desarrollo industrial y humano (transporte, educación, salud). El daño sobre la salud a causa del ruido se puede dividir en 4 categorías, problemas: psicológicos, fisiológicos, psicológicos y de desarrollo laboral. Asimismo, existen 3 maneras en las cuales el ruido se puede estudiar en zonas habitadas; ruido de tráfico, ruido industrial y en relación de actividades humanas (Olayinka, 2013, p. 5).

En el 2014 se realizó un estudio de correlación entre partículas ultra finas (UFP), PM 2.5 y el nivel de ruido de tráfico de 2 autopistas de los Ángeles, California. Por cada 5 min se promedió el nivel equivalente continuo en ponderación A (LeqA), el UFP se promedió de acuerdo a la densidad numérica y el PM2.5 en concentración de masa. Se midió la dispersión de cada contaminante ambiental mientras se alejaban de la fuente de emisión. Los resultados indican que los residentes que viven en zonas donde el viento predomina a su favor están expuestos a mayor nivel de UFP y ruido por emisión de tráfico de vehicular, excepto los lugares que poseen pantallas acústicas. Al contrario de los residentes que viven en zonas en donde la dirección del viento está en su contra, reciben menores niveles de concentración de PM2.5. La investigación sugiere que existe correlaciones moderadas entre los pares de LeqA-UFP, PM2.5-UFP y estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Los niveles de ruido y PM2.5 no mostraron un coeficiente de correlación fuerte y además una significancia estadística débil ($p > 0.05$) (Shu et al., 2014, p. 135). En el 2016 un estudio de dispersión de material particulado PM10 plantea que la temperatura y humedad del aire son factores que afecta directamente a la concentración del material particulado en el eje de dispersión (Arrieta, 2016, p. 44).

En el ámbito de la ciudad de Quito la Secretaria de Movilidad (2015) creó el Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del mismo año, el cual indica que el parque automotor aumenta entre un 5% y 10% anualmente, lo que implica que en las calles circulen entre 15.000 y 35.000 vehículos al año. Solo al

culminar el 2014, 50.000 vehículos nuevos se entraron en circulación en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). Los problemas de viabilidad cada año se agravan por el incremento del parque automotor, la saturación vial que sufre el DMQ es del 35% de la red principal. Como indica la Secretaria de Movilidad existen cuerpos normativos que restringen la circulación vehicular en horas pico. El primero es el llamado sistema pico y placa que nace en el año 2010 a partir de la Resolución No. A-0017 y la Ordenanza Metropolitana No. 147, la cual regula el transporte de carga y productos químicos peligrosos. Dando resultados favorables en un inicio, pero como el parque automotor aumenta anualmente, esto ha llevado a que cuerpo normativo sea ineficaz e ineficiente. Dicha entidad municipal ha realizado una proyección del parque automotor e indica que para el 2030 en la ciudad de Quito estarán en circulación 1'150.000 vehículos, por lo cual el escenario podía ser insostenible.

Para este estudio se toma como fuente lineal de contaminación a la Autopista General Rumiñahui la cual se encuentra en la provincia de Pichincha y une a los cantones Rumiñahui y Quito. Esta gran obra ha dado paso al crecimiento poblacional y comercial del cantón Rumiñahui. De acuerdo a la municipalidad del mismo cantón, la población pasó de 65.882 a 85.852 habitantes en tan sólo 10 años (2001-2011), donde actualmente la población económicamente activa llega a 42.208 (Zambrano & Chauvín, 2016). Según a la Dirección de Planificación Territorial de Rumiñahui de la municipalidad, para el 2025 la población podría alcanzar los 124.871 habitantes. La Dirección de Transporte (2019) del cantón Rumiñahui indica que en la autopista transitan diariamente 63.597 vehículos que circulan entre Quito y el Valle de los Chillos. En la tabla 1 se muestra el número de cooperativas de transporte autorizadas para circulación:

Tabla 1.

Número de transporte autorizado.

Tipo de transporte	# de unidades
Buses Intra-provinciales	266
Camionetas – Carga liviana	96
Transporte mixto	80
Carga pesada	70
Escolar e institucional	217
Taxis	376

La Prefectura de Pichincha (2019), institución que maneja el servicio de peaje, de enero a mayo del 2019, ha registrado un total de 10.397.527 de vehículos y en el año 2018 un total 25.607.444 que circularon a la largo de la Autopista General Rumiñahui, en sentido Quito - Valle – Quito y viceversa.

La Secretaria del Ambiente (2019) del DMQ en su página Web permite el acceso a la Red de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ). La entidad municipal posee 9 estaciones, colocadas en diferentes puntos estratégicos de la ciudad, las mismas que transmiten a tiempo real, a la sede central. Dichas estaciones realizan el monitoreo de: material particulado (CO, NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂), velocidad del viento, humedad relativa, radiación ultra violeta, temperatura y precipitación. Las mediciones realizadas por cada estación se pueden descargar de manera gratuita en intervalos de tiempo (meses, días, horas). A partir de la base de datos de la estación los Chillos se puede realizar un análisis previo, del estado de contaminación atmosférica de la Autopista General Rumiñahui.

Por otro lado, para estudiar la propagación y niveles de ruido en puntos no medidos se puede hacer uso de modelos de predicción de sonora, como, por ejemplo, el modelo RLS – 90 (Richtlinien für den Lärmschutz an Straben). Dicho modelo es el estándar nacional alemán para el levantamiento de mapas de ruido de tráfico, el cual se basa en el cálculo de propagación sonora fuente – receptor.

Un mapa de ruido inicia a partir del levantamiento digital del terreno, para esto es necesario obtener: curvas de nivel del área de estudio, tipo y número de edificaciones, áreas verdes y superficie vial, montados en un Sistema de Información Georreferenciado (GIS). Posteriormente se ingresan datos hora de tráfico vehicular en el software de predicción de ruido; número de vehículos livianos y pesados, porcentaje de vehículos pesados y límites de velocidad. Finalmente, un análisis del mapa de ruido puede identificar la situación acústica de una zona predeterminada. Lo cual ayuda a la toma de decisiones tanto a nivel normativo (correcciones de niveles máximos permisibles) como a la aplicación de sistemas de protección acústicos (Murillo, Gil, Zapata, & Téllez, 2015, pp. 175-177).

Por último, cabe mencionar que la calidad de los combustibles a nivel nacional bajo 2 octanos en marzo de 2019 tanto para gasolina extra y súper; anteriormente su octanaje era de 87 y 92 octanos. Debido a que la Refinería de Esmeraldas fue paralizada por reparaciones en las áreas CATALICA 1 y NO CATALITICA 1. De acuerdo al Ministro de Sectores Estratégicos el nivel de azufre y gas contaminante no se verá afectado, pero se prevé que el consumo de gasolina aumente en un 5% (El Comercio, 2019). La Secretaria de Movilidad afirma que el sector automotriz aporta el 53% de la huella de carbono y un 66% de material particulado en el DMQ.

Dados estos antecedentes se evidencia la necesidad de encontrar la correlación entre los niveles de ruido y la concentración de material particulado de la Autopista General Rumiñahui. También, se plantea levantar el mapa de ruido de la zona para estudiar la propagación del ruido. Los niveles simulados también servirán para ser aplicados en un modelo de regresión lineal para predecir los niveles de PM de acuerdo a los resultados de correlación.

1.2 Alcance

El estudio plantea encontrar el coeficiente de correlación y significancia estadística entre los niveles de ruido y concentración de PM_{2.5} de la Autopista

General Rumiñahui, la cual será considerada como una fuente lineal para ambos contaminantes. La zona de estudio está comprendida entre el sector del Trébol y el Centro Comercial San Luis Shopping con una longitud aproximada de 14 km.

Cada punto de medición se encuentra disperso, tanto a la derecha como a la izquierda de la autopista con una distancia máxima de 200 m. Se monitorearán los niveles de ruido, concentración de material particulado, flujo vehicular, velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa del aire. Además, se propone levantar un modelo de regresión lineal para predecir los niveles de PM 2.5 a partir de los resultados de correlación. Los niveles de ruido tráfico simulados con el modelo RLS – 90 serán considerados como variable independiente y material particulado como variable dependiente en el modelo de regresión. Finalmente, el mapa de ruido también ayudará a estudiar la propagación del ruido en los alrededores de la vía en un radio de 500 m.

1.3 Justificación

Este proyecto de investigación demuestra que la contaminación atmosférica es un tema de estudio de alta complejidad. Debido a que la estabilidad de la atmósfera interfiere con los niveles de concentración de material particulado para que una zona poblada reciba mayor o menor contaminación. Además, hace hincapié en la falta de normativas que regulen a este tipo de fuentes lineales, específicamente en el tema de ruido. Ya que a lo largo de la autopista se identificó zonas pobladas que se encuentran a pocos metros de la vía sin ningún tipo de protección acústica.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Evaluar la correlación entre los niveles de ruido de tráfico y la concentración de material particulado PM 2,5 producido por el tráfico vehicular en la Autopista General Rumiñahui.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar mediciones de ruido de la autopista que cumplan un procedimiento estipulado en la norma ISO 1996-2 y mediciones de PM2.5 de acuerdo al AM 097-A.
- Analizar la dispersión de los niveles de ruido por medio del mapa de ruido.
- Definir el modelo de regresión lineal entre los niveles de ruido del tráfico y PM2.5 a partir de resultados de correlación.

2. MARCO TEORICO

2.1 Autopista General Rumiñahui

La construcción de la autopista empezó en la década de los 70's a partir de la firma del Decreto 169 el 31 de mayo de 1938. Se la considera una obra trascendental, ya que facilitó el desplazamiento desde Quito hacia el Valle de los Chillos, trayendo un crecimiento poblacional, comercial y urbano del cantón Rumiñahui (Zambrano & Chauvín, 2016). En la figura 1 se muestra el trayecto de la autopista a lo largo del cantón Rumiñahui y Quito.

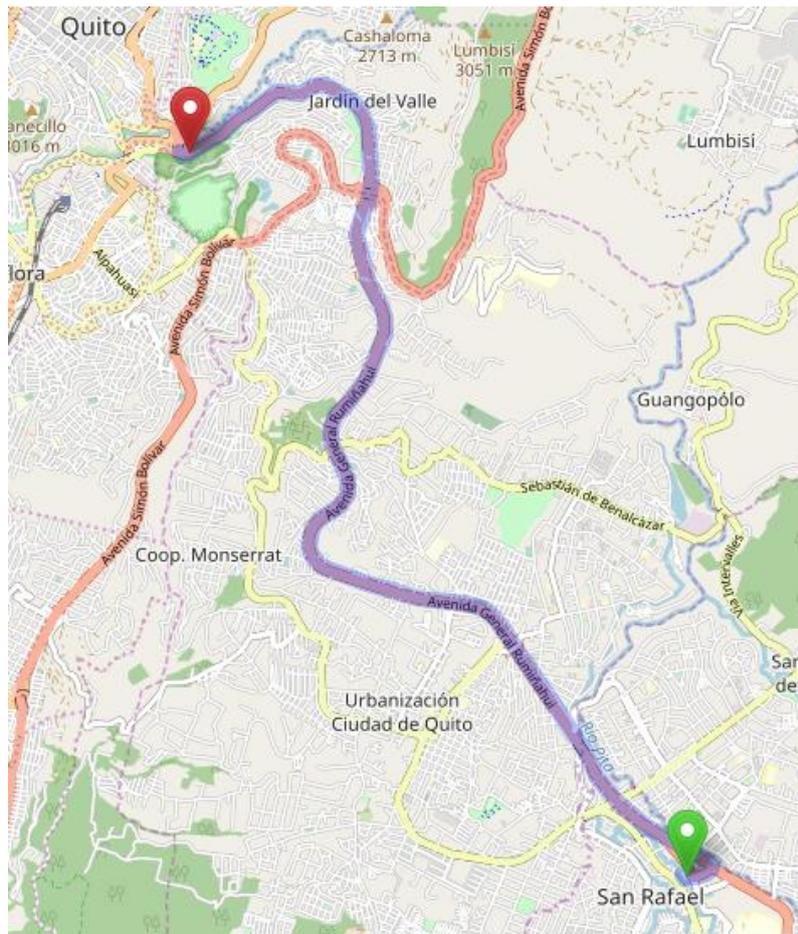


Figura 1. Trayecto de la Autopista General Rumiñahui.

Adaptado de (Google Maps, 2019).

La autopista inicia en el Trébol y culmina en el puente sobre el Río San Pedro, con una longitud de 12 Km. Posteriormente se convierte en una avenida interna del cantón Rumiñahui. Posee 7 carriles; 3 en sentido Los Chillos – Quito, 2 exclusivos para vía rápida y 2 en el sentido Quito – Los Chillos. El límite máximo de velocidad para vehículos livianos es de 90 Km/h y 70 Km/h para pesados. Como vía interna a partir del puente sobre Río San Pedro los límites de velocidad son de 50 Km/h para vehículos livianos y 40 Km/h para pesados. A lo largo de la vía se ubican 9 puentes peatonales, también posee un peaje con 14 cabinas de cobro las cuales funcionan desde 05:45 hasta las 22:00 horas; existe el sistema de tele peaje el cual funciona en 4 de los carriles intermedios (El Comercio,

2015). La autopista al ser una vía de alto flujo vehicular, se implementaron medidas que ayuden a mejorar el tránsito en horas pico de la mañana y tarde el llamado “contraflujo”, el cual se implementó en los dos carriles intermedios. El contraflujo en el sentido Quito – Valle acoge alrededor de 49.810 vehículos en horario nocturno, los horarios de activación son desde las 06:00 a 08:30 y en la tarde de 17:30 hasta las 20:30 de lunes a viernes.

De acuerdo a los intereses del proyecto el área de estudio se extiende desde el Trébol hasta el C.C San Luis Shopping con una longitud de 14 km. La distancia máxima entre la fuente (vía) y receptor es de 200 m para las mediciones de ruido y PM2.5. El radio de modelamiento del mapa de ruido es de 500 metros.

2.2 Características Físicas del Terreno y de Movilidad

A lo largo de la vía se puede identificar sectores con altos y bajos niveles de flujo vehicular, esto se debe a que de la autopista se derivan vías que redirigen el flujo hacia zonas habitadas (pueblos, barrios, conjuntos habitacionales), por ejemplo, la Av. Simón Bolívar, Intercambiador La Armenia, el sector del Triángulo y Puente 8. A éstos sectores se los puede catalogar como de alto tráfico, ya que redirigen el flujo de la autopista hacia zonas como Conocoto, La Armenia, San Rafael y Norte y Sur de la ciudad.

Según la Prefectura de Pichincha (2019) en la Autopista General Rumiñahui circulan vehículos de 2 hasta 6 ejes. En la tabla 2 se muestra el crecimiento anual del flujo vehicular en los sentidos Quito – Valle – Quito. Como puede verse desde el año 2009 hasta el 2018 existe un incremento del 25% del flujo vehicular lo cual representa un total de 6,279.988 de vehículos livianos y pesados en circulación Quito – Valle – Quito en tan solo 10 años. Además, el flujo de vehículos livianos a partir del año 2013, ha aumentado considerablemente hasta la fecha, un ejemplo, en el año 2012 se registró alrededor de 7 millones de vehículos livianos circulando en ambos sentidos y en el 2013 se registró 11,000.000 de vehículos.

Tabla 2

Tráfico anual de la Autopista General Rumiñahui del 2009 al 2019.

SENTIDO VALLE-QUITO								SENTIDO QUITO-VALLE							
AÑOS	LIVIANOS	2 EJES	3 EJES	4 EJES	5 EJES	6 EJES	TOTAL	LIVIANOS	2 EJES	3 EJES	4 EJES	5 EJES	6 EJES	TOTAL	TOTAL GENERAL
2009	8.822.940	893.249	20.987	2.762	24.048	4.318	9.768.304	8.628.693	878.510	20.841	3.284	22.579	5.245	9.559.152	19.327.456
2010	9.756.265	883.060	20.871	3.528	23.822	3.743	10.691.289	9.259.088	869.116	24.755	3.956	20.921	3.543	10.181.379	20.872.668
2011	9.648.819	860.737	20.826	5.298	24.253	7.925	10.567.858	10.018.178	865.977	22.559	6.169	22.544	8.613	10.944.040	21.511.898
2012	7.394.790	594.087	19.417	4.164	15.411	4.328	8.032.197	7.868.191	598.063	17.636	4.524	12.458	3.767	8.504.639	16.536.836
2013	11.017.961	850.952	21.302	6.927	26.743	15.283	11.939.168	11.758.658	857.979	20.467	8.089	23.789	21.285	12.690.267	24.629.435
2014	11.068.561	851.702	19.559	8.741	24.513	30.413	12.003.489	10.897.649	873.862	19.497	8.024	26.356	27.787	11.853.175	23.856.664
2015	10.690.644	876.234	19.889	7.306	27.448	26.059	11.647.580	11.240.017	859.176	19.142	9.648	23.674	32.319	12.183.976	23.831.556
2016	11.252.269	861.657	14.840	6.430	21.188	4.540	12.160.924	12.689.098	871.503	15.032	7.704	16.587	3.839	13.603.763	25.764.687
2017	10.673.468	915.364	16.821	5.548	22.243	5.291	11.638.735	12.624.439	917.237	15.982	6.595	17.079	4.772	13.586.104	25.224.839
2018	10.752.026	933.065	18.458	5.265	24.087	5.346	11.738.247	12.896.039	926.573	16.783	6.464	18.511	4.827	13.869.197	25.607.444
2019	4.366.262	383.198	6.658	2.051	9.604	1.920	4.769.693	5.229.638	380.014	6.511	2.515	7.379	1.777	5.627.834	10.397.527

Tomado de (Prefectura de Pichincha, 2019, p. 1).

El año 2012 registra un decaimiento del flujo vehicular con respecto a años anteriores, al compararlo con el periodo 2013 existe una diferencia de 8,092.599 de vehículos. Ese mismo año el Gobierno Nacional anunció la creación de programas gubernamentales que reduzcan el nivel de emisión de azufre al ambiente, de 2000 a 600 partes por millón (ppm). De esta manera se espera cumplir con las normas de calidad europea como la EURO 5, la cual está enfocada a la reducción de las emisiones contaminantes de vehículos ligeros (autos, furgonetas) (El Comercio, 2012). El año 2014 y 2015 se mantienen un flujo vehicular similar con un total de 23,000.000 de vehículos al año. Por último, en el primer trimestre del 2019 se ha registrado un total de 10,397.527 en ambos sentidos, lo que representa el 40% del año 2018 en tan sólo 3 meses.

Con respecto a la propagación del ruido de tráfico, es necesario identificar las zonas que cumplen con las características óptimas de terreno para que la propagación del sonido esté bajo condiciones físicas ideales y controladas. Los factores físicos a tomar en cuenta que afectarían a la probación son: divergencia

geométrica, absorción/difusión del suelo y obstáculos entre fuente y receptor. A continuación, se describe cada uno de ellos:

- **Divergencia geométrica:**
Atenuación de los niveles sonoros debido a la distancia, la cual está directamente ligada a la configuración de la fuente y a sus características de emisión. Para fuentes lineales la pérdida por duplicación de la distancia es de 3 dB.
- **Absorción/Difusión:**
Durante propagación del sonido es importante identificar el material que recubre el suelo, ya que suelos porosos o cubiertos por vegetación, la atenuación puede llegar a 5 dB alrededor de 100 m de distancia. También, parte de la energía incidente es reflejada por el asfalto, el efecto de absorción posee mayor repercusión en las primeras etapas de propagación del sonido.
- **Obstáculos:**
La interrupción directa entre fuente y receptor se puede deber a la forma del terreno, vegetación y barreras acústicas. Todas estas reducen el nivel sonoro, siendo la barrera acústica la herramienta más efectiva de atenuación sonora. La vegetación esconde la fuente de ruido, pero no reduce los niveles de sonoros significativamente.

El terreno ideal para la propagación del ruido debe ser semejante a campo libre, esto quiere decir que debe ser un terreno plano, libre de obstáculos entre fuente y receptor. La absorción del suelo no se puede identificar, ya que las características acústicas de atenuación del asfalto del cual está hecha la autopista están fuera del alcance de este proyecto. Un asfalto con 20% de porosidad puede llegar a reducir 3 dB en velocidades entre 80 km/h al ruido de rodadura (Morcillo, González, Hernández, & Hidalgo, 2008, p. 10)

Para la dispersión ideal del material particulado, el terreno debe contar con las características necesarias para que exista una disminución de la concentración por relación inversa con la velocidad del viento. Por lo cual el terreno en lo posible

debe ser plano y libre de accidentes geográficos para evitar turbulencias mecánicas y estancamiento del material particulado (Arrieta, 2016, p. 45).

Las zonas que se acercan a estas características son: Puente 8, El Desvío y Orquídeas. En la figura 2 se muestra el terreno de dos sectores los cuales poseen una pendiente que no supera los 45° . Además, no existe interferencia de otras fuentes de ruido, tanto solo un ligero flujo vehicular del intercambiador La Armenia. Como puede verse en la figura 2.a y 2.b son sectores habitados por lo cual la presencia de edificios puede causar reflexión del sonido y estancamiento de material particulado. Por esa razón los puntos de medición deben ser colocados con una separación de superficies reflectantes no menor a 3 m.



Figura 2. Terreno: a) Sector La Armenia – Puente 8, b) Sector Barrio Orquídeas – Orquídeas. Adaptado de (Google Maps, 2019).

- a) Sector La Armenia – Puente 8.
- b) Sector Barrio Orquídeas – Orquídeas.

El sector Norte – El Desvío y entrada a Conocoto – Puente 8 se muestran en la figura 3. Estos sectores son mucho más amplios y no poseen edificaciones que pueden causar algún tipo de turbulencia mecánica y reflexión del sonido más allá del asfalto de la vía. Como se puede observar existen calles aledañas que de acuerdo al análisis de campo mantienen un nivel de flujo de tráfico alto en horas pico.



En la figura 4 el terreno de estos sectores está recubierto por vegetación y muestra un plano inclinado. Esto puede actuar como una barrera natural de ruido

y material particulado lo que puede interferir en la propagación de ambos contaminantes. Por lo cual los puntos intermedios serán colocados en los puntos máximos de la pendiente, evitando esta manera de la interrupción fuente-receptor en lo más mínimo.



2.3 Material Particulado - PM2.5

El PM2.5 es un conjunto complejo de partículas sedimentables, sólidas o líquidas con un tamaño menor a 2.5 μm . De acuerdo a su peso tienden a una precipitación fácil, por lo cual pueden permanecer suspendidas en el aire

(Ministerio del Ambiente, 2015). Como principales fuentes de emisión de PM_{2.5} están: el tráfico vehicular, industrias, quema de combustible doméstico, fuentes naturales de emisión y fuentes no determinadas de origen humano. En la figura 5 se muestran los niveles de PM_{2.5} a nivel mundial, en Sudamérica las emisiones por tráfico vehicular en zonas urbanas representan el 30%, quema de combustible domestico el 25%, fuentes naturales el 21%, fuentes no identificadas de origen humano el 16% e industrias un 8%. Sudamérica se ubica en el 5to lugar de mayor contaminación atmosférica por tráfico vehicular en el mundo, siendo liderado por la India con un 37%. Todo este material particulado de origen vehicular proviene de la quema de combustibles de alto y bajo octanaje, diésel, desgaste de frenos y llantas (Karagulian et al., 2015, p. 480).

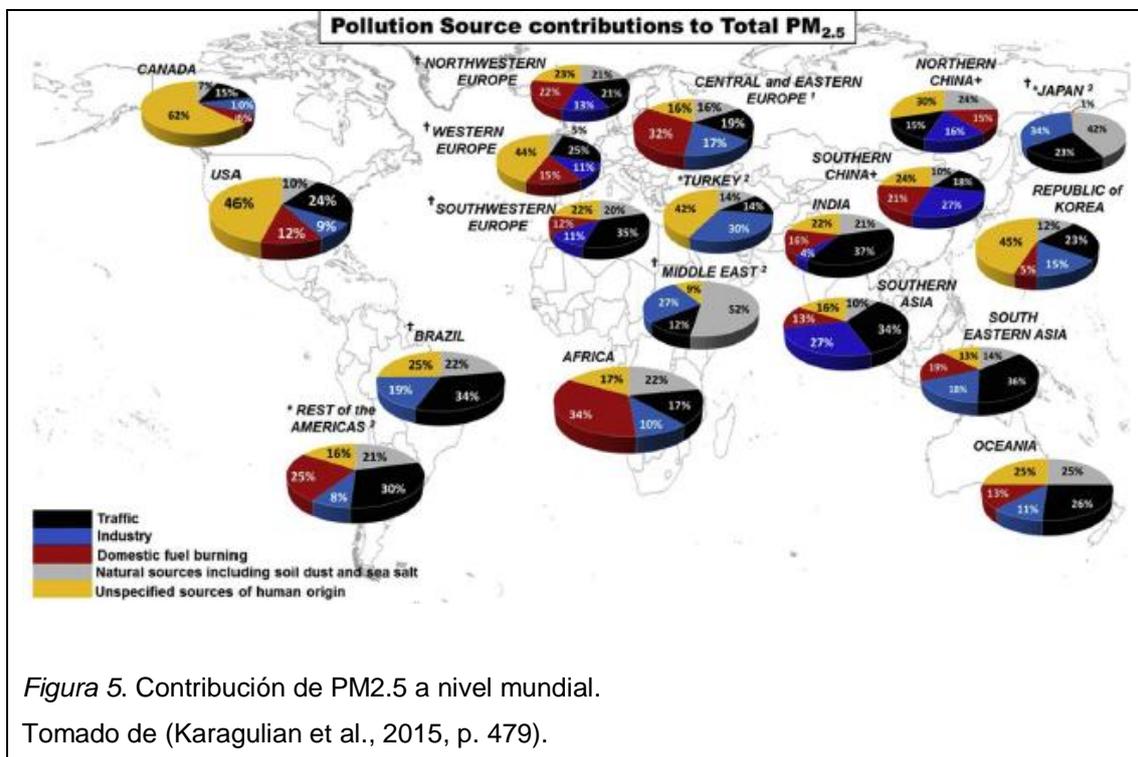


Figura 5. Contribución de PM_{2.5} a nivel mundial.

Tomado de (Karagulian et al., 2015, p. 479).

El material particulado posee además un amplio rango de propiedades físicas, morfológicas, químicas y termodinámicas por lo cual es susceptible al cambio de factores ambientales y de terreno, los cuales inciden en el transporte y arrastre del PM_{2.5}. Los factores ambientales como velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad del aire causan que el comportamiento de material

particulado varíe temporalmente de forma irregular en la atmósfera. Los accidentes topográficos afectan directamente a las corrientes dominantes de aire cercanas a la superficie causando turbulencias mecánicas, lo cual causa variabilidad en los niveles de contaminación atmosférica (Arrieta, 2016, p. 45).

La altura de la zona de estudio provoca que la combustión sea incompleta favoreciendo la emisión de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) los cuales son considerados carcinógenos, mutágenos y teratógenos (Chuquer et al., 2018, p. 91). La ciudad de Quito se encuentra a una altura de 2800 msnm, en la cual se calcula que 488.000 vehículos usan gasolina de alto y bajo octanaje (92 y 87 octanos) y diésel con un contenido de azufre de 500 ppm. A nivel nacional existe una variedad de combustibles de venta al público, desde gasolina extra y súper, hasta 7 tipos de diésel. En la figura 6 se muestran los diferentes tipos de combustibles distribuidos a nivel nacional, de acuerdo a la empresa pública Petroecuador (El Comercio, 2018.).



2.3.1 Modelos de Dispersión de PM

El uso de modelos matemáticos para estudiar el proceso de dispersión de contaminantes atmosféricos primarios permite cuantificar los cambios de concentración tanto en tiempo y espacio, con el objeto de predecir y analizar la calidad del aire de una zona determinada. Dichos modelos utilizan bases de datos meteorológicas e información descriptiva de la fuente, permitiendo caracterizar la contaminación primaria que es emitida directamente a la atmosfera y secundaria que nace a partir de un complejo proceso de reacciones químicas con la atmosfera. El proceso de modelamiento de calidad de aire puede ser usado por agencias de control ambiental para verificar si una nueva fuente de contaminación atmosférica sobrepasa los límites máximos de emisión. También es usado para el modelamiento de varias fuentes puntuales y predecir su comportamiento a corto y largo plazo, ayudando a verificar si es necesario abrir un proceso de corrección normativo – regulatoria. De acuerdo con la U.S. Environmental Protection Agency (US-EPA) los modelamientos matemáticos de calidad de aire se dividen de la siguiente manera (US - EPA, 2019).

- Modelos de celda fija (vertimientos homogéneos).
- Modelos gaussianos de dispersión (vertimientos puntuales).
- Modelos combinados (celda múltiple).

El modelamiento de dispersión gaussiano es usado para estudiar vertidos puntuales y continuados en el tiempo (chimeneas, vías, etc). Permitiendo cuantificar los niveles de concentración de fuentes puntales o lineales en 1D, 2D o 3D. En la ecuación 1 se muestra el modelo gaussiano con corrección por reflexión del suelo (US - EPA, 2019).

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \text{EXP} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \left\{ \text{EXP} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-h}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \text{EXP} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+h}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\}$$

Ecuación (1)

Donde:

- x, y, z : Coordenadas espaciales en metros (m).
- $C(x, y, z)$: Concentración del contaminante en un punto (x,y,z) (g/m³).
- Q : Caudal de emisión (g/s).
- σ_y, σ_z : Coeficientes de dispersión “y” y “z” en función de la distancia de la fuente “x”.
- u : Velocidad media de viento (m/s) en el sentido del eje x.
- h : Altura efectiva de emisión (m).

Como puede verse en la ecuación 1 este modelo obedece a una función gaussiana. Los coeficientes de dispersión σ_y, σ_z dependen de la distancia a la fuente emisora y del grado de estabilidad atmosférico que a su vez está en función de la velocidad del viento (turbulencia mecánica) e irradiación solar recibida (turbulencia térmica). Las clases de estabilidad atmosférica son seis, referidas como estabilidad de Pasquill – Guifford (Gómez, 2013).

- Clases A, B y C están asociadas con la turbulencia aumentada por el calentamiento diurno y se clasifican como condiciones inestables al subir los niveles de radiación solar.
- Clase D se asocian con turbulencias generadas mecánicamente (velocidades altas de viento) o condiciones de un alto grado de nubosidad, se clasifica como condiciones neutrales.
- Clases E y F están asociadas con la falta de turbulencias mecánicas y térmicas causadas por el enfriamiento nocturno, denominas como condiciones estables.

En la tabla 3 se sintetiza las 6 clases de estabilidad atmosférica para condiciones diurnas y nocturnas, de acuerdo a la radiación solar incidente y velocidad del viento.

Tabla 3

Clases de estabilidad atmosférica.

Velocidad del viento (m/s) a 10 m de altura	Día			Noche ⁽¹⁾	
	Radiación solar incidente			4/8 > Nubosidad < 7/8	Nubosidad < 3/8
	Fuerte (mayor que 50 cal/cm ² h)	Moderada (entre 25 y 50 cal/cm ² h)	Débil (menor que 25 cal/cm ² h)		
< 2	A	A - B	B	F	F
2 - 3	A- B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Tomado de (Gómez, 2013).

(1) La noche se define como el período desde una hora después de la puesta de sol, hasta una hora antes de la salida del mismo. Para cielos totalmente cubiertos, tanto para el día como para la noche, debe asumirse clase de estabilidad D

A partir de las condiciones de estabilidad atmosférica se puede calcular los coeficientes de dispersión tanto σ_y (lateral) y σ_z (altura). Los valores típicos de dispersión en ambos ejes se muestran en la figura 7, como puede verse está en función de la clase de estabilidad atmosférica y distancia a la fuente (US - EPA, 2019).

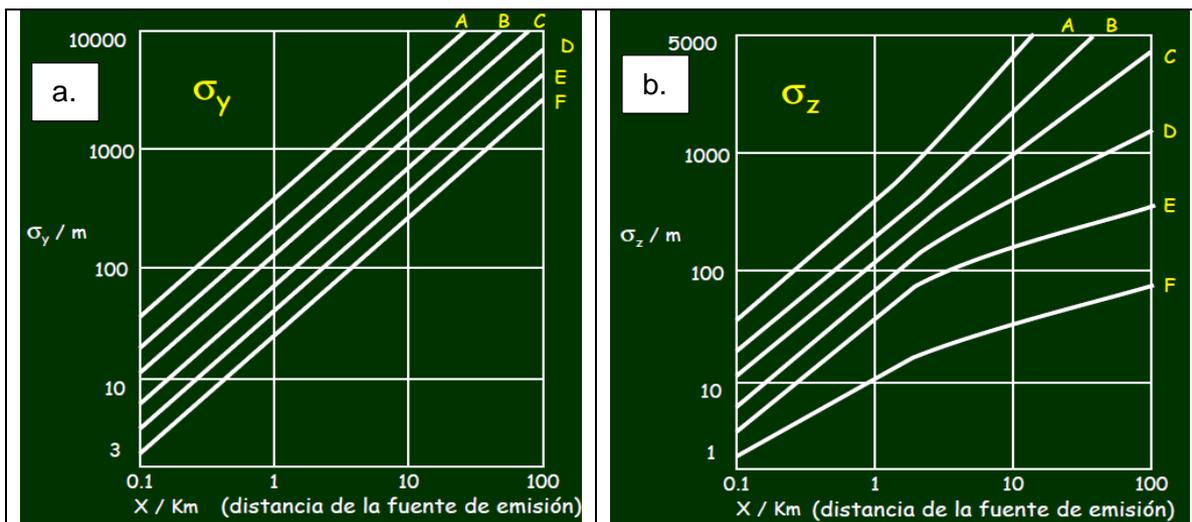


Figura 7. Coeficientes de dispersión $\sigma_y \sigma_z$.

Tomado de US -EPA (2019).

- a) Eje lateral.
- b) Altura.

De acuerdo con la US-EPA el coeficiente de dispersión se lo mide en metros e indica cuánto se ha dispersado la masa inicial cuando la nube del escape (emisión) alcanza una distancia dada desde la fuente.

Existen simplificaciones del modelo gaussiano de la ecuación 1, los cuales consideran $y = 0$ donde se calcula la concentración sobre el eje de dispersión y $z = 0$ calcula a nivel de calle o suelo. Al ser considerada como una simplificación conservadora, los niveles de concentración serán altos en el eje de dispersión (Cruz, 2015, p. 48). Dichas modificaciones se representan en las ecuaciones 2 y 3.

Contaminación a ras de suelo $z = 0$

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \text{EXP} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \text{EXP} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad \text{Ecuación (2)}$$

A ras de suelo $z = 0$ y en el eje de dirección de viento $y = 0$

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \text{EXP} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad \text{Ecuación (3)}$$

Es importante acotar que este modelamiento posee varias limitaciones, así como ventajas y desventajas. Dichas limitantes consideran factores ambientales, físicos y de terreno (Cruz, 2015, p. 56).

- Distancia al receptor:
El modelo gaussiano considera que el efluente se transporta instantáneamente al punto donde se encuentra el receptor, cuando en realidad se puede encontrar a una distancia considerable. Esto se puede ejemplificar, si el efluente cuenta con velocidad de viento de 1 m/s, en su primera hora habrá viajado 3.6 km (Cruz, 2015, p. 56).
- Bajas velocidades de viento:
El modelo presenta serios problemas al considerar promedios de velocidad de viento cercanas a cero. Considerando inválido en ciertas circunstancias, ya que la concentración varía inversamente con la velocidad del viento. Por esta razón se establece un límite de velocidad de 0.5 m/s (Cruz, 2015, p. 56).
- Condiciones de terreno:
Los modelos gaussianos descritos en las ecuaciones 1, 2 y 3 consideran terrenos relativamente planos. Por tal motivo no se aplica en lugares con alta concentración de edificaciones (zonas urbanas) (Cruz, 2015, p. 56).
- Condiciones meteorológicas espacialmente uniformes:
Los modelos estacionarios consideran una atmósfera estable a lo largo de la zona modelada. Es decir que el transporte y las condiciones de dispersión no varían en el tiempo lo suficiente para que el material llegue al receptor. Cuerpos acuíferos (ríos, lagos, etc.), curvas de nivel pronunciadas, tipo de suelo, humedad de la superficie son elementos que causan la falta de homogeneidad en la estructura de la capa límite de la atmosfera. En condiciones meteorológica no uniformes el modelo tiende a fallar (Cruz, 2015, p. 56).

- Ausencia de registro de emisiones previas:
El modelo no toma en cuenta la concentración de contaminantes atmosféricos liberados en horas previas, siendo un problema para estudios por hora en la superficie del suelo para emisiones instantáneas. Esta limitación es especialmente importante para las simulaciones apropiadas en las condiciones de inversión termina por las mañanas, fumigación y cualquier otro contaminante sobre la zona (Cruz, 2015, p. 56).

2.3.2 Efectos del Material Particulado en la Salud Humana

De acuerdo a la World Health Organization (2016, p. 39) una de cada nueve muertes en todo el mundo está ligada directamente con la contaminación atmosférica. Dichos decesos están asociados a cáncer de pulmón, obstrucción pulmonar crónica (COPD), accidentes cerebrovasculares y cardiopatías isquémicas. Por otro lado, la mayor huella está sobre la mortandad infantil, ya que más de la mitad de las muertes de niños menores a 5 años se debe a infecciones agudas de las vías respiratorias.

En el Ecuador en el año 2012 se registraron 2800 muertes relacionadas con la deficiente calidad del aire, siendo un problema de salud pública. Ese mismo año se estimaron 93 000 muertes en Centroamérica y Sudamérica, las enfermedades más recurrentes fueron: derrame cerebral, enfermedades coronarias y cáncer de pulmón (Chuquer et al., 2018, p. 91).

Además, se ha podido corroborar que la exposición a material particulado puede causar daños a nivel celular, es decir causa estrés oxidativo a las células, respuestas inmunológicas, inflamación sistémica de órganos respiratorios, daños genómicos del ADN lo que conlleva a la formación de potenciales mutaciones y tumores (Chuquer et al., 2018, p. 91).

Los efectos a largo plazo a la exposición de contaminantes atmosféricos sobre la función pulmonar se los realiza bajo estudios llamados cohortes, los cuales son un grupo de sujetos que comparten una característica definitoria. Una investigación realizada en el 2017 identificó la asociación residencial a largo

plazo de la exposición a PM2.5 y NO2 y la función pulmonar en 5 cohortes europeas, verificando que la exposición de largo plazo causa un déficit de la función pulmonar en los niños en edad escolar. Otra investigación, en la cual se llevó un seguimiento durante algunos años a varias cohortes, con un total de 212 niños de 5 comunidades de California. Identifico una mejora en la calidad del aire a través del tiempo, producto de medidas regulatorias, dando como resultado un crecimiento de la función pulmonar tanto en niños asmáticos como no asmáticos, gracias a la disminución de concentración de PM10, PM2.5 y NO2 (Ubilla & Yohannessen, 2017, p. 116).

2.4 Ruido de Tráfico

Es la principal fuente de ruido en las grandes ciudades, ya que se despliega en todas las avenidas y calles de la misma. Los niveles de ruido aumentan de acuerdo a la cantidad de vehículos que se encuentren en marcha, por lo general en áreas urbanas los niveles de ruido llegan a los 80 dBA en horas pico (Casas, Betancur, & Montaña, 2015, p. 276). El ruido de tráfico rodado está compuesto por tres fuentes de ruido que varían sus niveles de emisión dependiendo de la velocidad del vehículo: ruido de propulsión, aerodinámico y ruido de rodadura (Campello, 2014, p. 33).

2.4.1 Ruido de Propulsión

Nace a partir de todas aquellas piezas que se encuentra localizadas dentro del vehículo que tienen como función el movimiento mecánico. Su importancia varía de acuerdo a las características del vehículo como es: tipo de motor, cilindraje y ventilación (Campello, 2014, p. 33).

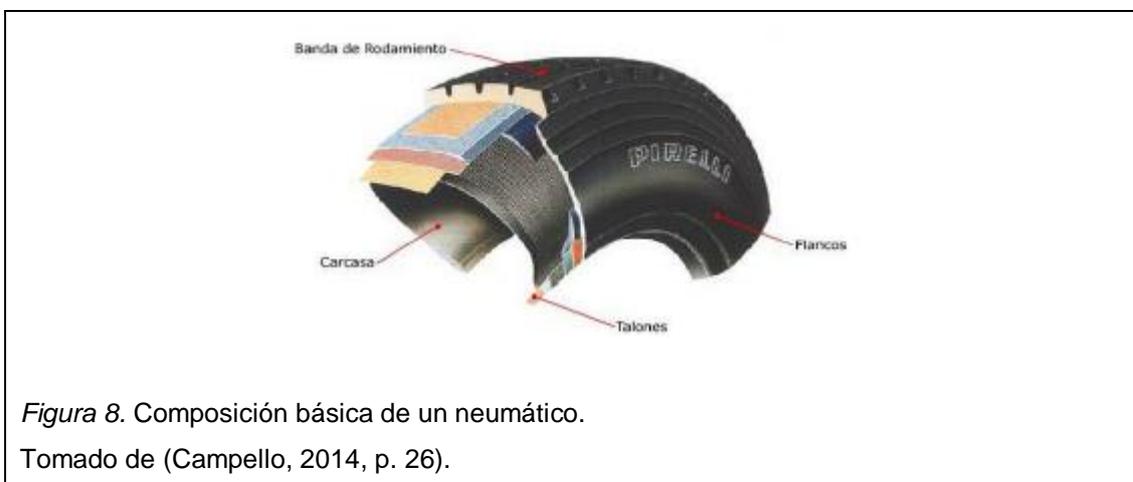
2.4.2 Ruido Aerodinámico

Este se origina a partir de las perturbaciones mecánicas producidas por las turbulencias entre el flujo de aire y el diseño del vehículo. El ruido aerodinámico en vehículos ha ido disminuyendo con el pasar del tiempo, debido principalmente

a los nuevos diseños, materiales y acabados al interior de la cabina (Campello, 2014, p. 33).

2.4.3 Ruido de Rodadura

Se lo puede definir como el impacto que existe entre la superficie de la calzada y la banda de rodadura de los neumáticos. El neumático al ser compuesto de varias capas de material rígido y blando, es difícil identificar los mecanismos que tiene mayor influencia en la generación y emisión de ruido por rodadura. Por esta razón es necesario conocer las partes que conforman los neumáticos. En la figura 8 se muestran las partes principales del neumático: banda de rodamiento, carcasa, talones y flancos/paredes laterales (Campello, 2014, p. 26).



2.4.4 Efectos del Ruido en la Salud Humana

Los daños en la salud a causa del ruido se los pueden dividir en 4 categorías, de problemas: psicológicos, fisiológicos, psicológicos y en el desarrollo laboral (Olayinka, 2013, p. 5).

Las afecciones por ruido de tráfico se relacionan con alteraciones fisiológicas, psicológicas o ambas; el grado de afección se lo asocia a la exposición de altos niveles de ruido a lapsos muy prolongados. Dichas afecciones producen en los seres humanos problemas como tinnitus, enfermedades cardiovasculares,

estrés, mal funcionamiento del sistema cognitivo y distracción involuntaria (Fritschi et al., 2011, pp. 15-98).

A continuación, se presentan los problemas de salud relacionados al ruido:

- Impedimento auditivo:
Se refiere a la pérdida auditiva (el umbral de audición aumenta), tinnitus (ruidos temporales o permanentes) y paracusia (distorsión). El efecto que causa es la interferencia en la comunicación diaria de la persona. La pérdida de audición se da en los rangos de 3000 a 6000 Hz siendo esta la de mayor riesgo, con exposiciones largas se puede llegar a afectar el rango de 1000 a 2000 Hz (Fritschi et al., 2011, pp. 15-98).
- Interferencia en la comunicación:
Para que se desarrolle una conversación esta debe estar entre los 50 y 55 dBA permitiendo una correcta inteligibilidad, con una relación habla - ruido entre 15 a 18 dBA. Cuando el ruido supera los 40 dBA genera problemas en la comunicación oral, ruidos que superen los 65 dBA los diálogos llegan a ser incompresibles. Lo que conlleva a una incapacidad para comunicarse produciendo alteraciones en el comportamiento humano, mal humor, problemas para relacionarse con otras personas y estrés (Fritschi et al., 2011, pp. 15-98).
- Dificultad para dormir:
Las molestias para conciliar el sueño están entre el 80 y 90 % relacionadas a ruido comunal. Lo que puede causar dificultad para dormir, despertar varias veces en la noche, menor profundidad del sueño, aumento de la presión sanguínea, alteraciones en la respiración. etc. Además, el ruido de tráfico está directamente relacionado al número de veces que una persona se despierta y el nivel de ruido en las horas de sueño (Fritschi et al., 2011, pp. 15-98).
- Efectos cardiovasculares y fisiológicos:
El estudio de la relación entre el ruido de tráfico y los efectos cardiovasculares han sido llevados tanto en adultos y como en niños. El

análisis de presión sonora, hipertensión y enfermedades isquémicas del corazón como problemas cardiovasculares irreversibles concluye, que existe una asociación entre los niveles de ruido de tráfico y el incremento de enfermedades del corazón, incluyendo infartos de miocardio (Fritschi et al., 2011, pp. 15-98).

- Salud Mental:

Se asocian las siguientes anomalías en la salud tales como ansiedad, estrés, fatiga, dolor de cabeza, pérdida argumentativa, inestabilidad emocional, incremento de conflictos sociales, impotencia sexual, cambios de humor, irritabilidad y desórdenes psiquiátricos como histeria, neurosis y psicosis (Fritschi et al., 2011, pp. 15-98).

2.5 Velocidad de Cruce

Existen fuentes puntuales de ruido que aportan al ruido total del vehículo, dichas fuentes varían su nivel de acuerdo a la velocidad en la que se encuentre desplazando el vehículo. En la figura 9 se identifican las fuentes puntuales de ruido del vehículo: motor, ventilación, aerodinámica, rodadura, frenos y escape.

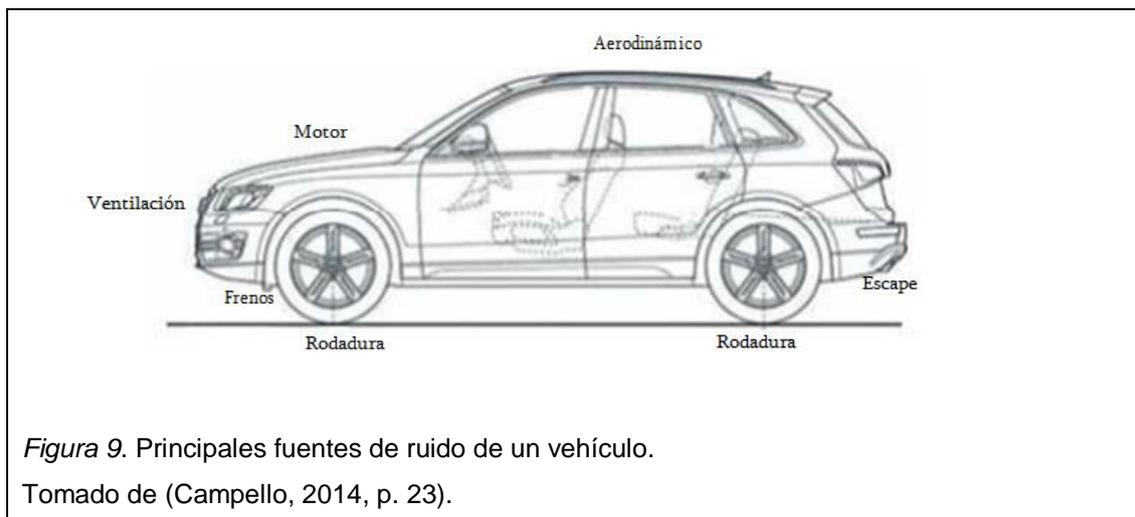


Figura 9. Principales fuentes de ruido de un vehículo.

Tomado de (Campello, 2014, p. 23).

Aquí nace el concepto de “velocidad de cruce” que es aquella en la cual el ruido de rodadura y el sistema mecánico son iguales. En los años 70’s, la velocidad de cruce se la determinó entre los 50-70km/h para vehículos livianos y 70-90km/h

para camiones. Posteriormente entre los 80's y 90's la velocidad de cruce se redujo a 40-50 km/h para vehículos livianos y 60-70km/h para camiones. Esto quiere decir que en entornos urbanos predomina el ruido del sistema mecánico y en carreteras el ruido de rodadura como se muestra en la figura 10 (Campello, 2014, p. 25).

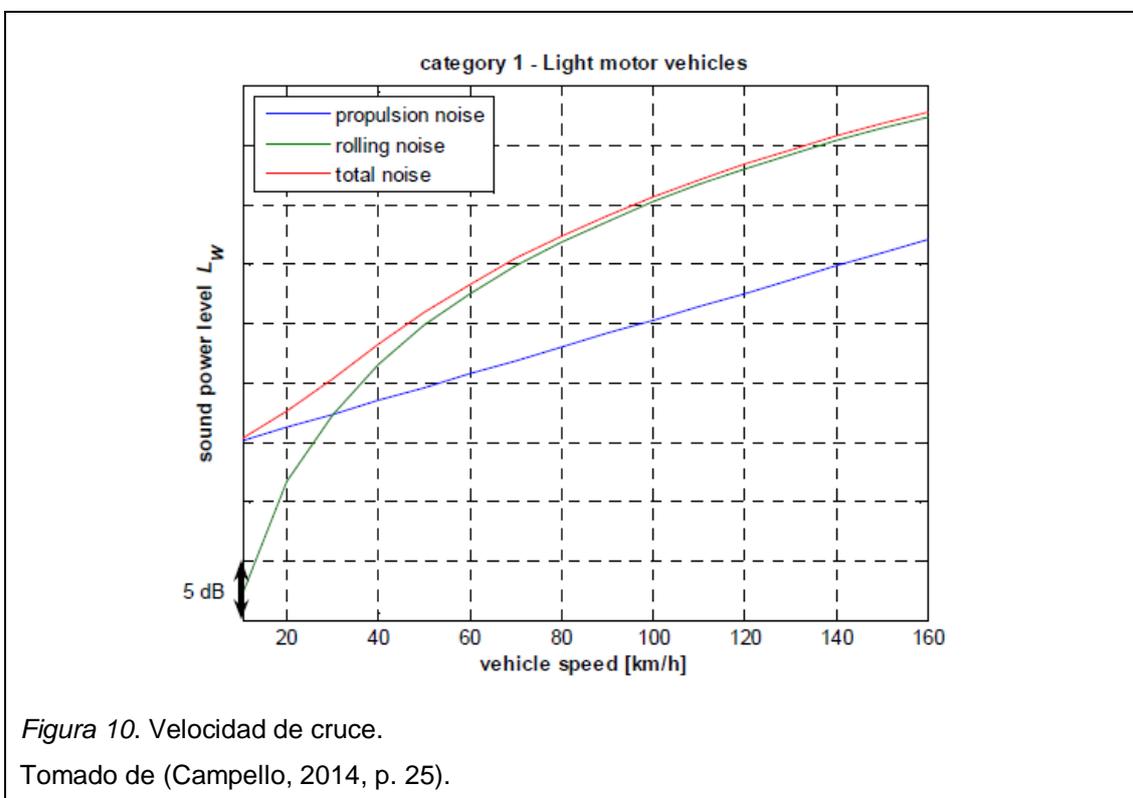


Figura 10. Velocidad de cruce.

Tomado de (Campello, 2014, p. 25).

2.6 Mapas de ruido

Es una herramienta de gestión para el análisis de propagación sonora, la cual ayuda diagnosticar la situación acústica de una zona determinada. A partir de dichos resultados se puede aplicar planes de acción y minimizar el impacto negativo del ruido sobre la salud de un número determinado habitantes. Los resultados simulados pueden estar en función de un índice de ruido ambiental: nivel día "LD", nivel tarde "LE", nivel noche "LN" y nivel combinado "LDN". Los índices de ruido identifican las zonas con mayor o menor nivel de contaminación sonora y pueden ser comparados con los respectivos valores límites de la normativa vigente de cada país (Ayuntamiento de Bizkaia, 2017).

2.6.1 Modelo Alemán RLS – 90

De acuerdo a la European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise (2006) el modelo alemán es una mejora del modelo estándar RLS 81. El RLS -90 requiere datos de entrada como: promedio hora del flujo vehicular tanto de vehículos livianos y pesados, promedio de velocidad de cada grupo de vehículos, tipo y geometría de las calles y edificios. El modelo se basa en la propagación del ruido fuente – receptor tomando en cuenta la reflexión del sonido en zonas con alta densidad de edificaciones, lo que presenten una barrera o superficie reflectante.

El punto de inicio de cálculo es un promedio de nivel L_{mE} medible a una distancia de 25m del centro de la carretera. El L_{mE} es una función de la cantidad de vehículos por hora Q y del porcentaje de vehículos pesados P con un peso mayor a 2.8 tons, en condiciones ideales de 100 km/h y un gradiente de carretera por debajo del 5% (Quartieri et al., 2016, p. 76).

$$L_{mE} = 37.3 + 10\text{Log}[Q(1 + 0.082P)] \quad \text{Ecuación (4)}$$

Posteriormente se cuantifican las diferentes desviaciones de dichas condiciones ideales por términos de correcciones para “velocidad real”, pendiente real de la calzada y superficie real. La corrección obedece tanto del periodo diurno (07h00 – 21h59) o nocturno (22h00 – 06h59), dependiendo del periodo a predecir el nivel medio (dBA), L_m , se lo calcula mediante la ecuación 5:

$$L_m = L_{mE} + R_{SL} + R_{RS} + R_{RF} + R_E + R_{DA} + R_{GA} + R_{TB} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde:

- R_{SL} : Corrección de límite de velocidad.
- R_{RS} : Corrección por superficie rodada, la cual depende del tipo de superficie y velocidad del vehículo. En rangos de 0 a 6 dB.

$$R_{RS} = 0.6|g| - 3 \text{ for } |g| > 5\% \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$R_{RS} = 0.6|g| \leq 5\% \quad \text{Ecuación (7)}$$

- R_{RF} : Corrección por elevación y caída de la carretera.
- R_E : Corrección por la absorción de los edificios.
- R_{DA} : Coeficiente de atención que toma en cuenta al receptor y la absorción del aire.
- R_{GA} : Coeficiente de atención del tipo de suelo y condiciones atmosféricas.
- R_{TB} : Coeficiente de atención del tipo de topografía y dimensiones de las construcciones.

El R_{SL} esta dado por la siguiente formula:

$$R_{SL} = L_{PKW} - 37.3 + 10\text{Log} \left[\frac{100 + (10^{0.1D} - 1)P}{100 + 8.23P} \right] \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde:

$$L_{P_{low}} = 27.7 + 10\text{Log}[1 + (0.02v_{Pkm})^3] \quad \text{Ecuación (9)}$$

$$L_{PKW} = 23.1 + 12.5\text{Log}(v_{Pkm}) \quad \text{Ecuación (10)}$$

$$D = L_{Lkm} - L_{Pkm} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde v_{Pkm} está dado por la velocidad limite en un rango de 30 a 130 Km/h para vehículos livianos y de 30 a 80 Km/h para vehículos pesados. EL L_m para cada carril se puede obtener de la siguiente manera.

$$L_m = 10\text{Log}[10^{0.1L_{m,n}} + 10^{0.1L_{m,f}}] \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde n representa el más cercano y f el carril más lejano

El nivel de presión sonora de calle está dado por la siguiente ecuación

$$L_r = L_m - K \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde K es el término que controla el aumento del tráfico ligero e intersecciones (Quartieri et al., 2016, p. 76).

3 METODOLOGÍA

3.1 Monitoreo

Como se indicó anteriormente todo el desarrollo está bajo un análisis de sondeo, el cual puede ser utilizado para determinar de manera aproximada la concentración de contaminantes en el aire en condiciones más desfavorables. Se aplica para determinar si las emisiones procedentes de fuentes en cuestión superan una fracción de los límites de calidad del aire establecidos por normativa. Si las concentraciones totales en aire de los contaminantes en estudio no sobrepasan el 30% de los valores correspondientes establecidos en la norma vigente, la o las fuentes en estudio pueden considerarse ambientalmente adecuadas y no será necesario proseguir con las siguientes etapas, sondeo detallado. (Secretaria de Política Ambiental, 1997).

Para identificar las peores condiciones más desfavorables primero se verificó los horarios con mayor concentración de PM_{2.5}, para lo cual se utilizó la red de monitoreo de la Secretaria del Ambiente de DMQ, a continuación, se describe todo el procedimiento.

De acuerdo con la Secretaria de Movilidad, el flujo de tráfico vehicular es constante de lunes a jueves, el resto de la semana (viernes, sábado y domingo), incluido días feriados, tiende a variar. Ya que las personas salen de la ciudad hacia distintos lugares turísticos o recreacionales generando así un mayor flujo de tráfico vehicular, tanto en vías expresas como principales. Por esta razón los días de medición fueron realizados entre semana, en las siguientes fechas.

- Martes 30 de abril del 2019.
- Martes 7 de mayo del 2019.
- Jueves 10 de mayo del 2019.

Para verificar los intervalos (horas) con mayor nivel de concentración de material particulado, se procedió a descargar los datos de la red de monitoreo REMMAQ de la Secretaría del Ambiente - estación Los Chillos. Dicha estación se encuentra en el sector de San Rafael en el CC Plaza del Valle a pocos metros de la Avenida General Rumiñahui, como puede verse en la figura 11.



El análisis de la estación Los Chillos abarcó los meses de enero, febrero y marzo del 2019, dando como resultado, que, el monitoreo de la autopista se lo debe plantear en horas de la mañana de 07h00 a 10h00 y en la tarde de 15h00 a 18h00. En el Anexo 1 se muestra los resultados de concentración promedio hora, durante los 3 primeros meses del 2019.

De acuerdo al apartado anterior las zonas de medición son 3: Puente 8, Desvío y Orquídeas. Para lo cual se tomó en cuenta la variabilidad del terreno, entradas

y salidas viales de la autopista hacia áreas pobladas y posibles cambios del flujo vehicular, dichas zonas se encuentran numeradas en la figura 12.

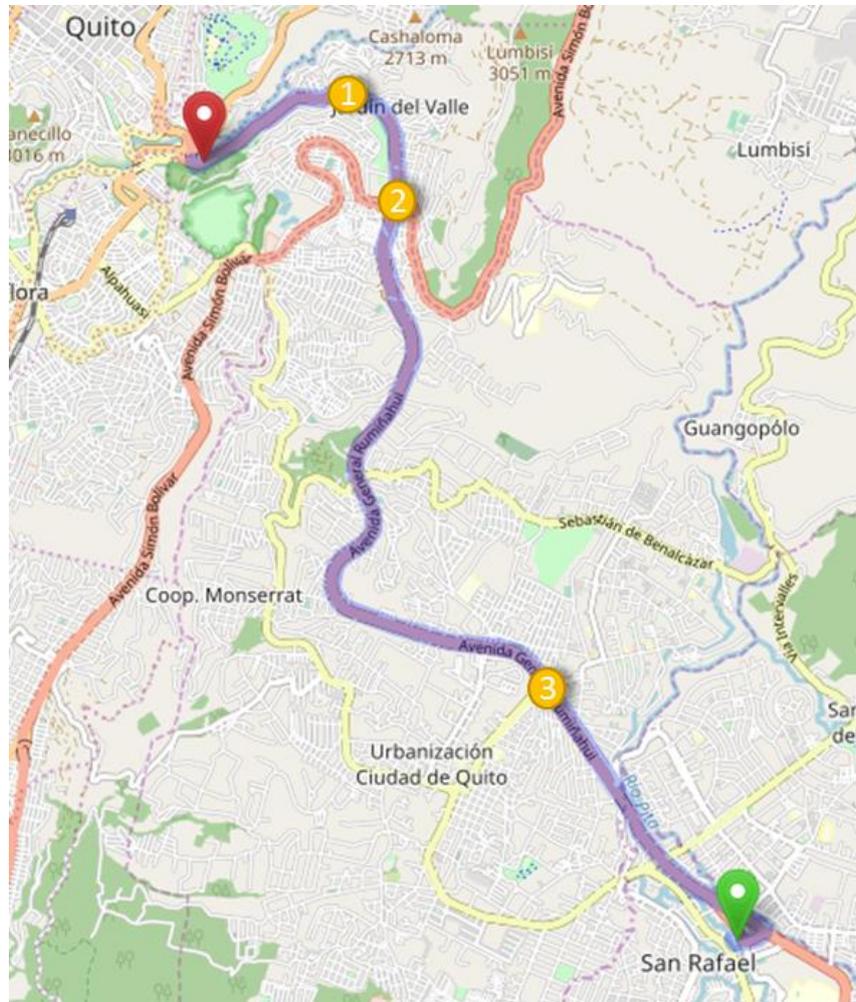


Figura 12. Zonas de monitoreo ubicadas a lo largo de la Autopista General Rumiñahui: 1 Orquídeas, 2 Desvío y 3 Puente 8.
Adaptado de (Google Maps, 2019).

Los puntos de medición se distribuyeron a los laterales de la vía de la siguiente manera:

- Puente 8:

Es la zona con más puntos de medición debido a que se puede cubrir una extensión de terreno mucho más grande: 4 puntos en la entrada a Conocoto, 4 puntos en el intercambiador La Armenia. En la figura 13 se puede observar la posición de cada punto de medición con su respectiva etiqueta.



Figura 13. Puntos de medición Puente 8.

Adaptado de (Google Maps, 2019).

- El Desvío:

Los puntos de medición en esta zona de redujeron a 3 a cada lado, ya que esta zona es más estrecha y se une con otras vías de un considerable flujo vehicular. La Av. Simón Bolívar se encuentra por encima de los 4 carriles de la autopista como se muestra en la figura 14 y posee 4 vías circundantes que ayudan a los conductores a intercambiar sentidos; si desean viajar al norte o sur de la ciudad.

En esta zona la presencia de vendedores ambulantes y venta de comida callejera, es alta, en especial en horas de la tarde. A partir de las 18h00 se pudo identificar que el número de personas que regresan al Valle de los Chillos es elevado por lo cual se pudo identificar un estancamiento del tráfico vehicular.



Figura 14. Puntos de medición Desvío.

Adaptado de (Google Maps, 2019).

- Orquídeas:

Al igual que a la zona anterior solo se establecieron 3 punto de medición a cada lado de la vía. Esta zona se caracteriza por poseer varios tipos de inclinación y formas de relieve a cada costado. Además, la presencia de edificaciones es mayor, ya que a partir de este punto la densidad poblacional aumenta. En la figura 15 se muestra la posición de cada punto de medición, con su respectiva etiqueta.



Figura 15. Puntos de medición Orquídeas.

Adaptado de (Google Maps, 2019).

Para iniciar el proceso de monitoreo fue necesario crear un plan de mediciones bastante dinámico, el cual cubriría toda la extensión de la autopista. Este consistía en monitorear una zona cada 60 min y continuar con las restantes mientras avanza la jornada de mediciones como lo muestra la figura 16.

Por ejemplo, el día 1, la jornada de mediciones inicio en la zona 3 (Puente 8) y continuo en ascenso hasta la zona 1 (Orquídeas). El día 2 inició en la zona 1 y posteriormente en descenso hasta la zona 3, el día 3, empezó en la zona 2 (Desvió) en acenso a la zona 1 y posteriormente en descenso a la zona 3. El recorrido se lo puede verificar de acuerdo al sentido las fechas de color azul, verde y rojo de la figura 16, este proceso se lo realizó tanto en el día como en la tarde.

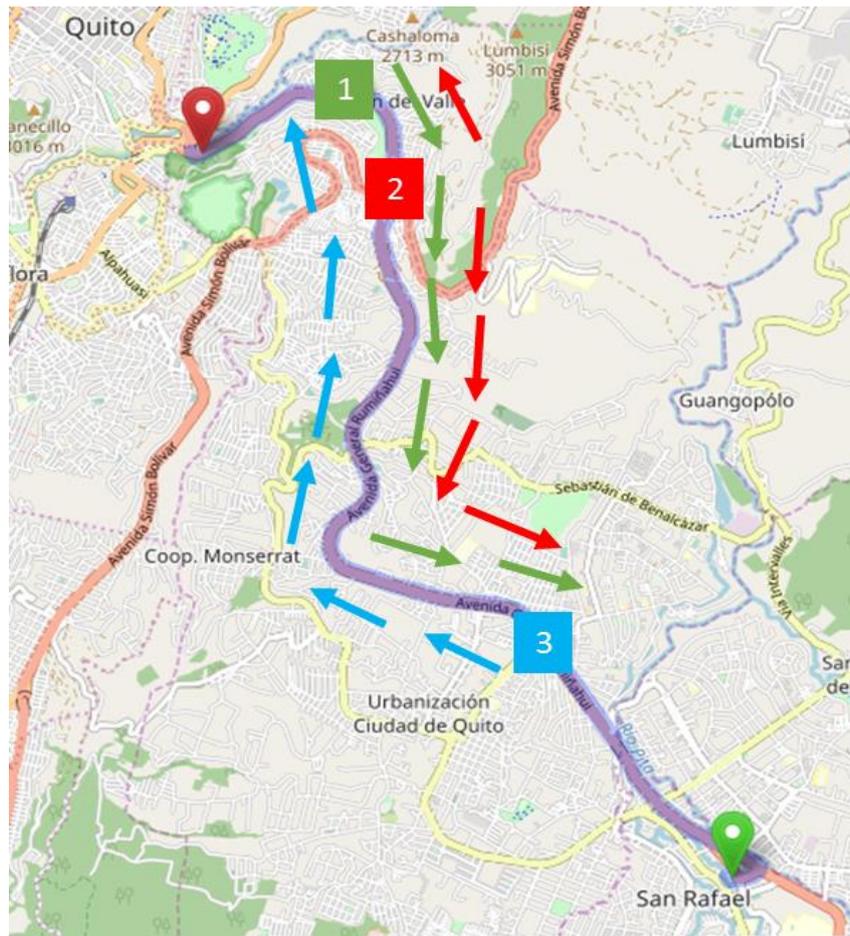


Figura 16. Desplazamiento durante el proceso de medición. Zona 1 - Orquídeas, Zona 2 - Desvío y Zona 3 - Puente 8.

Adaptado de (Google Maps, 2019).

A continuación, en la tabla 4 se muestran las unidades de medida y número de mediciones realizadas de los contaminantes atmosféricos, factores ambientales y posición de cada punto de medición.

Tabla 4

Unidades de Medida y número de mediciones.

COMPONENTE	UNIDADES	# DE MEDICIONES
Ruido	LAeq	94

PM2.5	ml/m3	94
Posición	UTM_wgs84	20
Velocidad del viento	m/s	94
Dirección del viento	Puntos Cardinales	94
Temperatura	°C	94
Humedad relativa	%	94

Como se puede observar se midieron 7 componentes, 6 fenómenos físicos y 1 de posicionamiento, de los cuales se realizaron 94 mediciones tanto de ruido de tráfico, PM2.5, velocidad y dirección del viento, humedad y temperatura del aire con un total de 564 mediciones durante los 3 días.

Se establecieron 20 puntos de medición, coincidiendo con el número de mediciones de posicionamiento. Algunos puntos no se pudieron volver a medir por salvaguardar la integridad de los equipos ante situaciones de riesgo. Ya que inicialmente se esperaba realizar 40 mediciones por día de cada fenómeno físico, 20 en el horario diurno y 20 en el vespertino, dando como resultado 120 por cada fenómeno, dando un total de 720 mediciones.

En la tabla 5 se muestran los 20 puntos de medición con sus respectivas etiquetas, coordenadas (UTM_wgs84) y distancia respecto a la fuente.

Tabla 5

Coordenadas de los puntos de medición.

ZONA	PUNTO	DISTANCIA	X	Y
PUENTE 8	CONOC_1	2	781552	9968693
	CONOC_2	72	781515	9968631
	CONOC_3	118	781484	9968596
	CONOC_4	173	781453	9968551
	ARME_1	4	781682	9968611
	ARME_2	60	781704	9968667
	ARME_3	104	781721	9968707
	ARME_4	155	781741	9968754
DESVIO	SIM-SUR_1	4	779980	9973799
	SIM-SUR_2	55	779942	9973759
	SIM-SUR_3	104	779885	9973756
	SIM-NOR_1	2	780031	9973781
	SIM-NOR_2	32	780063	9973784
	SIM-NOR_3	68	780099	9973779
ORQUIDEAS	OR_MON_1	2	779351	9974885
	OR_MON_2	65	779294	9974842
	OR_MON_3	129	779342	9974848
	OR_BAR_1	3	779366	9974939
	OR_BAR_2	42	779371	9974981
	OR_BAR_3	98	779380	9975036

3.2 Instrumentación

Los instrumentos utilizados están bajo los requerimientos técnicos de cuerpos normativos de carácter ambiental tanto internacionales como nacionales. Para ruido se usó la normativa de ruido ambiental UNE ISO 1996 (UNE Normalización Española, 2009) y para medición de material particulado el Anexo 4 del AM 097-A de calidad de aire (Ministerio del Ambiente, 2015). Cabe señalar que los instrumentos utilizados se encontraban en perfecto estado, además se procedió con la respectiva calibración al inicio y final de cada periodo de medición. Dichos instrumentos se muestran en la tabla 6.

Tabla 6

Instrumentación.

Sonómetro CESVA 310 Clase 1	 A handheld sound level meter with a silver and black body, a microphone at the top, and a small LCD screen and control buttons on the front. The model number 'SC310' and the brand 'CESVA' are visible.
Microdust Pro CEL 712	 A handheld dust sampling device in an open black carrying case. The device has a small screen and a probe. A blue sampling tube is also visible in the case.
GPS Garmin Etrex 30	 A handheld GPS device with a black casing and a color LCD screen displaying a topographic map. The brand name 'GARMIN' is printed at the bottom of the device.
Anemómetro TA440	 A handheld anemometer with a black body and a long, thin sensor probe. The device has a small screen and control buttons.
Veleta	 A black wind direction indicator (veleta) mounted on a black cylindrical base. It has a horizontal arm with a flat, rectangular vane.

3.3 Conteo Vehicular

En conteo vehicular se lo realizó en los puntos cercanos a la vía tanto para vehículos livianos y pesados con un intervalo de cada 5 min. En la tabla 7 muestra cómo se clasificó esta información.

Tabla 7

Procesamiento de información de conteo vehicular.

Lugar	Periodo	Sentido vial	T_medi	Livianos	Liv_hora	Pesados	Pes_hora	Total	% pesados
P8_Autopista	D	Quito - Valle	5 min	134	1608	23	276	1884	14,65%
			5 min	103	1236	21	252	1488	16,94%

Como se muestra en la tabla, es necesario identificar el lugar, el horario, tiempo de cada medición, cantidad de vehículos livianos y pesados, proyección hora de vehículos livianos y pesados. Posteriormente estos datos serán usados en el software de predicción de ruido de tráfico Cadna-A para el levantamiento del mapa de ruido.

3.4 Generación del Mapa de Ruido

El levantamiento del mapa de ruido envuelve toda una serie de metadatos, como, curvas de nivel, planos catastrales y viales de la zona de estudio en un shape el cual contenga todos estos recursos en diferentes capas (Zannin & Sant'Ana, 2011, p. 479). Por lo cual es necesario trabajar con las instituciones municipales que manejan esta información.

La Autopista General Rumiñahui en sus 14 km de extensión atraviesa al cantón Quito y Rumiñahui, pero su competencia está en las manos de la Prefectura de Pichincha. Así que es preciso identificar que GAD municipal maneja con mayor precisión la información citada anteriormente. El DMQ en su geo portal de Gobierno Abierto de Quito se puede descargar la capa de edificaciones de toda la ciudad, de zonas urbanas y rurales. El resto de capas (curvas de nivel, vial) se pudo obtener de diferentes portales gubernamentales y de libre acceso, los cuales se verán a lo largo de este apartado.

El mapa de ruido en este proyecto tiene dos objetivos principales, primero, estudiar el comportamiento del ruido de tráfico de autopista e identificar la situación acústica de la zona en un radio de 500 m. Segundo, los niveles de ruido simulados se usarán como variable independiente en el modelo de regresión lineal y a partir de esto predecir los niveles de PM2.5 en las áreas no medidas.

3.4.1 Curvas de Nivel

Para iniciar con el modelamiento digital del terreno se procedió a obtener un Modelo Digital de Elevación (DEM) de la zona, la cual es una imagen de alta resolución con un cell size muy preciso como se muestra en la tabla 8. Posteriormente el DEM de la Autopista General Rumiñahui se convertirá en la capa de curvas de nivel y para eso se usó el software ARC MAP, el cual permite montar varias capas con diferentes atributos en un mismo archivo ARC MAP DOCUMENT.

Tabla 8

Cell size del Modelo Digital de Elevación.

X	0,00034332639
Y	0,00034332278

El DEM al ser una imagen satelital de alta resolución en cada uno de sus pixeles posee metadatos de elevación del terreno en escala de grises, brindando información del relieve del terreno en una base matricial constituida por vectores llamada "raster". Dicha imagen de alta resolución se obtuvo de la plataforma gubernamental del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), en la figura 17 se puede ver a detalle la imagen.

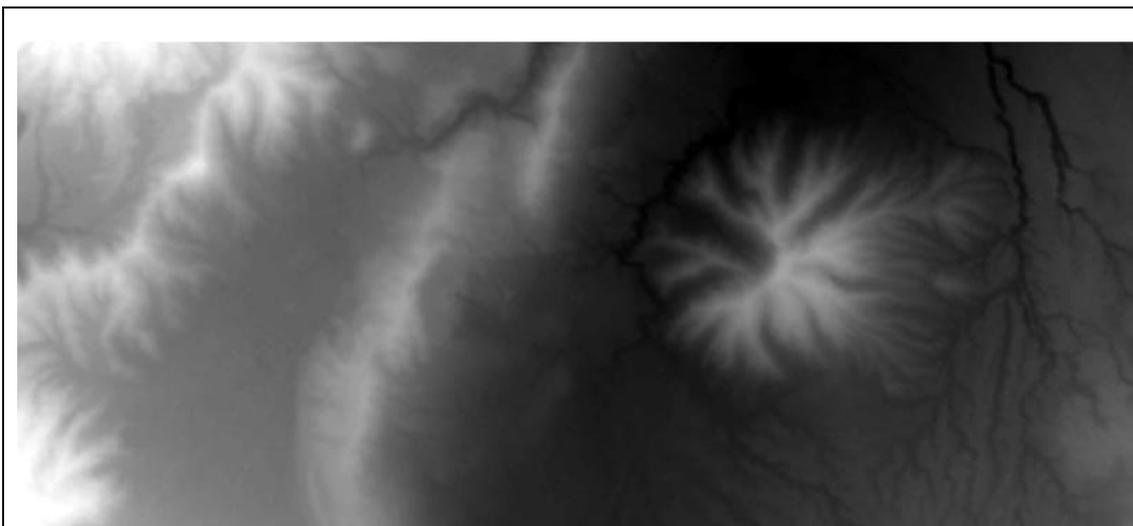


Figura 16. DEM de la Autopista General Rumiñahui – Zona WSG84-17s del hemisferio sur. Tomado de la plataforma USDS (2019).

Mediante la herramienta 3D Analisis Contour de ARCMAP se obtuvieron las curvas del nivel de toda la Autopista General Rumiñahui a partir del DEM con un intervalo de 10 m por curva. En la figura 17 puede verse el resultado que se obtuvo a partir de la imagen satelital del área.



Figura 17. Curvas de Nivel de la Zona WSG84-17s del hemisferio sur – Autopista General Rumiñahui.

3.4.2 Capa Construcciones

A partir de las curvas de nivel como capa base, se adjuntó posteriormente la capa de construcciones un mismo archivo ARC MAP DOCUMENT. Esta capa posee la información catastral de 594.499 edificaciones que están dentro del cantón Quito, tanto zonas urbanas como rurales. En la figura 18 se muestra la capa “construcciones”.

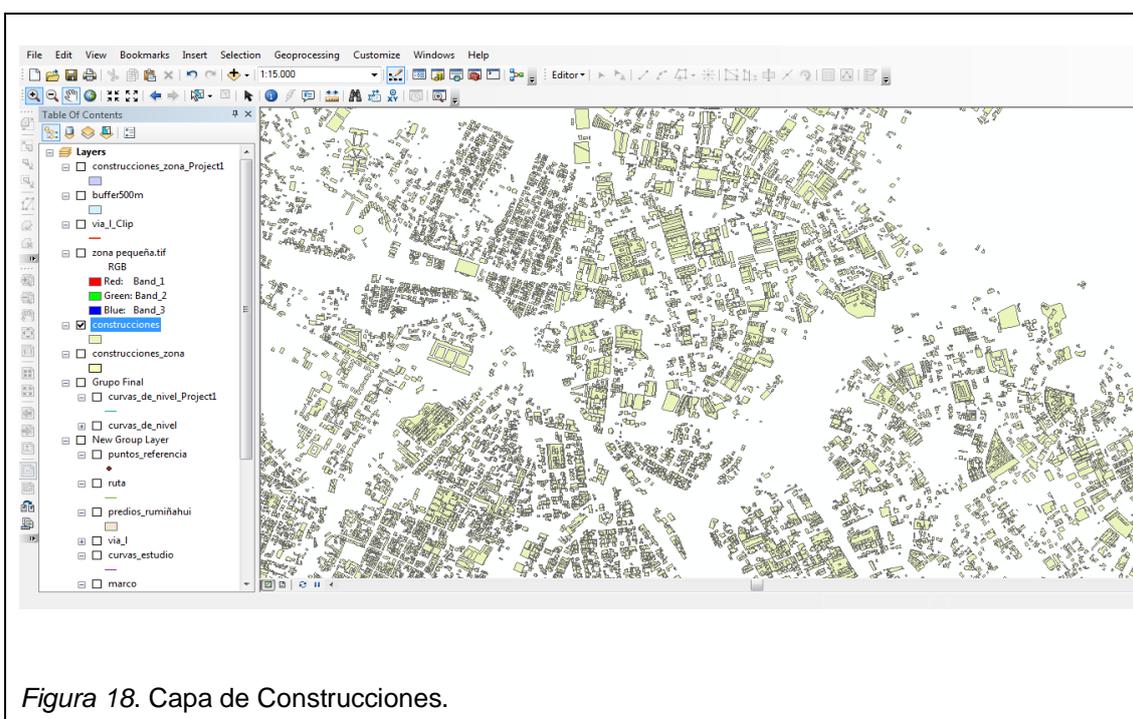


Figura 18. Capa de Construcciones.

3.4.3 Buffer 500 m

Al terminar el montaje de curvas de nivel y construcciones se trazó un vector guía sobre la Autopista General Rumiñahui para realizar un buffer en un radio de 500m. Como se muestra en la figura 19 se recortó la zona de estudio con ayuda de un buffer y la herramienta CLIP, tanto de las capas, curvas de nivel y construcciones.

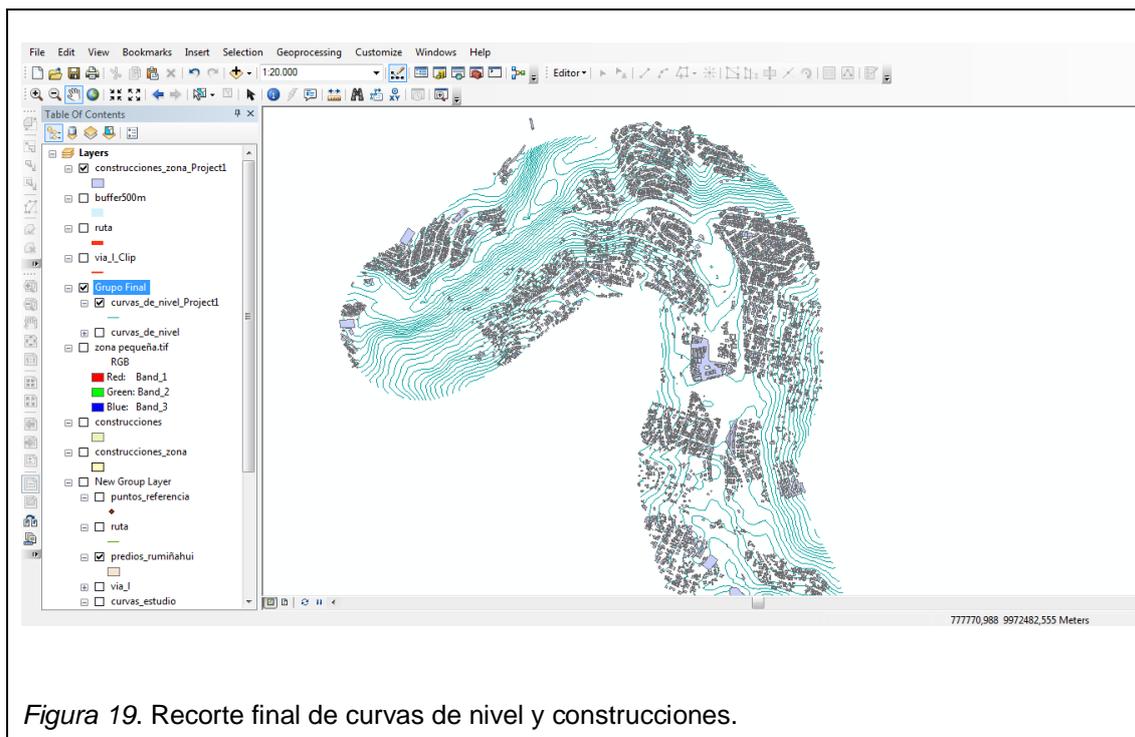


Figura 19. Recorte final de curvas de nivel y construcciones.

3.4.4 Levantamiento Vial

Para el levantamiento de la capa vial, la plataforma Open Street Map permite acceder a metadatos de carreteras, semáforos, vegetación, etc. Dicha información debe estar en formato. OSM, la cual es necesaria para modelar la fuente lineal de ruido en el software de predicción Cadna-A. El área vial está comprendida entre el sector de El Trébol hasta el CC San Luis Shopping, como se muestra en la figura 20.

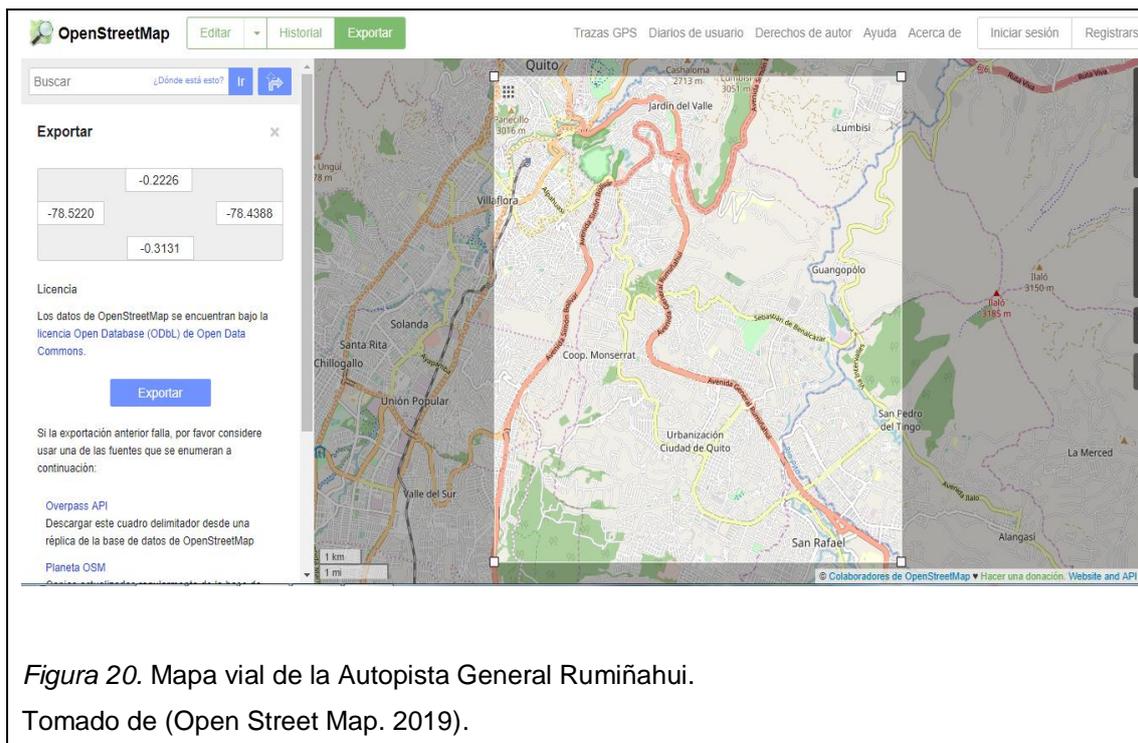


Figura 20. Mapa vial de la Autopista General Rumiñahui.
Tomado de (Open Street Map. 2019).

3.4.5 Cadna-A - Mapa de Ruido

Para iniciar, es necesario configurar el software de predicción seleccionando el modelo de RLS – 90 de ruido de tráfico, altura de receptores a 4 m y el mallado de 10 m por cada eje (X, Y). Posteriormente se importan las capas de curvas de nivel y construcciones en .SHP proyectadas en coordenadas WGS 84 17s. Finalmente, se acopla la capa vial con las anteriores y se colocaron los receptores de ruido de acuerdo a las coordenadas de los puntos de medición de la tabla 5. Los receptores ayudaran al proceso de validación del modelamiento de ruido de tráfico por medio de una diferencia absoluta entre niveles de ruido simulados y medidos no mayor a 5dB. En la figura 21 se puede ver el resultado final del modelamiento digital del terreno.



Los datos de tráfico vehicular se ingresan en la tabla de atributos del modelo RLS- 90 como se muestra en la figura 22 y se usarán datos horarios de aforo y límites de velocidad tanto de vehículos livianos y pesados.

Carretera (RLS 90)

Nombre: General Rumiñahui

ID: road_02309

STE/Dist. (m): 0.0

Límite velocidad (km/h): 90

Ligeros: 90

Pesados 70

Emisión: Lm.E dB(A)

Aforo, IMD: 0

Tipo de carretera: Carretera Princip

Datos horarios de aforo:

Número de vehiculos/hora M:

D: 2688.00 E: 0.00 N: 0.00

Porcentaje de vehiculos pesados p (%):

D: 9.0 E: 0.0 N: 20.0

Lm.E dB(A)

D: 71.5 E: -1.3 N: -0.9

Día Tarde Noche

Tipo asfalto: 1. Asfalto liso mastic

Dstro dB(A): 0.0

Pendiente carretera: Entrada 0.0

Reflexión múltiple:

Drefl dB(A): 0.0

Altura media (m): 0.0

Distancia (m): 0.0

Reflectante

OK Cancelar Geometría... Ayuda

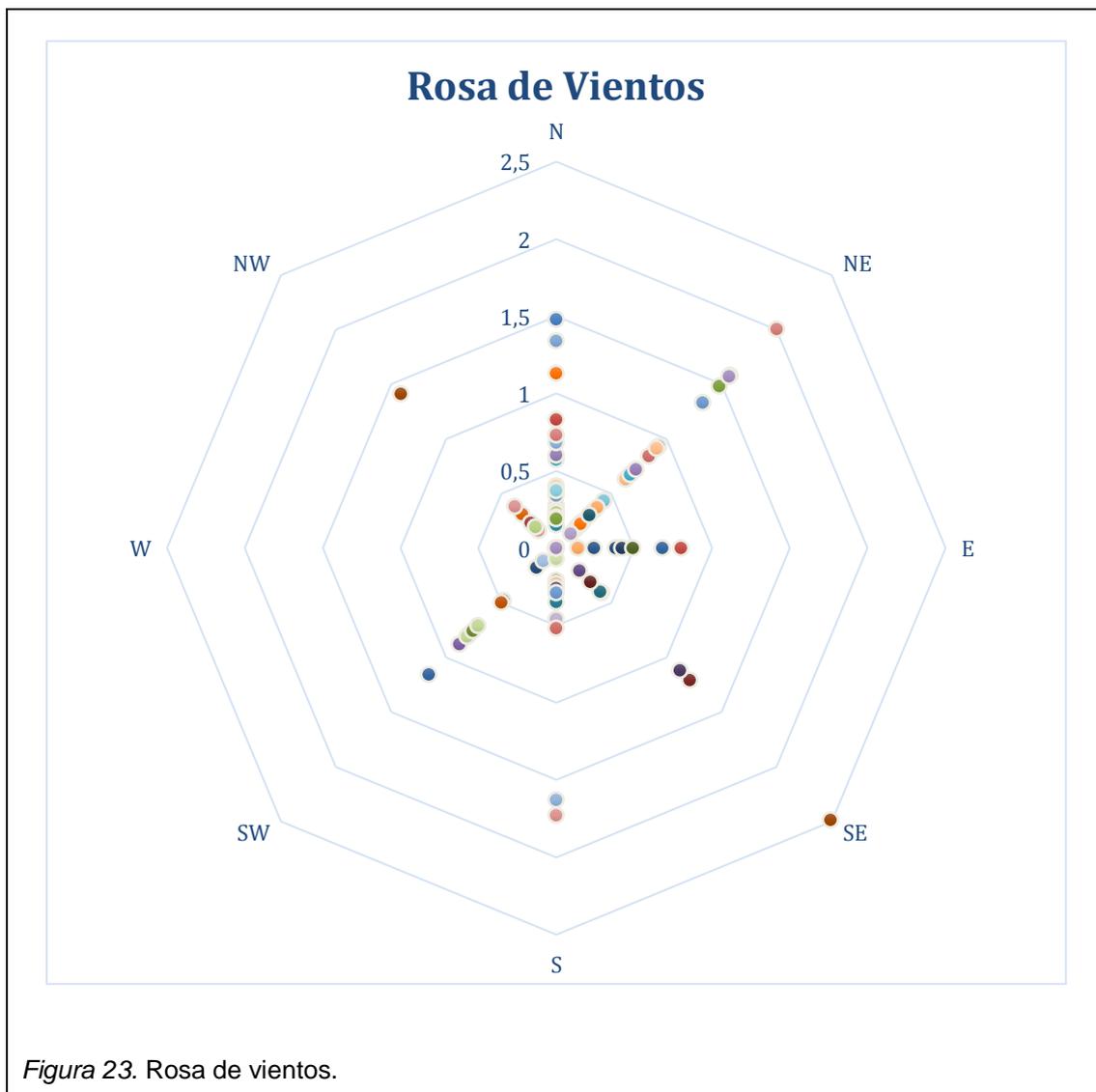
Figura 22. Ingreso de datos de conteo vehicular Cadna-A.

4 RESULTADOS

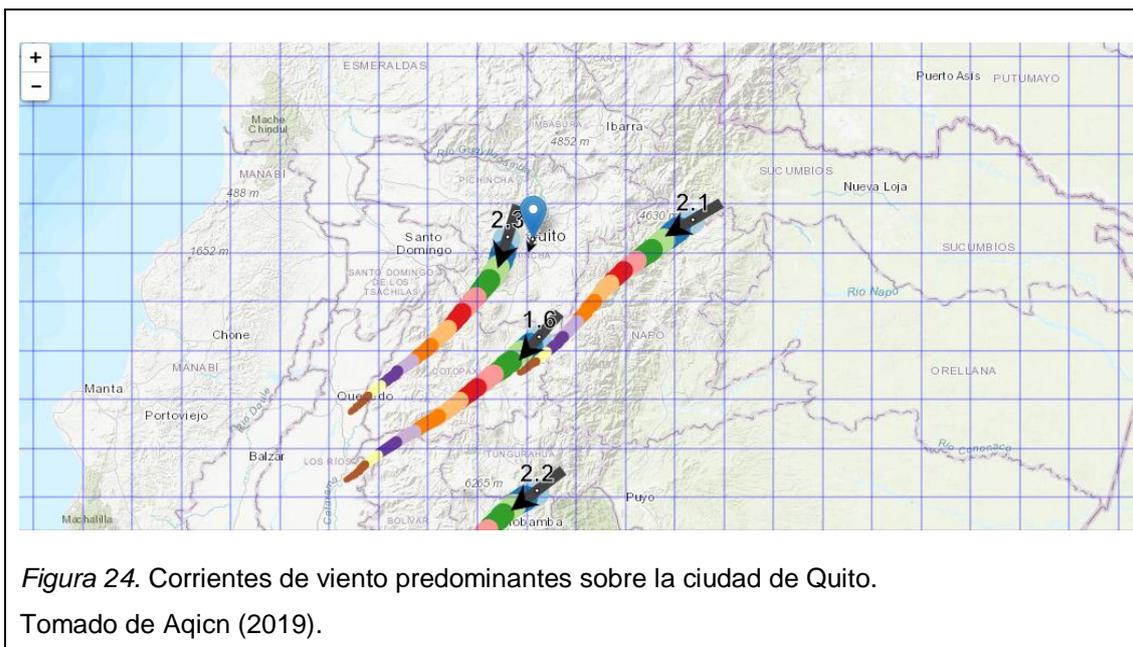
4.1 Estabilidad Atmosférica

El análisis atmosférico conlleva identificar si las condiciones ambientales pueden causar turbulencias mecánicas y/o térmicas al efecto de dispersión de material particulado. De acuerdo a la tabla 3 la estabilidad de atmosférica se debe clasificar en 6 tipos (A, B, C, D, E, F) en función de la velocidad del viento y radiación solar.

En la figura 23 se muestra la rosa de vientos de las 94 mediciones de velocidad y 94 de dirección del viento. Los resultados muestran que vientos del NE representan el 31,9%, del N el 20,2% y del SW, S en ambos casos el 10,6%, el resto de puntos cardinales no supera el 10%.



Los vientos del N y NE predominan sobre la zona estudio, esto se puede corroborar con la herramienta Aqicn (2019), la cual muestra que existen corrientes de viento provenientes de estas direcciones sobre la ciudad de Quito. Esta herramienta se encuentra en la página de la Secretaria del Ambiente, en la figura 27 se muestran las corrientes predominantes del N y NE.



En la tabla 9 se muestra los resultados estadísticos de velocidad del viento, como se observa el promedio es de 0,59 m/s. De acuerdo a las clases de estabilidad atmosférica de la tabla 3, se puede catalogar que la velocidad promedio del viento está dentro los parámetros mínimos de estabilidad, < 2 m/s.

Tabla 9

Resultados estadísticos de velocidad del viento.

VELOCIDAD DEL VIENTO	m/s
Promedio	0,59
Max	2,49
Min	0,07
Desviación Estándar	0,49

Por otro lado, el nivel máximo de velocidad muestra un valor de 2,49 m/s, esta medición de velocidad es un dato aislado que proviene del SE como se muestra en la figura 26. Además, la variabilidad de las mediciones es de 0,49 m/s lo cual indica que las velocidades de viento durante los 3 días de medición no cambian abruptamente.

En la tabla 10 se muestran los resultados de radiación solar de los 3 días de medición, los cuales fueron descargados de la estación Los Chillos – Secretaria del Ambiente y se muestran en la unidad de cal/cm²h.

Tabla 10

Resultados estadísticos de radiación solar.

RADIACIÓN SOLAR	cal/cm²h
Promedio	23,70
Max	66,36
Min	0,83
Desviación Estándar	20,54

El valor mínimo de estabilidad de atmosférica en función de la radiación solar indica que debe ser < a 25 cal/cm²h y como muestra el promedio de radiación solar en la tabla 10, en los 3 días de medición se obtuvo un promedio de 23,70 cal/cm²h. Respeto a la desviación estándar se puede decir que existe una variabilidad de 20,54 cal/cm²h lo cual indica que los niveles de radiación no son del todo estables. Esto se debe a que el sol se encuentra en diferentes posiciones a lo largo del día dentro la bóveda celeste, por lo cual puede elevar y disminuir los niveles de radiación.

Por último, se cataloga la estabilidad atmosférica en la clase B, con un grado inestabilidad media, asociado a bajas velocidad de viento como también de radiación solar. Lo que permitiría tener condiciones favorables atmosféricas para que exista una dispersión homogénea del material particulado mientras el receptor se aleja de la fuente. Cabe resaltar que existe la posibilidad que las propiedades termodinámicas del PM_{2.5} estén siendo afectadas por los niveles de radiación. Debido a que mientras la temperatura del aire tiende a aumentar mientras este asciende, causa que los gases de emisión se expandan.

4.2 Análisis de Temperatura y Humedad Relativa

A partir de la clasificación de estabilidad atmosférica clase B, es necesario identificar en que intervalo de medición se producen cambios abruptos de temperatura y humedad relativa, ya que el material particulado es susceptible a turbulencias térmicas. Los resultados estadísticos de temperatura se muestran en la tabla 11, como se puede apreciar el periodo diurno es 1 °C menor al vespertino, pero posee una variabilidad mayor, como lo muestra su desviación estándar.

Tabla 11

Temperatura y humedad relativa – Datos estadísticos descriptivos.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Temperatura Día	47	14,70	31,00	21,88	4,42
Temperatura Tarde	47	19,60	29,00	22,85	2,85

Es importante acotar que la humedad relativa es inversamente proporcional a la temperatura, esto quiere decir que a menor temperatura mayor cantidad de moléculas de agua van a estar suspendidas en el aire. La tabla 12 muestra que la humedad relativa en el día es del 57%, 3% mayor al de la tarde, además la variabilidad es mucho más alta en el periodo diurno.

Tabla 12

Temperatura y humedad relativa – Datos estadísticos descriptivos.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Humedad Relativa Día	47	29,00	83,40	57,55	14,34
Humedad Relativa Tarde	47	32,60	68,40	54,52	9,72

En el periodo vespertino el aire es más caliente y muestra ser más estable de acuerdo a su desviación estándar de 9,72. A partir de estos resultados se puede decir que los niveles de concentración de material particulado son más estables

en el horario vespertino debido a la baja variabilidad de temperatura y humedad relativa.

4.3 Análisis de PM2.5

La tabla 13 muestra los niveles de concentración de PM2.5 de acuerdo a cada zona y punto de medición. Este análisis parte de la siguiente premisa, el nivel de concentración de PM2.5 decae mientras el receptor se aleja de la fuente por relación inversa con la velocidad del viento. De acuerdo al análisis de estabilidad atmosférica, terreno y velocidad del viento esto es factible. Debido a que muestran magnitudes que están dentro de lo recomendado como se mostró en el apartado anterior.

Se realizó un promedio lineal de concentración para cada intervalo de medición día "PM_DÍA" y tarde "PM_TARDE", también como se puede observar se realizó un promedio por cada punto de medición. En la última columna se muestra la diferencia en valores absolutos entre niveles día y tarde de cada punto de medición como también del periodo diurno y vespertino. Por último, la desviación estándar muestra la variación del nivel de concentración por cada periodo.

El nivel promedio de concentración de PM2.5 en el día es de 1298.4 ug/m³ y en la tarde 337.9 ug/m³, lo cual muestra una clara diferencia entre el nivel diurno y vespertino de 960 ug/m³. Respecto a la desviación estándar el periodo tarde muestra un valor de 197,1 ug/m³, lo cual concuerda con el apartado anterior en el cual se pudo observar que los niveles de temperatura y humedad relativa muestran poca variabilidad. Cabe señalar que los niveles de material particulado por punto de medición en el horario diurno no muestran el decaimiento respecto a la fuente como se esperaba, ya que mientras se alejan de la fuente los niveles de concentración se elevan.

Tabla 13

Niveles promedio de concentración de PM_{2.5} distribuido de acuerdo a cada zona y punto de medición.

ZONA	PUNTO	DISTANCIA	PM_DÍA	PM_TARDE	DIFERENCIA
PUENTE 8	CONOC_1	2	900	538	362,0
	CONOC_2	72	1602	399	1202,7
	CONOC_3	118	1549	367	1181,7
	CONOC_4	173	3195	204	2991,8
	ARME_1	4	1348	415	932,7
	ARME_2	60	2210	678	1531,8
	ARME_3	104	1672	283	1389,0
	ARME_4	155	1247	288	959,4
DESPIO	SIM-SUR_1	4	777	248	529,4
	SIM-SUR_2	55	846	149	697,3
	SIM-SUR_3	104	1034	78	956,7
	SIM-NOR_1	2	1127	315	812,0
	SIM-NOR_2	32	958	276	682,7
	SIM-NOR_3	68	598	543	55,5
ORQUIDEAS	OR_MON_1	2	1333	530	802,7
	OR_MON_2	65	848	159	688,6
	OR_MON_3	129	1051	168	883,1
	OR_BAR_1	3	1225	811	414,1
	OR_BAR_2	42	873	176	697,9
	OR_BAR_3	98	1573	134	1438,9
	PROMEDIO		1298,4	337,9	960,5
	DES_STAN		589,2	197,1	

Como se puede observar en la tabla 13 el periodo diurno muestra un de concentración elevado y con alta variabilidad respecto al vespertino. Esto se debe a que en las primeras horas de la mañana se presenta un fenómeno natural llamado inversión termina y se lo explica a continuación.

El aire se mueve constantemente formando capas de acuerdo a su temperatura como se muestra en la figura 25, desde el aire más frío en la parte alta y el más caliente en la parte baja.

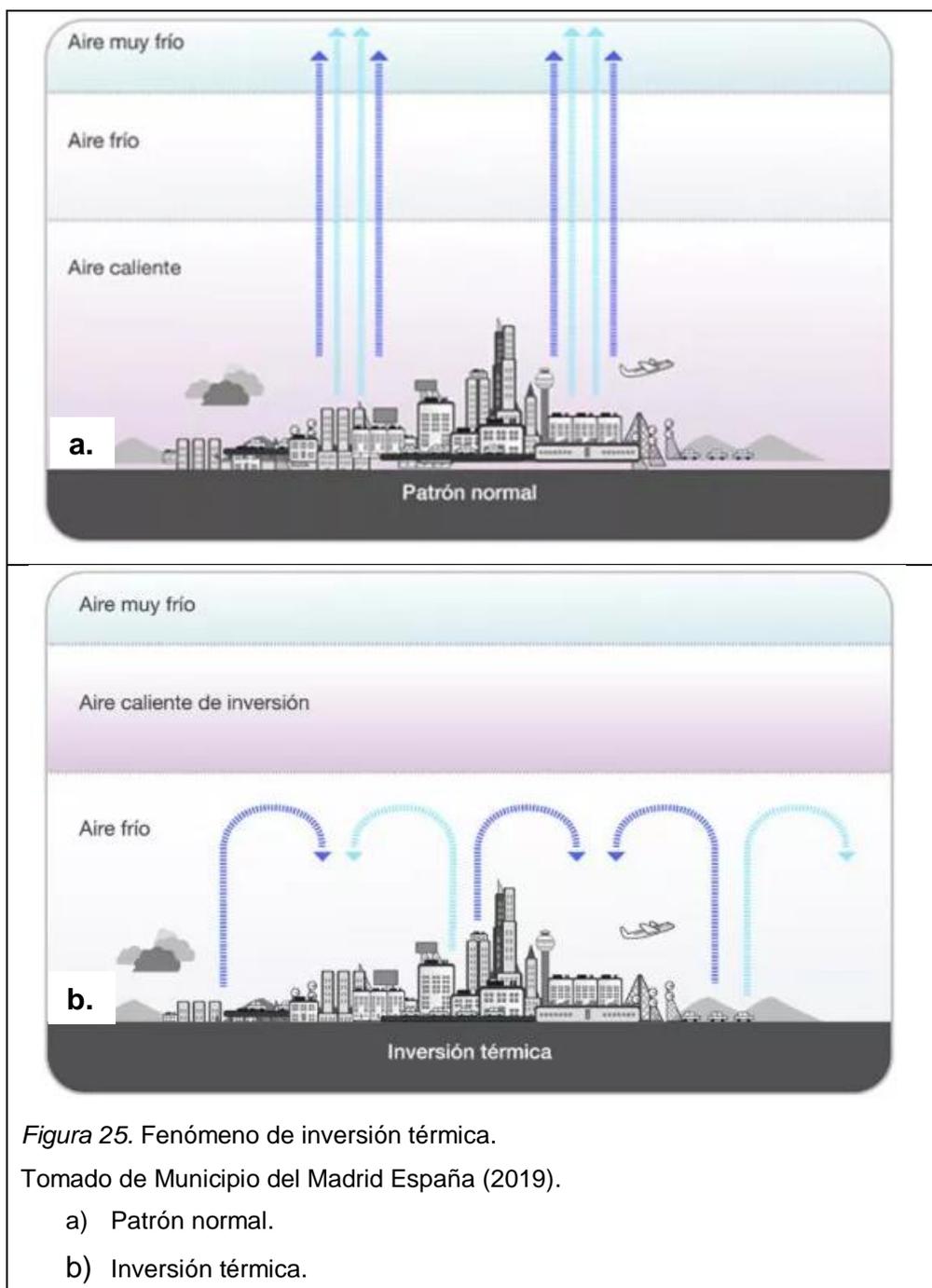


Figura 25. Fenómeno de inversión térmica.

Tomado de Municipio del Madrid España (2019).

a) Patrón normal.

b) Inversión térmica.

De acuerdo a la figura 25.a el aire se moviliza con normalidad y permite circular grandes cantidades de polvo, humo y material particulado, haciendo que el contaminante se elimine y limpie de la atmósfera de forma natural. Ahora, si esto se interrumpe se crea una capa de aire frío sobre la superficie lo que ocasiona que los contaminantes atmosféricos queden atrapados y suspendidos, por lo cual

la población se expone a respirar un aire más contaminado de lo normal. Este fenómeno se produce cuando el suelo a perdido calor por radiación en la noche y las capas de aire cercanas a la superficie se enfrían más rápido que las capas superiores (Ayuntamiento de Madrid, 2019). Esto explicaría los altos niveles de concentración de PM2.5 en el periodo diurno.

A continuación, la figura 26 muestra los gráficos de cajas y bigotes de PM2.5 mientras el receptor se aleja de la fuente de acuerdo a cada sector medido. También, se describe la media, 1er y 3er intercuartil (grado de dispersión), puntos máximos y mínimos de los niveles de concentración de PM2.5, tanto del intervalo diurno y vespertino.

Como se puede observar en las figuras 26.b “Puente 8 Intercambiador La Armenia” y 26.e “Orquídeas Monjas” existe un grado de dispersión bastante elevado del 3er intercuartil respecto a la media. Este comportamiento se lo puede atribuir el efecto de inversión térmica como anteriormente se explicó. El punto 4 de la figura 26.a “Puente 8 Entrada a Conocoto” muestra un comportamiento similar, pero es preciso indicar que este punto de medición se encuentra a 173 m respecto a la autopista. Por lo cual el cambio de temperatura de la superficie es bastante significativo en este punto de medición para que el efecto de inversión térmica se manifieste solo en el punto 4 de la figura 26.a. Además, se puede decir que estadísticamente los datos de estos sectores están sesgados hacia un sólo lado de la distribución, lo cual muestra una asimetría respecto a su media.

Los niveles máximos respecto a la media varían entre 500 y 2000 ug/m³ en las figuras 26.b, 26.e, 26.a punto 4 y 26.c “Desvío Av. Simón Sur” punto 1 y 2 lo cual indica un cambio abrupto de condiciones termodinámicas del PM2.5. Entonces, cabe decir, que los puntos máximos, mínimos y datos aislados no cumplen con el criterio de relación inversa, ya que estos datos están siendo afectados por las condiciones atmosféricas de la zona. Lo que representaría a sucesos poco comunes o de un distinto origen al material particulado, a estos datos se los

puede catalogar como outliers, es decir valores atípicos, una observación que es numéricamente distante al resto de los datos.

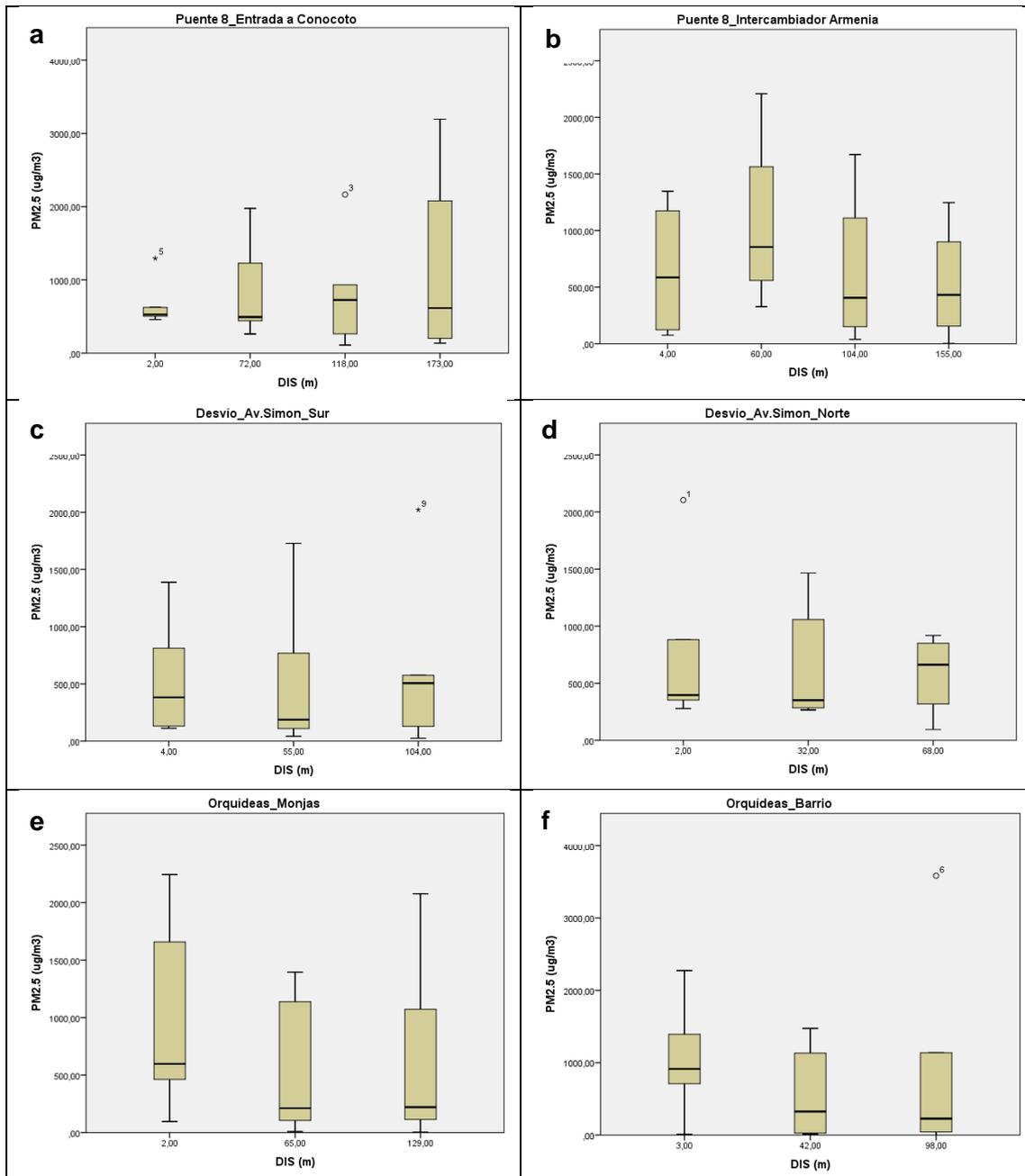


Figura 26. Niveles de concentración de PM2.5 de cada sector de medición. Diagramas de cajas y bigotes.

Ahora, las mediciones que serán tomadas en cuenta para el cálculo del coeficiente de correlación son aquellas que están dentro del 1er y 3er intercuartil, el llamado “rango intercuartil”. Al aplicar este criterio estadístico se podrá sesgar datos atípicos o outliers permitiendo ajustar los datos sobre la recta de puntos de dispersión, marcando así una tendencia estadística.

Por último, se identifican los puntos de medición que cumplen el con el criterio de relación inversa entre material particulado y velocidad del viento. Es decir, mientras el receptor se aleja de la fuente la media de cada punto debe decaer con la distancia. Esto se puede observar en las figuras 26.a, 26.c, 26.d “Desvío Av. Simón Norte”, 26.e y 26.f “Orquídeas Barrio”, pero la media en los últimos puntos de medición tiende a elevarse, lo cual es un indicativo de que existen otras fuentes de contaminación aledañas. Además, la figura 26.b punto 2 muestra una media por encima del punto 1, siendo esto un comportamiento atípico lo que puede ser causado por turbulencias mecánicas en el terreno del punto 1.

Desde un punto de vista general los niveles vespertinos de concentración de PM_{2.5} son más estables como lo muestra la desviación estándar de la tabla 13. Esto se debe a que no existe una capa de aire frío sobre la superficie, lo que permite una mejor dispersión del material particulado sobre la zona. También, la figura 26 muestra que el 3er intercuartil muestra un alto grado de dispersión respecto a la media en varios sectores medidos, manteniendo una distribución asimétrica, lo cual muestra que son propensos al efecto de inversión térmica u otros factores ambientales.

4.4 Análisis de Ruido

En la tabla 14 los niveles de ruido de tráfico se encuentran categorizados tanto por zona y punto de medición. Este análisis parte de la premisa de divergencia geométrica, lo que quiere decir, que el nivel de ruido de tráfico disminuye mientras el receptor se aleja de la fuente. Los niveles de ruido día “LAEQ_DÍA” y tarde “LAEQ_TARDE” son promedios logarítmicos de cada punto de medición,

como también de acuerdo a su intervalo diurno o vespertino. La diferencia entre los promedios es absoluta la cual se encuentra en la última columna. Por último, la desviación estándar muestra la variación de los niveles de ruido por intervalo de medición.

Tabla 14

Niveles promedio de ruido de tráfico distribuido por zona y punto de medición.

ZONA	PUNTOS	DISTANCIA	LAEQ_DÍA	LAEQ_TARDE	DIFERENCIA
PUENTE 8	CONOC_1	2	75,3	73,3	2,0
	CONOC_2	72	71,7	73,7	2,1
	CONOC_3	118	81,5	67,9	13,6
	CONOC_4	173	72,8	70,1	2,7
	ARME_1	4	70,2	71,4	1,2
	ARME_2	60	71,5	69,7	1,8
	ARME_3	104	63,5	66,6	3,1
	ARME_4	155	54,3	60,6	6,3
DESUDIO	SIM-SUR_1	4	69,4	71,5	2,0
	SIM-SUR_2	55	70,9	69,5	1,4
	SIM-SUR_3	104	78,2	77,8	0,4
	SIM-NOR_1	2	73,3	74,3	1,0
	SIM-NOR_2	32	64,5	63,7	0,8
	SIM-NOR_3	68	72,5	74,4	1,9
ORQUIDEAS	OR_MON_1	2	71,9	73,5	1,5
	OR_MON_2	65	66,4	66,9	0,5
	OR_MON_3	129	65,8	64,5	1,3
	OR_BAR_1	3	73,5	73,3	0,2
	OR_BAR_2	42	68,9	63,5	5,4
	OR_BAR_3	98	68,0	70,3	2,4
	PROMEDIO		74,1	71,4	2,7
DES_STAN		5,8	4,5		

De acuerdo a la tabla 14 el nivel de ruido diurno muestra un promedio de 74.1 dBA y vespertino de 71,4 dBA con una diferencia de tan sólo 2.7 dBA, lo cual no es un valor representativo. La desviación estándar también muestra que la variación del nivel de ruido en el día es de 5.8 y 4.5 para la tarde, siendo valores muy cercanos entre sí. Por lo tanto, se puede intuir que el comportamiento de la fuente es similar en el día como en la tarde.

Para que exista un cambio significativo en los niveles de ruido de tráfico el flujo vehicular debe ser elevado en uno de los dos intervalos de medición. Además, los factores ambientales y de estabilidad atmosférica, muestran valores estables, como por ejemplo el promedio de la velocidad del viento de 0,59 m/s, si excediera velocidades mayores a 5 m/s sería contraproducente realizar mediciones de ruido. Esto se debe a que el sonido se propaga dentro de masas de aire, velocidades altas de viento hacen que dichas masas se desplacen. Lo que ocasiona que los rayos incidentes sonoros se curven hacia la superficie ocasionando un aumento del nivel de ruido de acuerdo a la ubicación del receptor, si está en contra o a favor del viento (Ramón, 2016).

Como se pudo observar en la tabla 14 el nivel de ruido diurno es relativamente más elevado al vespertino, esto puede tener la siguiente explicación. Al identificar la presencia de inversión térmica, dicho fenómeno ocasiona que los rayos incidentes sonoros se precipiten hacia el suelo en lugar de continuar su programación con normalidad, lo que ocasionaría un aumento de los niveles de ruido (Ramón, 2016). Lo que justificaría del por qué el nivel de ruido diurno es 2,7 dBA más elevado que el nivel vespertino. Para corroborar este análisis es preciso realizar un análisis del flujo vehicular, el cual se muestra a continuación.

El conteo vehicular se lo realizó únicamente en los puntos cercanos a la vía durante un periodo de 5 min. De acuerdo a tabla 15 y 16 la media de número de vehículos (livianos y pesados) tanto en el día como en la tarde son prácticamente iguales.

Tabla 15

Conteo vehicular día – Datos estadísticos descriptivos.

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Livianos	7,00	215,00	103,54	62,89
Pesados	1,00	58,00	17,87	13,14

Respeto a la variabilidad, ambos periodos muestran valores semejantes tanto para vehículos livianos y pesados. Por lo cual se puede intuir que el de flujo vehicular no cambia para periodo diurno y vespertino, únicamente en los horarios de mayor emisión de material particulado.

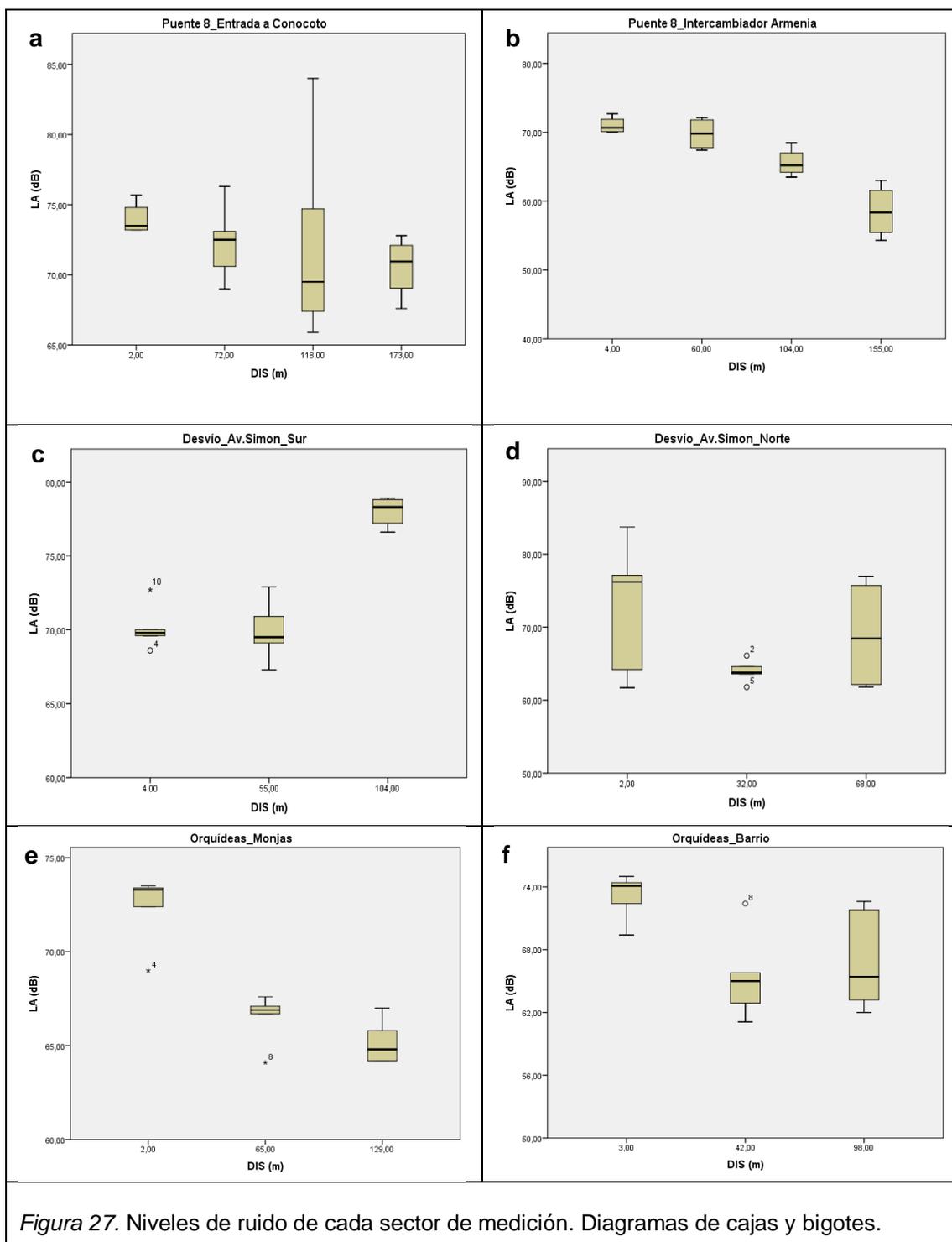
Tabla16

Conteo vehicular tarde – Datos estadísticos descriptivos.

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Livianos	5,00	337,00	104,29	77,66
Pesados	,00	48,00	16,29	13,00

La figura 27 muestra los gráficos de cajas y bigotes del ruido de tráfico mientras el receptor se aleja de la fuente de acuerdo a cada sector medido. También, se describe la media, 1er y 3er intercuartil (grado de dispersión), puntos máximos y mínimos de los niveles de ruido, tanto del intervalo diurno y vespertino.

Como se puede ver en la figura 27.a “Puente 8 Entrada a Conocoto” punto 3, 27.f “Orquídeas Barrio” punto 3, el 3er intercuartil presenta un grado de dispersión de entre 5 y 10 dB. El 1er intercuartil de la figura 27.d “Desvío Av. Simón Norte” punto 1 muestra una dispersión de 10 dB. El análisis del rango intercuartil muestra una asimetría respecto a su media, por lo cual se puede decir que existe un sesgo de los datos hacia un solo lado de la distribución. Lo que quiere decir que el nivel de flujo vehicular cerca a estos puntos de medición es muy variable o fuentes externas de ruido fueron captadas por el receptor. A diferencia del resto de puntos de medición su rango intercuartil es cercano a la media, entre 1 o 2 dB, mostrando una mejor distribución respecto a la media.



A partir de las gráficas individuales de la figura 27 se pueden identificar los máximos, mínimos y casos aislados los cuales están por debajo y encima del rango intercuartil de cada punto de medición, denominados outliers de cada punto de medición. Posteriormente las mediciones que estén fuera de este rango

serán separadas del cálculo del coeficiente de correlación por el hecho de que son datos atípicos, lo que implica que el receptor captó niveles de ruido externos al de la autopista. Esto ayuda a trabajar con datos que marquen una tendencia estadística a la recta de puntos de dispersión, permitiendo que el coeficiente sea más ajustado, marcando una correlación fuerte.

La media en la mayoría de los puntos de medición de la figura 30 muestran una tendencia de pérdida de nivel sonoro por divergencia geométrica mientras el receptor se aleja de la fuente. Al igual que en el análisis de cajas y bigotes de material particulado los últimos puntos de medición su media tiende a elevarse, esto se debe a la contribución de fuentes externas de ruido.

Desde un punto de vista general los resultados de ruido de tráfico muestran el comportamiento esperado de pérdida de nivel por divergencia. La inversión térmica afecta únicamente a los niveles de ruido diurnos, el resto de factores ambientales se encuentra dentro de los parámetros recomendados. Esto quiere decir que el efecto de propagación se desenvuelve con normalidad. También se pudo observar que existen fuentes de ruido externas a la autopista que interfirieron con los resultados de algunos puntos de medición. Dichos resultados, niveles máximos, mínimos y casos aislados serán separados del cálculo del coeficiente de correlación.

4.5 Correlación PM2.5 y Ruido

A continuación, se muestran los resultados de correlación de Pearson la cual es una medida lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. Se realizaron 3 cálculos de correlación, de los cuales el 1ro muestra una correlación general entre los 94 pares medición de ruido y material particulado. El 2do muestra una correlación entre los 47 pares de nivel de ruido y material particulado vespertino, ya que los niveles diurnos muestran anomalías causadas por la presencia de la inversión térmica. Por último, se muestra una correlación a partir de los criterios de divergencia geométrica y relación inversa de los niveles de concentración de material particulado con la velocidad del viento.

De acuerdo con los resultados de correlación de la tabla 17 con los 94 pares el coeficiente de correlación es de 0,10 y con una significancia estadística de 0,32, lo cual muestra que no existe algún tipo de correlación entre los niveles de ruido y material particulado. Esto es comprensible y justificado en los apartados anteriores, ya que en las mediciones del periodo diurno se verifico la presencia de inversión térmica, lo cual interfiere con los niveles de concentración, dispersión y propagación de PM2.5 y ruido. Por esta razón es necesario clasificar y sesgar los datos de correlación, como se muestra en la tabla 18 y 19.

Tabla 17

Correlación de Pearson de los 94 pares de ruido y PM2.5.

		RUIDO	PM
RUIDO	Correlación de Pearson	1	,104
	Sig. (bilateral)		,321
	N	94	94
PM	Correlación de Pearson	,104	1
	Sig. (bilateral)	,321	
	N	94	94

La tabla 18 muestra la correlación entre los 47 pares de nivel de ruido y concentración del PM2.5 del periodo vespertino, debido a que los niveles diurnos muestran anomalías por el fenómeno de inversión térmica. Lo cual no tendría sentido analizar, ya que se busca resultados que muestren la mínima variabilidad por fenómenos atmosféricos. Como resultado el periodo vespertino muestra una clara mejoría del coeficiente de correlación de 0,10 a 0,30 y una significancia estadística de 0,04 lo cual es menor a la significancia bilateral de 0,05. Lo que quiere decir, que se rechaza la hipótesis nula, que dice, “no existe algún tipo de correlación entre los niveles de ruido y concentración de PM2.5”. Entonces, al ser un valor inferior al de la significancia bilateral se acepta la hipótesis de que si existe una correlación entre estos dos contaminantes.

Tabla 18

Correlación de Pearson de los 47 pares de ruido y PM2.5 – Tarde.

		RUIDO TARDE	PM TARDE
RUIDO TARDE	Correlación de Pearson	1	,300*
	Sig. (bilateral)		,041
	N	47	47
PM TARDE	Correlación de Pearson	,300*	1
	Sig. (bilateral)	,041	
	N	47	47

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

A partir de este resultado se puede aplicar los criterios de divergencia geométrica y relación inversa para ajustar el coeficiente de correlación sobre el periodo vespertino, al poseer una mayor estabilidad de factores ambientales. Esto es necesario para identificar los datos que no están influenciados por turbulencias mecánicas y térmicas. Aplicando dichos criterios se identificaron las mediciones que muestran un decaimiento del nivel de ruido y concentración de PM2.5 mientras el receptor se aleja de la fuente, los cuales se muestran en la tabla 19.

Tabla 19

Puntos de medición usados para el cálculo de correlación.

PUNTO	INTERVALO	LA_EQ	PM	DISTANCIA
CONOC_1	T	73,5	459	2
CONOC_2	T	69	262	72
CONOC_1	T	73,2	529	2
CONOC_2	T	73,1	492	72
SIM-SUR_1	T	72,7	382	4
SIM-SUR_2	T	67,3	187	55
OR_MON_1	T	73,5	463	2
OR_MON_2	T	66,7	106	65
OR_MON_1	T	73,4	598	2
OR_MON_2	T	67,1	212	65
OR_BAR_1	T	72,4	709	3
OR_BAR_2	T	61,1	26	42

De las 94 mediciones de ruido y material particulado estos datos solo representan el 12%, pero al realizar la correlación de Pearson en los niveles vespertinos se identificó que los datos de la tabla 19 representan el 25% de los 47 pares. El resto son datos que están influenciados por perturbaciones mecánicas y térmicas, también, se puede observar que el efecto de dispersión y propagación ocurre en distancias medias respecto a la fuente.

Como se indicó, las 47 mediciones del periodo diurno de ruido y PM2.5 no se tomaron en cuenta por sus altos niveles de concentración de material particulado e inestabilidad, en el Anexo 2 se muestra la tabla de correlación de dichos niveles. Cabe señalar que de acuerdo al análisis del terreno estos puntos de medición se encuentran en sectores donde el terreno es lo más plano posible, para evitar la interferencia de turbulencias mecánicas en el proceso de mediciones. A continuación, en la tabla 20 se muestran resultado de correlación de Pearson y significancia estadística de los datos de la tabla 19. El coeficiente de correlación tiene un valor de 0,88 y una significancia de 0,000, lo cual elimina la hipótesis nula (no existe correlación entre ruido y PM2.5).

Tabla 20

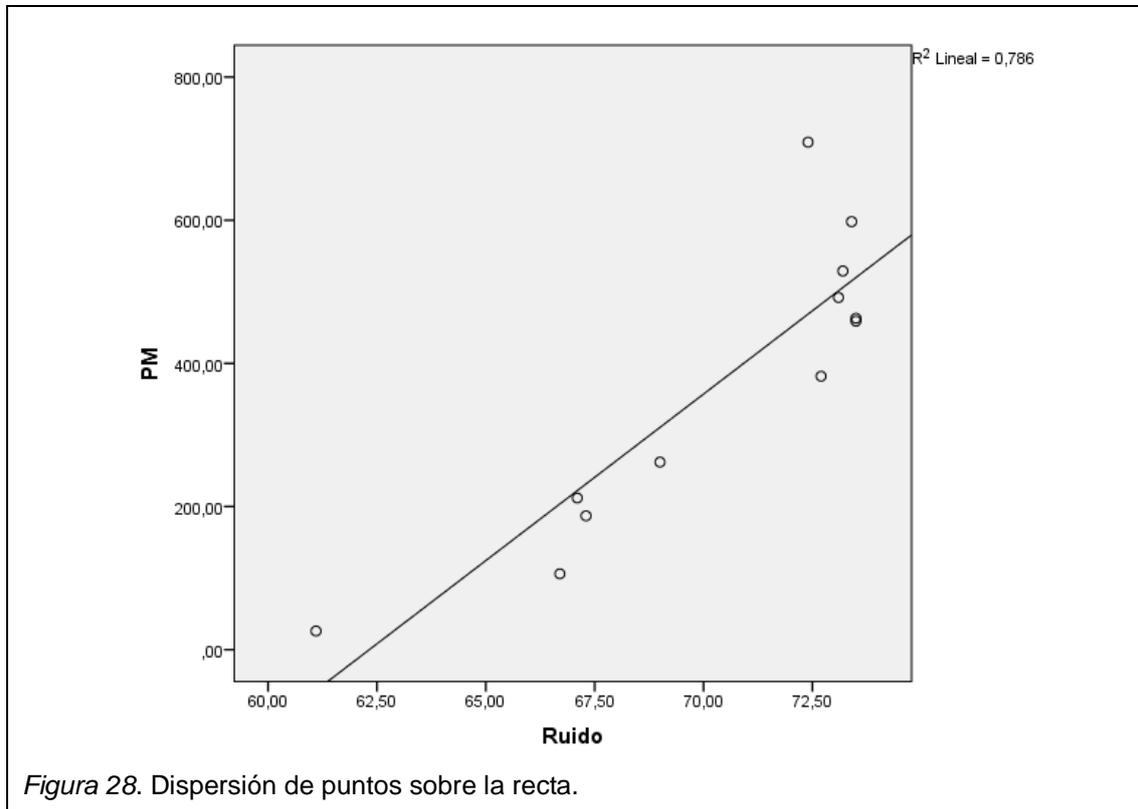
Correlación de Pearson y significancia estadística del 25% de datos vespertinos.

		Ruido	PM
Ruido	Correlación de Pearson	1	,887**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	12	12
PM	Correlación de Pearson	,887**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	12	12

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

En la figura 28 se muestra el gráfico de dispersión de puntos, como se observa existe una tendencia sobre la recta, del 25% de las mediciones del periodo vespertino. El resultado es una pendiente positiva con un coeficiente de

determinación de $R^2 = 0,786$, lo que permite calcular la varianza de la variable dependiente (PM2.5) en un 78%.



A continuación, se muestra la ecuación de la recta que será usada para el modelo de regresión lineal.

$$Y = a + bX$$

Ecuación (14)

Donde:

- a: Constante de la ecuación.
- b: Valor de la pendiente de la recta.
- X: Variable de ruido.

La tabla 21 muestra de coeficientes de regresión con un intervalo de confianza del 95%.

Tabla 21

Coefficientes del modelo de regresión lineal.

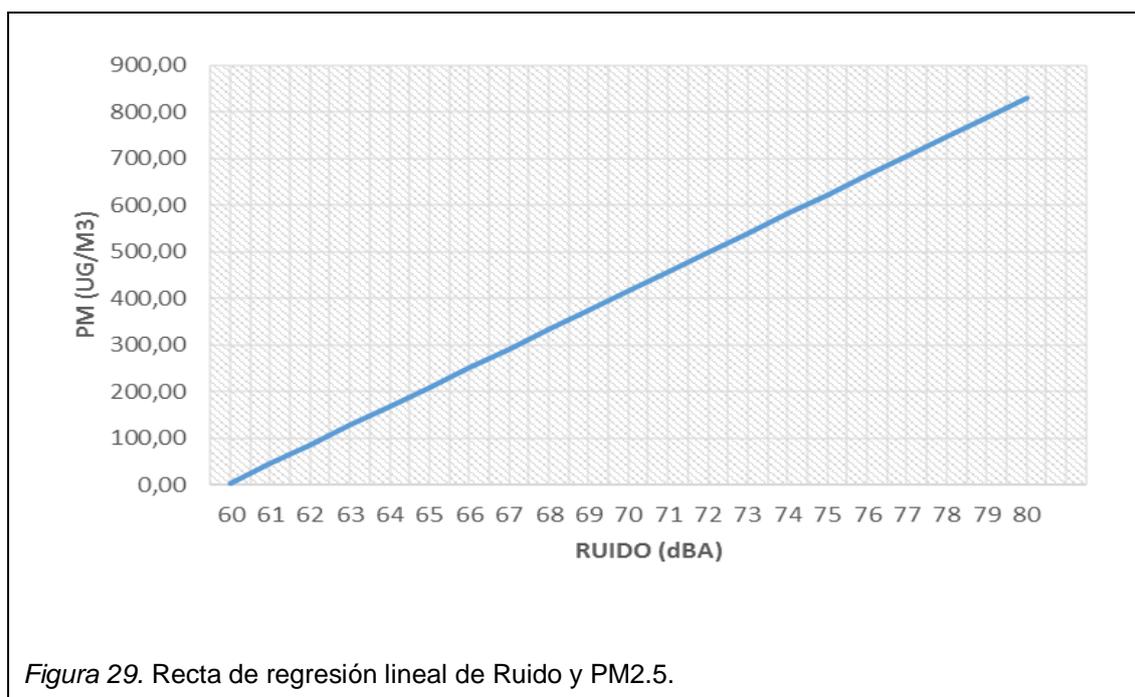
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Error estándar	Beta		
1	(Constante)	-2477,614	510,393		-4,854	,000
	Ruido	41,340	7,421	,804	5,571	,000

a. Variable dependiente: PM

La ecuación de regresión está conformada por: $a = -2477,614$ $b = 41,340$

$$Y = -2477,614 + 41,340 X \quad \text{Ecuación (15)}$$

En la figura 29 se muestra la recta de regresión de ruido y PM2.5 a partir de la ecuación de la 15. Los niveles de ruido se tomaron de los resultados del modelo predictivo RLS-90 figura 30.



Los niveles de ruido simulados con el modelo RLS – 90 mantienen un rango desde los 30 dBA hasta los 80 dBA, se tomó una base 60 dBA debido a que los

resultados de la ecuación de regresión eran negativos, lo que indicaría ausencia de material particulado con niveles de ruido inferiores a 60 dBA.

La figura 30 muestra el resultado del modelamiento del mapa de ruido de la Autopista General Rumiñahui con valores desde 30 a 80 dBA en intervalos de 5 dB. Estos resultados están acompañados por una paleta de colores los cuales ayudan a identificar los valores de ruido en el área.

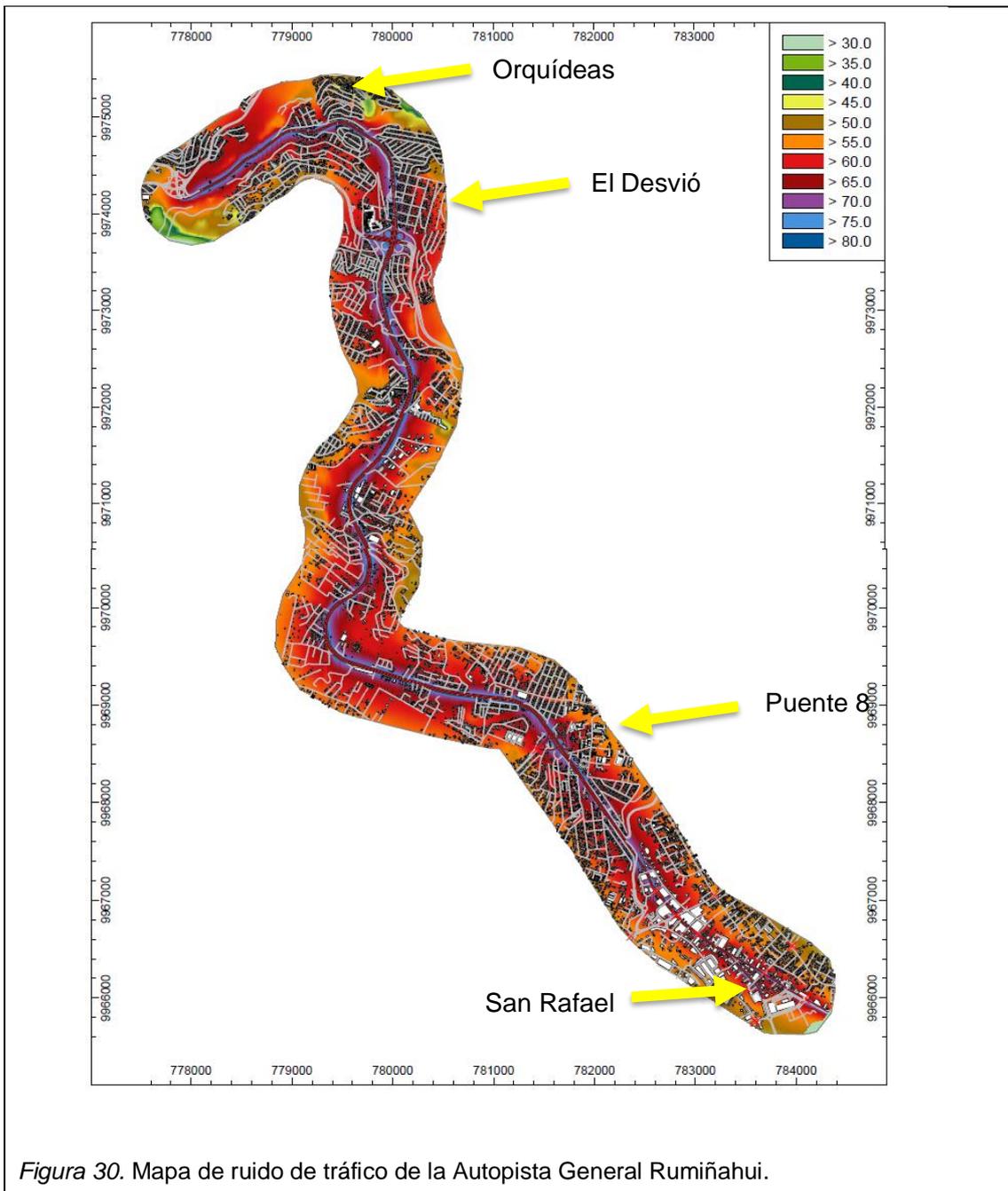


Figura 30. Mapa de ruido de tráfico de la Autopista General Rumiñahui.

4.6 Análisis de Mapa de Ruido

De acuerdo al análisis de ruido en los apartados anteriores se realizó un solo mapa de ruido de tráfico de la autopista, ya que los niveles diurnos y vespertinos no muestran una variación representativa. Por lo cual se concluyó que el comportamiento de emisión de ruido de la fuente lineal es similar tanto en el horario de la mañana (07h00 a 10h00) como en la tarde (15h00 a 18h00).

4.6.1 Validación del modelamiento

El proceso de validación del mapa de ruido de tráfico de la Autopista General Rumiñahui empieza por colocar los receptores de ruido en el modelo digital del terreno de acuerdo a las coordenadas X y Y, como se muestra en la tabla 17. Además, se identifican los puntos de medición y niveles de ruido medidos y simulados, a continuación, se muestran los resultados de validación.

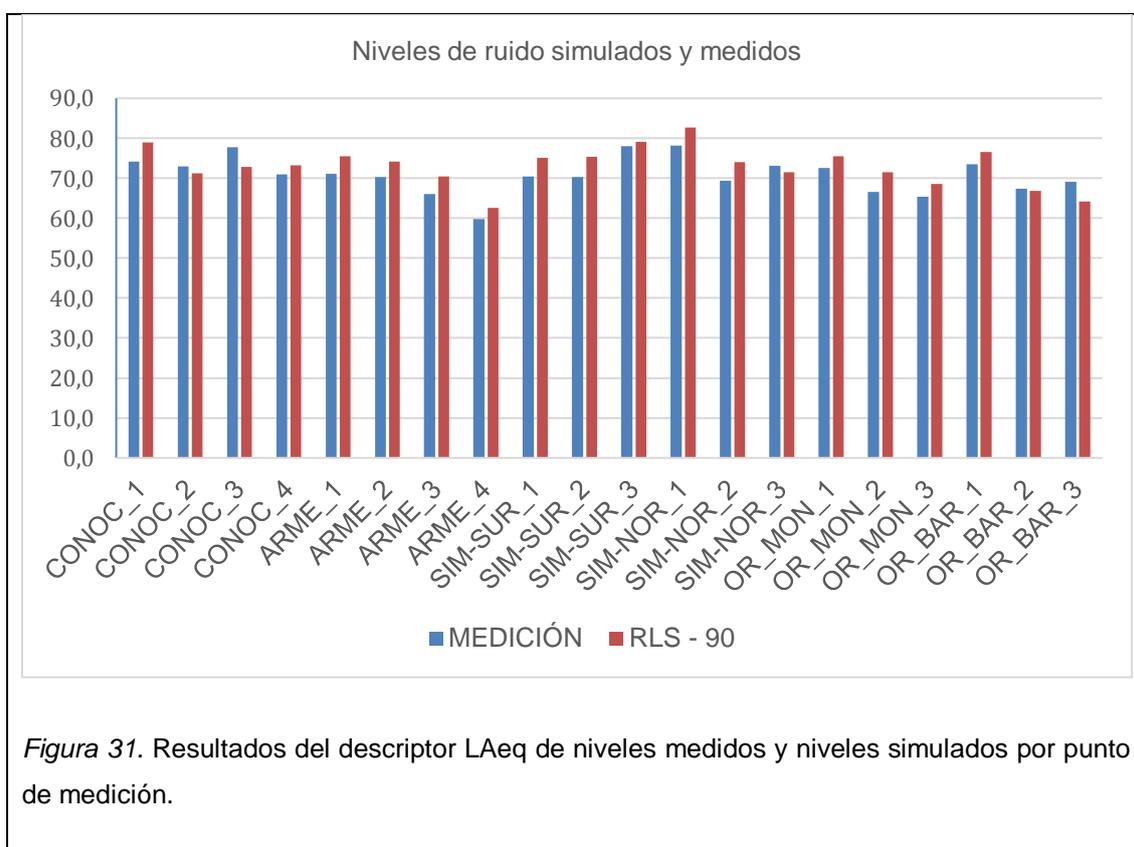
Tabla 23

Resultados de validación.

PUNTOS	X	Y	MEDICIÓN	CADNA	DIF
CONOC_1	781552	9968693	74,2	79	4,80
CONOC_2	781515	9968631	73,0	71,2	1,82
CONOC_3	781484	9968596	77,8	72,9	4,87
CONOC_4	781453	9968551	71,0	73,3	2,35
ARME_1	781682	9968611	71,1	75,5	4,36
ARME_2	781704	9968667	70,2	74,2	3,96
ARME_3	781721	9968707	66,0	70,4	4,39
ARME_4	781741	9968754	59,7	62,6	2,89
SIM-SUR_1	779980	9973799	70,4	75,1	4,72
SIM-SUR_2	779942	9973759	70,4	75,3	4,95
SIM-SUR_3	779885	9973756	78,1	79,1	1,05
SIM-NOR_1	780031	9973781	78,2	82,7	4,48
SIM-NOR_2	780063	9973784	69,4	74	4,62
SIM-NOR_3	780099	9973779	73,1	71,5	1,56
OR_MON_1	779351	9974885	72,6	75,5	2,90
OR_MON_2	779294	9974842	66,6	71,5	4,87
OR_MON_3	779342	9974848	65,3	68,6	3,26
OR_BAR_1	779366	9974939	73,5	76,6	3,14
OR_BAR_2	779371	9974981	67,4	66,9	0,52
OR_BAR_3	779380	9975036	69,1	64,2	4,88

Para que se pueda dar una correcta validación del mapa de ruido, se debe cumplir con el siguiente criterio, la diferencia absoluta entre los niveles de ruido simulados y medidos no debe superar los 5 dBA. La validación se realizó en los 20 puntos de medición de los cuales el 100% cumple con este criterio.

También, se puede aplicar un margen de 3 dBA; el 65% de los resultados sobrepasan este margen lo que representa 13 puntos de medición y el 35% está por debajo de los 3 dB que son 7 puntos. Lo que se puede decir es que más de la mitad de los resultados de validación están cerca del límite de los 5 dB, dando como resultado un modelo predictivo de ruido con niveles más altos que los niveles de ruido medidos in-situ, como se muestra en la figura 31.



4.6.2 Límites Máximos de Ruido Ambiental

Es importante acotar que la República del Ecuador no posee un cuerpo normativo de ruido ambiental por lo cual se hará uso de la normativa de ruido

ambiental colombiana (Resolución 0627 del 7 de abril de 2006). A partir de los valores límite de ruido ambiental de la Resolución 0627 se identificará el número de edificaciones que son afectadas por los niveles de ruido emitidos por la Autopista General Rumiñahui.

Tabla 24

Estándares máximos permisibles de ruido ambiental en dBA.

Sector	Subsector	Estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental en dB(A)	
		Día	Noche
Sector A. Tranquilidad y Silencio	Hospitales, bibliotecas, guarderías, sanatorios, hogares geriátricos.	55	45
Sector B. Tranquilidad y Ruido Moderado	Zonas residenciales o exclusivamente destinadas para desarrollo habitacional, hotelería y hospedajes.	65	50
	Universidades, colegios, escuelas, centros de estudio e investigación		
	Parques en zonas urbanas diferentes a los parques mecánicos al aire libre		
Sector C. Ruido Intermedio Restringido	Zonas con usos permitidos industriales, como industrias en general, zonas portuarias, parques industriales, zonas francas.	75	70
	Zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, tabernas, discotecas, bingos, casinos.	70	55
	Zonas con usos permitidos de oficinas.	65	50
	Zonas con usos institucionales.		
	Zonas con otros usos relacionados, como parques mecánicos al aire libre, áreas destinadas a espectáculos públicos al aire libre, vías troncales, autopistas, vías arterias, vías principales.	80	70
Sector D. Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado	Residencial suburbana.	55	45
	Rural habitada destinada a explotación agropecuaria.		
	Zonas de Recreación y descanso, como parques naturales y reservas naturales.		

Tomado de (Ministerio de ambiente, 2006).

De acuerdo al modelo digital de terreno se registró un total de 17.397 edificaciones entre viviendas, edificios, escuelas y centros de salud dentro de un radio de 500 m. Como se puede ver la tabla 24 está dividida por sectores de los cuales son: sector A “Tranquilidad y Silencio”, sector B “Tranquilidad y Ruido

Moderado”, sector C “Ruido Intermedio Restringido” y sector D “Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado”, de los cuales serán tomados en cuenta para el análisis los sectores A, B y C. Dichos sectores poseen subsectores de cuales se pueden nombrar los siguientes: residencial, hospitalario, biblioteca, guardería, universitario, colegio, escuela, centros comerciales y centros recreativos.

La normativa colombiana establece el periodo diurno y nocturno en los siguientes horarios:

Tabla 25

Horarios diurnos y nocturnos – normativa colombiana.

DIURNO	NOCTURNO
De las 07h01 a 21h00	De las 21h01 a 7h00

El mapa de la Autopista General Rumiñahui se lo puede analizar únicamente en el horario diurno, ya que los periodos de medición del presente estudio fueron entre las 07h00 y 18h00.

Dentro del radio de estudio de la Autopista General Rumiñahui se lograron identificar las siguientes instituciones educativas:

- Escuela Lucila Santos
- UE de las Américas
- Unidad Educativa “Giovanni Antonio Farina”
- Liceo Naval
- Universidad Metropolitana del Ecuador
- Unidad Educativa San Rafael
- Tesoros de Vida
- Unidad Educativa Leónidas Proaño
- Unidad Educativa Saint Dominic School
- Colegio Adventista Gedeón
- Fundación Henry Davis

Hospitales

- Hospital Psiquiátrico Julio Endara
- Centro Médico Pablo Muñoz Vega
- Clínica San Francisco

Centros comerciales

- San Luis Shopping
- Centro Comercial San Martín
- C.C Plaza Isabela
- C.C Plaza del Valle
- Amelia Zapatos y Complementos UIO

Hotelería y hospedaje

- Motel Luxor
- Oasis
- Manrique Palacios Julio Vicente
- Hostería el Perro Vago
- Cascada Spa Ecuador
- Hostal del Valle Sangolquí
- Hostería Quinta Paraíso

Parques

- Parque Cusungo
- Canchas Liga Barrial Jardín del Valle
- Park
- Club Deportivo Los Arupos
- Parque de San Rafael Eduardo Kingman

De las 17 mil edificaciones, unidades educativas, hospitales, parques, hoteles y centros comerciales representar apenas el 0,17%, el resto es considerado como subsectores de zonas residenciales. A continuación, la tabla 26 muestra los

valores límite de ruido ambiental de acuerdo a cada subsector identificado dentro del área de estudio.

Tabla 26

Límites de ruido ambiental de los subsectores identificados en la Autopista General Rumiñahui a partir de los lineamientos establecidos por la Resolución 0627 del 7 de abril de 2006 – Normativa Colombiana.

SUBSECTOR	LAeq DÍA
Residencial	65
Educativo	65
Hospitalario	55
Hotelero	65
Comercial	70

De acuerdo al análisis de campo del terreno existen subsectores residenciales a menos de 10 m de la autopista con niveles de ruido entre 70 a 80 dBA de acuerdo al mapa. Como muestra la tabla 26 estos subsectores cercanos a la vía no están dentro de los límites permisibles de ruido ambiental. Además, a lo largo de la vía no se evidencia algún tipo de barrera acústica, la única protección es el propio cerramiento de cada vivienda.

El subsector más sensible frente al ruido es el hospitalario, debido a que es un subsector considerado de tranquilidad y silencio. En la zona de estudio solo se identificaron 3 entidades del área de la salud: Hospital Psiquiátrico Julio Endara, Centro Médico Pablo Muñoz Vega y Clínica San Francisco. A continuación, se muestra los niveles de ruido emitidos de la autopista hacia estos subsectores.

Tabla 27

Niveles de ruido en subsectores hospitalarios.

LUGAR	LAeq
Hospital Psiquiátrico Julio Endara	60
Centro Médico Pablo Muñoz Vega	65
Clínica San Francisco	60

Como muestra la tabla 26 los niveles de ruido en estos subsectores no deben superar los 55 dBA y como muestra la tabla 27 todos los niveles de ruido sobrepasan los límites establecidos. Además, el análisis abarca solo a la autopista como fuente de ruido, sabiendo que existen calles aledañas a estos lugares con flujos de tráfico considerables, como es el caso de la clínica San Francisco que se encuentra en el sector de El Triángulo – San Rafael.

Finalmente, se encuentra otro subsector vulnerable como es el de las unidades educativas, en la figura 32 se muestran los niveles de ruido a los cuales están expuestas las unidades educativas.

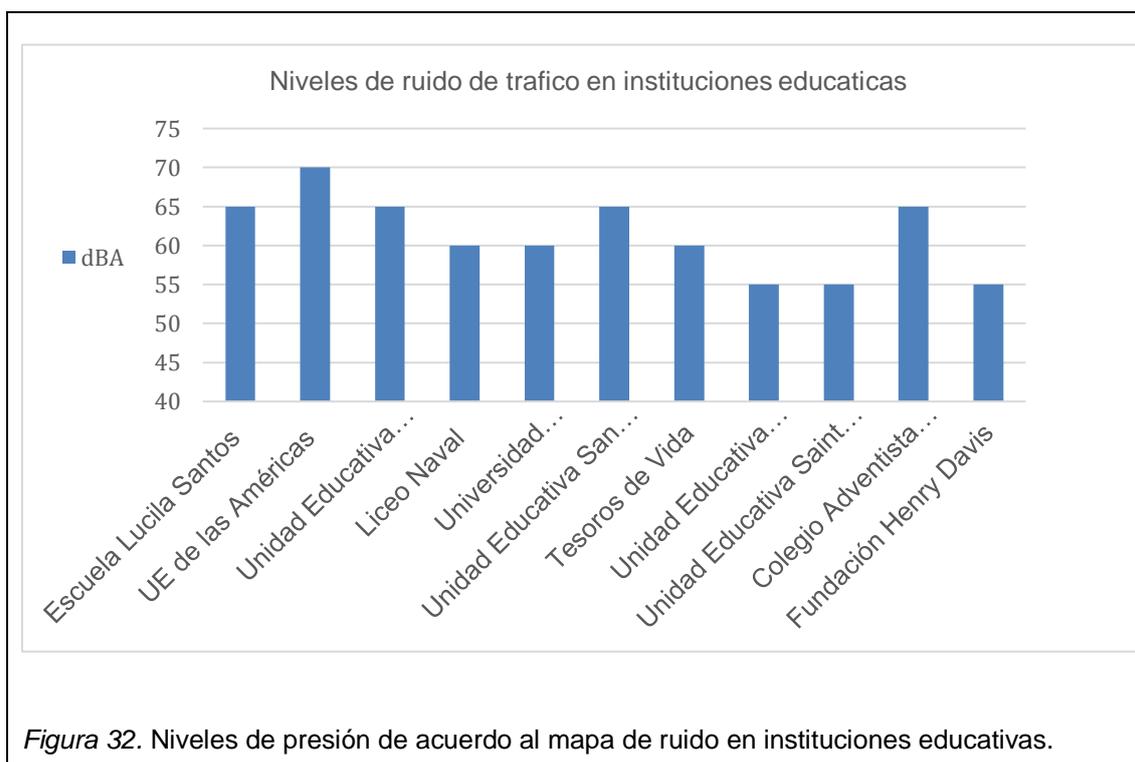


Figura 32. Niveles de presión de acuerdo al mapa de ruido en instituciones educativas.

Como se puede observar la unidad UE de las Américas está por encima de los 65 dBA que establece la norma, esto se debe a que la unidad se encuentra localizada a pocos metros de la vía. Se puede intuir que estos niveles de ruido sean mucho más altos al estar tan cerca de la vía, por lo cual sería imprescindible realizar un estudio de ruido a profundidad en dicha unidad educativa.

Por otro lado, el resto de unidades se encuentran justo y por debajo del valor límite de ruido. Para finalizar, los niveles de ruido ambiental son más peligrosos en el subsector residencial cercano a la vía. Debido a que la fuente de ruido puede llegar a emitir niveles cercanos a los 80 dBA y como se pudo observar en el análisis de campo del terrero no existen barreras acústicas en los límites de la vía que protejan este subsector.

4.7 Discusión de resultados

Los resultados de la tabla 18 y 20 muestran que existe una correlación fuerte entre los niveles de ruido y PM2.5 de la Autopista General Rumiñahui. Debido a que las condiciones atmosféricas muestran una mejor estabilidad en el horario vespertino de 15h00 a 18h00, lo cual minimiza la interferencia de factores ambientales en la dispersión del material particulado.

Los resultados de este estudio se pueden comparar con los de Shu y otros (2014, p. 135) el cual arroja los siguientes resultados.

Tabla 28

Resultados del estudio

Pearson correlation coefficients between LeqA, UFP, and PM_{2.5}.

Site	Street	Sound wall	Wind direction	Pearson correlation coefficient ^a		
				LeqA – UFP	UFP – PM _{2.5}	LeqA – PM _{2.5}
405	Constitution Avenue	No	Upwind	0.261 (<i>p</i> = 0.267)	0.127 (<i>p</i> = 0.650)	-0.361 (<i>p</i> = 0.817)
		No	Downwind	0.514 (<i>p</i> = 0.019)	0.722 (<i>p</i> = <0.01)	-0.409 (<i>p</i> = 0.873)
710	Gotham Street	Yes	Downwind	0.605 (<i>p</i> < 0.01)	0.391 (<i>p</i> = 0.032)	-0.047 (<i>p</i> = 0.195)
710	Quinn Street	Yes	Downwind	0.515 (<i>p</i> < 0.01)	0.662 (<i>p</i> < 0.01)	0.124 (<i>p</i> = 0.513)
710	Southern Avenue	No	Downwind	0.359 (<i>p</i> = 0.09)	-0.047 (<i>p</i> = 0.148)	-0.238 (<i>p</i> = 0.659)

^a Bold font indicates statistically significant results (*p* < 0.05).

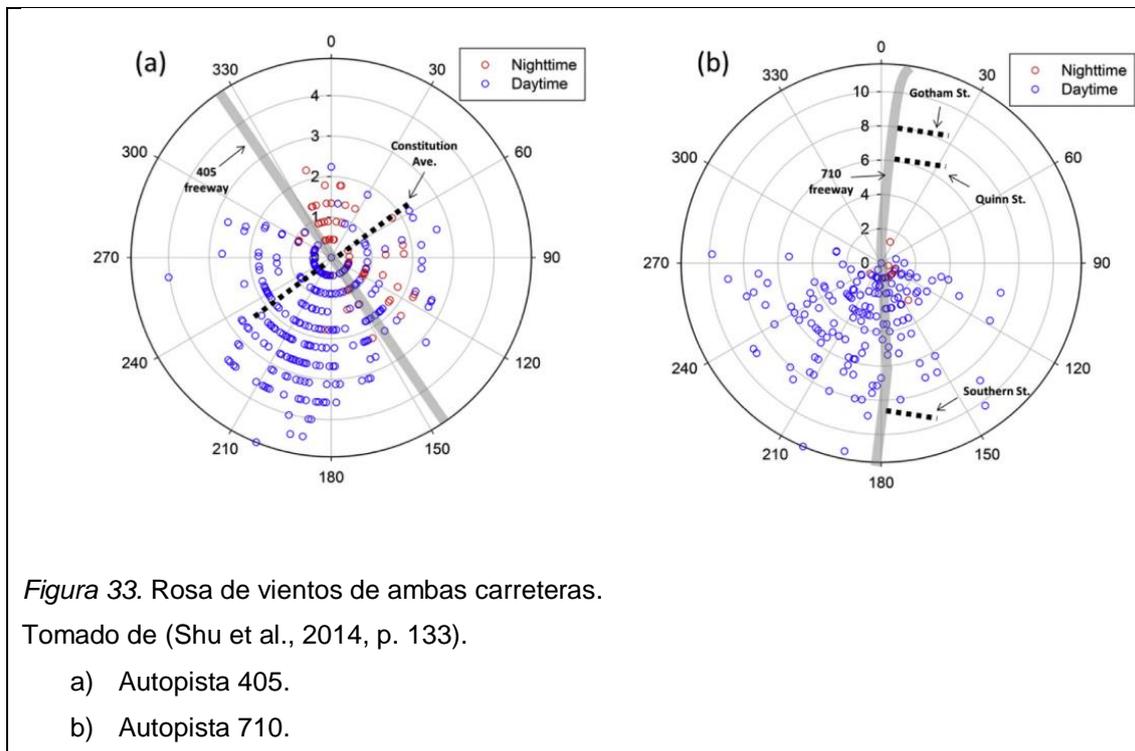
Tomado de (Shu et al., 2014, p. 135).

El estudio realizado en 2014 efectuó la correlación de Pearson entre niveles de ruido de tráfico, partículas finas (UFP) y PM_{2.5}, de dos autopistas en California – Estados Unidos. De igual manera procedió a alejar el receptor de la fuente con intervalos de 15, 45, 75, 105, 165 y 285 m.

Los pares LeqA-UFP, UFP-PM_{2.5} muestran coeficientes de correlación entre 0,33 y 0,72 con significancia estadística menor a 0,05, lo cual muestra una clara correlación entre dichos contaminantes. El par LeqA-PM_{2.5} muestra valores de correlación cercanos a cero con una significancia estadística mayor a 0,05, indicando que no existe una correlación entre nivel de ruido y PM_{2.5}

Este resultado se puede deber a las altas velocidades de viento que se registraron durante las mediciones, como lo muestra la rosa de vientos en la figura 33. En los apartados anteriores se explicó las consecuencias de medir ruido y PM_{2.5} bajo estas condiciones. Es decir, a velocidad altas de viento menor concentración de material particulado como también los rayos de incidencia sonora se curvarán en velocidades mayores a 5m/s. A continuación, en la figura

33 se muestra la rosa de vientos de las autopistas 405 y 710 California – Estados Unidos.



Como se puede observar la dirección del viento en su mayoría proviene del S, SE y SW en ambos casos. También, se registran velocidades de viento superiores a los 2m/s, en la autopista 405 los vientos llegan hasta los 5 m/s y en la autopista 710 a 10 m/s. Lo cual hace contraproducente realizar mediciones tanto de ruido y material particulado en la 710. Como se indicó en los apartados anteriores velocidades altas de viento causan que las masas de aire se desplacen, lo cual hace que los rayos incidentes sonoros se curven. Además, en el caso de material particulado se sabe que es susceptible a turbulencias mecánicas como térmicas.

Los resultados presentados en la tabla 18 y 20 de este estudio de correlación de ruido de tráfico y PM_{2.5} muestran una clara mejoría en el coeficiente de correlación de la Autopista General Rumiñahui. Esto se debe a que las

mediciones se realizaron en velocidades bajas de viento y factores ambientales no extremos a diferencia de Shu y otros (2014, p. 133).

De acuerdo a Fuentes (2016) las turbulencias mecánicas causan inestabilidad en el fenómeno de dispersión del material particulado. Lo cual puede empeorar si existen accidentes geográficos pronunciados, causando estancamientos de material particulado en ciertas áreas de la zona de estudio.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Considerando que la Autopista General Rumiñahui es una de las obras de mayor relevancia en el cantón Rumiñahui, también se puede decir que es un foco de contaminación atmosférica como se ha podido corroborar en el presente estudio. Al ser una fuente lineal de emisiones de ruido y material particulado, anualmente circulan en ella millones de vehículos tanto en el sentido Quito – Valle – Quito. Además, una parte fundamental del proyecto fue usar la red de monitoreo a tiempo real de la Secretaria del Ambiente de Quito para verificar la situación previa de contaminación atmosférica del área de estudio. Permitiendo, así, identificar los horarios de mayor emisión de material particulado y los niveles de radiación solar en los tres días de medición.

A partir del análisis de los niveles de concentración de material particulado durante el primer trimestre del 2019 se identificaron los posibles horarios de medición. Los cuales se dividieron en horarios diurnos y vespertinos que son: 07h00 a 10h00 y 15h00 a 18h00. Posteriormente, esto dio paso a identificar las zonas con la menor cantidad de irregularidades geográficas, en lo posible planas, para evitar turbulencias mecánicas, evitando que el efecto de dispersión y propagación se vean afectados. Ya que la susceptibilidad del PM es alta a cambios térmicos y mecánicos, además, se pudo verificar la presencia de inversión térmica en las mediciones realizadas en la mañana. Dichas mediciones comparadas con el horario vespertino mantenían una clara diferencia de concentración debido a que el material particulado no se puede disipar hacia las capas más altas de la atmosfera, causando que regresen a la superficie.

Los resultados promedio de velocidad del viento y radiación solar identificaron la clase de estabilidad atmosférica en Clase B. Temperatura y humedad relativa del aire mostraron poca variabilidad en el horario vespertino, así se pudo identificar posibles turbulencias mecánicas y térmicas en los 20 puntos de medición.

Calcular el coeficiente de correlación de Pearson partió usando las 94 mediciones de ruido de tráfico y PM2.5 como lo muestra la tabla 17, dando como resultado que no existe una correlación entre estos 2 contaminantes. Posteriormente, a partir de los resultados del análisis de estabilidad atmosférica se pudo constatar que los niveles de concentración de PM2.5 diurnos se encuentran alterados por la presencia de la inversión térmica. Lo cual permitió sesgar los datos tanto en horarios 47 diurnos y 47 vespertinos, los resultados de correlación vespertina se muestran en la tabla 18, con un coeficiente de 0,30 y con una significancia estadística de 0,04. Por lo cual se puede concluir que si existe una correlación entre los niveles de ruido de tráfico y PM2.5 en horarios vespertinos, los cuales no están siendo influenciados por factores atmosféricos. En el anexo 2 se muestran los resultados de correlación de los horarios diurnos, los cuales muestran una clara interferencia del fenómeno atmosférico llamado inversión térmica. Esto permitiría concluir que en la mañana no se puede correlacionar los niveles de ruido de tráfico y PM2.5, sino con los factores ambientales entre las 07h00y 10h00.

Como se había indicado anteriormente los niveles de ruido debían satisfacer el criterio de divergencia geométrica y los niveles de concentración de material particulado la relación inversa con la velocidad del viento. De lo cual el 25% de las 47 mediciones de ruido de tráfico y PM2.5 del horario vespertino cumplían con este criterio. Al identificar estos valores el ajuste de correlación lineal fue más fuerte, lo cual arrojó una ecuación de regresión mucho más precisa. Dando como resultado un coeficiente de correlación de 0,88 y con una significancia estadística de 0,000, lo cual demuestra una correlación fuerte entre estos dos contaminantes atmosféricos. Al ser una muestra pequeña de datos el modelo de correlación lineal de Pearson no tendría problema, ya que la ley de probabilidad de Pearson es una t-Student y puede trabajar con los 12 datos que cumplen con estos criterios de propagación y dispersión.

También, se pudo identificar que a distancias superiores 75 m los niveles de concentración de PM_{2.5} muestran valores aleatorios, debido a que las condiciones de terreno y térmicas cambian abruptamente. Por lo cual valores superiores a 75 o 285 m como en el estudio de Shu y otros (2014, p. 132) no son factibles para encontrar el coeficiente de correlación.

A partir de estos resultados de correlación el modelamiento de regresión lineal mostró coeficientes con significancia estadística de 0,000 y con un error de más menos 500 ug/m³. Es necesario minimizar este error, aunque el modelo de regresión funcione, para ello es preciso que los puntos sobre la recta de dispersión se ajusten más sobre ella, permitiendo minimizar el error de cálculo.

Por último, el análisis del mapa de ruido de la Autopista General Rumiñahui mostró que es una fuente lineal con altos niveles de ruido en los primeros metros de emisión. Llegando a valores de entre 75 y 80 dBA afectado fuertemente a los subsectores residenciales cercanos a la vía, además, se pudo verificar la ausencia de sistemas acústicos contra el ruido a lo largo de la vía. Las unidades educativas también se ven afectadas por los niveles de ruido emitidos por la autopista, como es el caso de la unidad educativa UE de las Américas. De acuerdo al mapa de ruido dicha unidad recibe valores superiores a los 65 dBA y no cuenta con un sistema de protección acústico frente a ruido más que el cerramiento de la misma. El resto de unidades se encuentra al límite de lo que exige la normativa colombiana de ruido ambiental.

Por último, se pudo verificar que a pesar del problema de contaminación atmosférica que representa la Autopista General Rumiñahui no existe un control por parte del cuerpo normativo para determinar un radio mínimo de construcción respecto a la vía. Ya que durante el estudio de campo se identificaron conjuntos habitacionales, urbanizaciones, casas o negocios cercanos a la vía, sin ningún tipo de sistema de protección acústico, por ejemplo, barreras acústicas. Debido a que brindan protección frente al ruido de tráfico y material particulado como lo verifica Shu y otros (2014, p. 132), las vías que

presentan este tipo de protecciones reciben niveles bajos de ruido y de concentración de material particulado.

5.2 Recomendaciones

Tomando en cuenta que sólo el 25% de las mediciones vespertinas de ruido y material particulado muestran un decaimiento energético y de concentración mientras el receptor se aleja de la fuente. Se recomienda realizar una mayor cantidad mediciones en una distancia no mayor a 80 m entre las 15h00 y 18h00 horas. Lo cual permitiría elevar el porcentaje de mediciones usadas para el cálculo del coeficiente de correlación, ya que los niveles diurnos de concentración se vieron afectados por los factores atmosféricos en las horas de la de mañana.

Para un proceso continuo de análisis de contaminación atmosférica sería óptimo que se instalen estaciones de monitoreo a lo largo de la Autopista General Rumiñahui. Como se pudo verificar la autopista es una fuente lineal de contaminación de relevancia, ya que por ella circulan miles de vehículos diariamente y al año millones.

A partir del análisis del mapa de ruido el DMQ y el Municipio del cantón Rumiñahui puedan generar cuerpos normativos para proteger la calidad de vida de los ciudadanos que viven a pocos metros de la vía. Ya que esto ayudaría a levantar sistemas de protección frente al ruido y material particulado.

Finalmente, se recomienda realizar estudios médicos que permitan cuantificar el impacto que tienen de las emisiones de material particulado y ruido por parte de la Autopista General Rumiñahui en la salud humana.

REFERENCIAS

- Arrieta, A. (2016). Dispersión de material partiuclado (PM10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(Grupo inv. GIGA), 43–54.
- Ayuntamiento de Bizkaia. (2017). Guía Técnica para la Gestión del Ruido Ambiental en las administraciones locales en base al Decreto 213 / 2012 de contaminación acústica en la CAPV . Recuperado el 21 de mayo de 2019, de [http://www.bizkaia.eus/home2/archivos/DPTO9/Temas/Pdf/RUIDO/Guias técnicas 2015/Guia RUIDO AMBIENTAL_15_05_15.pdf?hash=c8fbaf4104a080c98e9c594dd587ca96&idioma=CA](http://www.bizkaia.eus/home2/archivos/DPTO9/Temas/Pdf/RUIDO/Guias_técnicas_2015/Guia_RUIDO_AMBIENTAL_15_05_15.pdf?hash=c8fbaf4104a080c98e9c594dd587ca96&idioma=CA)
- Ayuntamiento de Madrid. (2019). Inversión térmica. Recuperado el 20 de julio de 2019, de http://www.mambiente.munimadrid.es/opencms/opencms/calair/ContAtmosfera/Inversion_termica/index.html
- Campello-Vicente, H. (2014). *Adaptación del modelo de predicción de ruido de tráfico rodado nmpb-routes 2008 a la presencia de vehículos eléctricos*. Tesis Doctoral Escuela Politecnica Superior de Elche, 1 -142.
- Casas-García, O., Betancur-Vargas, C. M., & Montaña-Erazo, J. S. (2015). Revisión de la normatividad para el ruido acústico en Colombia y su aplicación. *Entramado*, 11(1), 264–286. <https://doi.org/10.18041/entramado.2015v11n1.21106>
- Chuquer- Solá, D., Ampudia-Vásquez, S., Puertas, C., Bustamante, L., Reina, C., & Ramírez, F. (2018). Contaminación del aire a filo de calle en Quito, caso estudio Guayaquil y Espejo. *Perfiles*, 2(20), 90–99.
- Cruz, C. (2015). *Implementación de un modelo de dispersión atmosférica y cálculo de dosis en la liberación de efluentes radiactivos en el centro*

nuclear. Tesis de Grado del Instituto Politécnico Nacional, 1-181.

Dirección de Transporte del Gobierno Municipal de Rumiñahui. (2019). Control y actualización de las operadoras de transporte en Rumiñahui. Recuperado el 16 de julio de 2019, de http://www.ruminahui.gob.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=169&Itemid=196&lang=es

El Comercio. (2012). El nuevo octanaje de la gasolina en el Ecuador. Recuperado el 18 de julio de 2019, de <https://especiales.elcomercio.com/2012/04/gasolina/>

El Comercio. (2015). Siete cosas que debe saber de las autopista General Rumiñahui. Recuperado el 26 de mayo de 2019, de <http://www.elcomercio.com/actualidad/autopista-general-ruminahui-quito.html>

El Comercio. (2018). La gasolina súper y el diésel tienen nuevos precios en Ecuador. Recuperado el 28 de mayo de 2019, de <https://www.elcomercio.com/actualidad/super-diesel-nuevos-precios-gasolina.html>

El Comercio. (2019). Debate sobre la calidad de las gasolinas. Recuperado el 20 de junio de 2019, de <https://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/debate-calidad-de-gasolinas.html>

European Commission Working Group Assesment of Exposure to Noise. (2006). Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure. Recuperado el 28 de junio de 2019, de <http://sicaweb.cedex.es/docs/documentacion/Good-Practice-Guide-for-Strategic-Noise-Mapping.pdf>

Fritschi, L., Brown, A. L., Kim, R., Schwela, D., y Kephelopoulos, S. (2011). Burden of disease from environmental noise. *World Health Organization*,

(FSC), 1–106.

Gómez, V. T. (2013). Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la elaboración de planes de acción locales para mejorar la calidad del aire y estudios de impacto ambiental : estudio de caso. Recuperado el 23 de junio de 2019, de http://www.conama9.conama.org/conama9/download/files/CTs/2753_VTricio.pdf

Google Maps. (2019). Autopista General Rumiñahui. Recuperado el 24 de junio de 2019, de <https://www.google.com/maps/place/Autopista+Gral.+Rumiñahui/@-0.2971856,-78.4635019,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x91d597f500db5c4b:0x79b46ed371fecc35!8m2!3d-0.2971856!4d-78.4613132>

Karagulian, F., Belis, C. A., Dora, C. F. C., Prüss-Ustün, A. M., Bonjour, S., Adair-Rohani, H., & Amann, M. (2015). Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment*, *120*, 475–483. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087>

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2006). Resolución 0627 Norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental. Recuperado el 23 de junio de 2019, de <http://corponarino.gov.co/expedientes/juridica/2006resolucion627.pdf>

Ministerio del Ambiente. (2015). Registro Oficial N° 387, Anexo 4, referente a la Norma de Calidad del Aire Ambiente o Nivel de Inmisión. Recuperado el 23 de junio de 2019, de <https://www.registroficial.gob.ec/index.php/registro-oficial-web/publicaciones/registro-oficial/item/11169-registro-oficial-nº-387.html>

Morcillo, M. Á., González, J. A., Hernández, M. J., & Hidalgo, A. (2008). Influencia de la porosidad de los asfaltos en la generación del ruido de rodadura.

Universidade de Coimbra, (Sea Acústica), 1–12.

Murillo, D. M., Gil, J. C., Zapata, V., & Téllez, J. J. (2015). Assessment of the RLS 90 calculation method for predicting road traffic noise in Colombian conditions. *Revista Facultad de Ingeniería*, 175–187. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n75a17>

Olayinka, O. S. (2013). Effective Noise Control Measures and Sustainable Development in Nigeria. *World Journal of Environmental Engineering*, 1, 5–15. <https://doi.org/10.12691/wjee-1-1-2>

Prefectura de Pichincha. (2019). *Autopista General Rumiñahui: Tráfico Anual Por Categorías del 2009 al 2018*. Quito, 1.

Quartieri, J., Mastorakis, N. E., Iannone, G., Guarnaccia, C., D'ambrosio, S., Troisi, A., & Lenza, T. (2016). A Review of Traffic Noise Predictive Models. *International Journal of Mechanics*, 72–80.

Ramón, F. (2016). Efecto del viento en un PA. Recuperado el 21 de julio de 2019, de <http://www.equaphon-university.net/efecto-del-viento-en-un-pa/>

Secretaría de Ambiente. (2019). Red de Monitoreo Atmosférico. Recuperado el 2 de julio de 2019, de <http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/indice-de-calidad-del-aire-2>

Secretaria de Movilidad. (2015). Plan de Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial. Recuperado el 10 de junio de 2019, de <http://gobiernoabierto.quito.gob.ec/wp-content/uploads/documentos/interactivos/movilidad/files/assets/basic-html/page1.html>

Secretaria de Política Ambiental. (1997). Resolución 242/1997, Norma de Calidad de Aire Ambiente. Recuperado el 14 de mayo de 2019, de http://www.ecotempo.com.ar/descargas/Resolucion_242-97-Emissiones-gaseosas.pdf

- Shu, S., Yang, P., & Zhu, Y. (2014). Correlation of noise levels and particulate matter concentrations near two major freeways in Los Angeles, California. *Environmental Pollution*, 193, 130–137. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.025>
- Ubilla, C., & Yohannessen, K. (2017). Contaminación Atmosférica Efectos en la Salud Respiratoria en el Niño. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 28, 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.rmclc.2016.12.003>
- UNE Normalización Española. (2009). UNE-ISO 1996-2: Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Recuperado el 12 de mayo de 2019, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0043828>
- US - EPA. (2019). Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling. Recuperado el 12 de julio de 2019, de <https://www3.epa.gov/ttn/scram/aqmindex.htm>
- World Health Organization. (2016). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. *Report of World Health Organization*, 1–63. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)61766-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)61766-8)
- Worldwide Air Quality. (2019). Wind and Air Pollution Forecast in Quito. Recuperado el 19 de julio de 2019, de <http://aqicn.org/faq/2015-06-08/wind-and-air-pollution-forecast-in-quito/>
- Zambrano, C., & Chauvín, C. (2016). Línea de Tiempo, Rumiñahui 1938-2016. Recuperado el 10 de mayo de 2019, de http://www.ruminahui.gob.ec/images/d/2016/06/Linea_de_Tiempo.pdf
- Zannin, P. H. T., & Sant'Ana, D. Q. De. (2011). Noise mapping at different stages of a freeway redevelopment project - A case study in Brazil. *Applied Acoustics*, 72, 479–486. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.09.014>

ANEXOS

ANEXO 1

**Análisis del año 2019 de PM 2.5 (ug/m3); meses y horas de la estación los
Chillos – Secretaria del Ambiente**

Año	Mes	Hora	Promedio	Desviación estándar	Máximo	Mínimo
2019	Enero	0	15,11	14,80	74,18	1,09
		1	11,65	11,91	50,61	0,03
		2	10,66	5,82	22,91	2,19
		3	13,20	12,15	65,89	0,07
		4	11,24	6,10	20,30	2,70
		5	14,79	7,62	33,90	3,52
		6	18,44	7,40	34,95	7,50
		7	17,59	12,79	42,94	0,01
		8	11,65	7,89	27,99	0,04
		9	8,56	5,92	20,87	0,47
		10	8,60	6,73	26,36	0,00
		11	8,69	6,75	29,23	0,00
		12	9,85	5,32	20,47	2,76
		13	8,06	8,19	33,85	0,00
		14	11,01	8,97	35,77	0,94
		15	12,64	7,88	31,95	0,12
		16	12,74	8,12	35,81	1,45
		17	13,91	6,04	24,14	2,28
		18	15,37	5,70	31,75	6,06
		19	13,89	4,61	24,90	5,87
		20	14,58	6,53	39,08	4,24
		21	13,82	7,51	36,16	3,56
		22	11,95	7,50	32,56	1,90
	23	10,56	13,37	74,63	0,00	
	Febrero	0	9,38	7,63	30,58	0,40
		1	8,99	5,26	21,94	1,02
		2	8,43	5,75	24,52	0,82
		3	9,95	5,60	21,01	2,54
		4	11,55	7,83	32,80	1,72
		5	11,88	6,93	32,38	1,43
		6	17,61	10,81	58,69	6,49
		7	17,00	9,02	37,69	4,04
		8	12,76	8,99	31,95	0,42
		9	8,67	7,12	22,67	0,00
		10	10,23	7,03	23,25	0,00
11		12,81	5,33	25,39	3,19	
12	12,41	5,14	25,59	3,09		
13	13,08	5,44	22,67	1,38		
14	13,90	7,97	29,93	1,14		

		15	13,25	8,57	30,20	0,32
		16	14,87	10,26	39,76	0,23
		17	15,38	7,05	27,55	2,12
		18	17,67	6,78	31,24	6,59
		19	16,39	6,04	29,76	5,15
		20	12,65	7,05	35,50	0,09
		21	12,23	5,82	27,62	2,30
		22	9,24	4,91	20,24	0,35
		23	9,06	5,63	22,78	0,28
	Marzo	0	18,07	12,73	44,30	5,21
		1	18,46	5,11	26,47	12,12
		2	14,26	5,33	21,21	1,81
		3	11,97	7,90	24,31	2,15
		4	14,15	6,27	24,02	4,69
		5	15,74	7,32	24,52	6,22
		6	21,39	5,80	33,46	11,24
		7	21,21	11,78	43,53	10,43
		8	18,06	14,52	54,41	2,48
		9	11,58	11,26	37,74	0,58
		10	8,49	7,36	20,30	0,68
		11	10,45	6,75	23,91	1,79
		12	14,28	6,97	25,87	4,18
		13	10,28	5,71	19,62	3,21
		14	12,03	6,91	23,35	4,30
		15	17,96	14,37	56,55	6,56
		16	23,76	8,84	39,08	13,02
		17	21,04	9,35	35,19	5,60
		18	19,00	7,89	34,55	5,10
		19	20,49	3,54	25,45	14,92
		20	21,20	4,04	28,02	17,16
		21	17,83	7,47	34,40	10,28
		22	18,96	5,52	32,14	13,61
	23	15,55	7,56	31,31	8,24	

ANEXO 2

Resultados de correlación de niveles diurnos 07h00 a 10h00

		RUIDO DIA	PM DIA
RUIDO DIA	Correlación de Pearson	1	,038
	Sig. (bilateral)		,801
	N	47	47
PM DIA	Correlación de Pearson	,038	1
	Sig. (bilateral)	,801	
	N	47	47

