



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TEMA:**

**Contaminación ambiental generada en los túneles de  
Guayaquil (San Eduardo, Cerro del Carmen y Cerro Santa  
Ana)**

**AUTOR:**

**Vallejo Robalino, Daniel Eduardo**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
Ingeniero Civil**

**TUTOR:**

**Ing. von Buchwald de Janon Federico Guillermo PhD.**

**Guayaquil, Ecuador**

**9 de marzo del 2022**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Vallejo Robalino Daniel Eduardo**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

### **TUTOR**

f. \_\_\_\_\_  
**Ing. von Buchwald de Janon. Federico PhD.**

### **DIRECTORA DE LA CARRERA**

f. \_\_\_\_\_  
**Ing. Alcívar Bastidas, Stefany MSc.**

**Guayaquil, a los 9 días del mes de marzo del año 2022**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Vallejo Robalino Daniel Eduardo**

### **DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación: **Contaminación ambiental generada en los túneles de Guayaquil (San Eduardo, Cerro del Carmen y Cerro Santa Ana)**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, a los 9 días del mes de marzo del año 2022**

### **EL AUTOR**

f. \_\_\_\_\_  
**Vallejo Robalino Daniel Eduardo**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **AUTORIZACIÓN**

Yo, **Vallejo Robalino Daniel Eduardo**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Contaminación ambiental generada en los túneles de Guayaquil (San Eduardo, Cerro del Carmen y Cerro Santa Ana)**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 9 días del mes de marzo del año 2022**

**EL AUTOR**

f. \_\_\_\_\_  
**Vallejo Robalino Daniel Eduardo**

# Reporte Urkund



## Document Information

---

<b>Analyzed document</b>	TRABAJO DE TITULACIÓN - VALLEJO123.docx (D128908466)
<b>Submitted</b>	2022-02-26T05:29:00.0000000
<b>Submitted by</b>	
<b>Submitter email</b>	clara.glas@cu.ucsg.edu.ec
<b>Similarity</b>	2%
<b>Analysis address</b>	clara.glas.ucsg@analysis.orkund.com

## Sources included in the report

---

<b>SA</b>	<b>Universidad Católica de Santiago de Guayaquil / Trabajo de grado.pdf</b> Document Trabajo de grado.pdf (D8824984) Submitted by: claglas@hotmail.com Receiver: clara.glas.ucsg@analysis.orkund.com	 <b>8</b>
<b>SA</b>	<b>TESIS CARLOS LUIS CHONE.docx</b> Document TESIS CARLOS LUIS CHONE.docx (D16022331)	 <b>3</b>
<b>SA</b>	<b>luisvillavicencio.doc.docx</b> Document luisvillavicencio.doc.docx (D110988512)	 <b>3</b>

---

f. \_\_\_\_\_  
Ing. Federico von Buchwald de Janon. PhD.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero aprovechar este espacio para agradecer a todas las personas que de alguna forma me han apoyado a lo largo de estos años que pude ser estudiante de la facultad de Ingeniería, a mis compañeros y profesores con los cuales pude compartir criterios y experiencias que a su vez se pudo aprender de cada una de ellas y quiero agradecer también a todo el personal que trabaja en la facultad.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi familia, especialmente a mis padres Jaime Vallejo y Rebeca Robalino, por toda la paciencia entregada y porque son mi mejor ejemplo para siempre ser mejor persona, ellos forman una parte fundamental en mi desarrollo como profesional.

Agradezco al Ingeniero Federico von Buchwald por su guía durante todo el proceso del trabajo de titulación.

## **DEDICATORIA**

Le dedico este trabajo a mi mamá Rebeca Robalino, ya que ella es la persona que considero mi motor de vida, me enseñó a ser una persona luchadora por lo que quiere, siempre está para mí y me da los mejores consejos.

Dedico mi trabajo de titulación a mi papá Jaime Vallejo, que durante toda mi vida y mi carrera me muestra su apoyo incondicional, siempre trato de absorber sus conocimientos de Ingeniería Civil y es una fuente de aprendizaje y valores fundamentales para mi desarrollo como persona y profesional.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Federico Guillermo von Buchwald de Janon. PhD.**  
TUTOR

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Stefany Alcívar Bastidas. MSc**  
DECANO O DIRECTOR DE CARRERA

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Nancy Varela Terreros. Msc**  
COORDINADOR DEL ÁREA O DOCENTE DE LA CARRERA

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Alexandra Camacho Monar. PhD.**  
OPONENTE



# ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I: GENERALIDADES .....	3
1.1 Antecedentes .....	3
1.2 Planteamiento del problema.....	4
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo general .....	4
1.3.2 Objetivos específicos .....	4
1.4 Justificación del estudio .....	4
1.5 Alcance .....	5
1.6 Metodología .....	5
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	7
2.1 Túneles.....	7
2.1.1 Características del túnel del Cerro Santa Ana .....	7
2.1.2 Características del túnel del Cerro del Carmen.....	8
2.2.3 Características de los túneles del Cerro San Eduardo.....	9
2.2 Contaminación del aire ambiente.....	9
2.3 Monóxido de carbono o CO .....	10
2.3.1 Casos de muertes recientes por monóxido de carbono (CO) en Ecuador	12
2.4 El material particulado o partículas (PM) .....	13
2.4.1 Tamaño de las partículas.....	14
2.4.2 Material particulado PM 2.5 .....	14
2.4.3 Material Particulado de PM 10.....	15

2.5 Dióxido de nitrógeno o NO <sub>2</sub> .....	16
2.6 Dióxido de Azufre o SO <sub>2</sub> .....	18
2.7 Sensores para el monitoreo y control de emisiones vehiculares.....	19
2.8 Legislación ambiental ecuatoriana sobre gases contaminantes (CO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> ) y material particulado PM <sub>2.5</sub> Y PM <sub>10</sub> . .....	24
2.9 Circunstancias por efecto de combustible (Normas EURO).....	30
2.10 Capacidad y niveles de servicio .....	34
<b>CAPÍTULO 3: DESARROLLO .....</b>	<b>38</b>
3.1 Generalidades .....	38
3.2 Crecimiento vehicular y proyección.....	38
3.3 Determinación de volumen y capacidad de tránsito por túnel .....	39
3.4 Conteo de vehículos en el túnel del Cerro Santa Ana.....	40
3.4.1 Capacidad y nivel de servicio del túnel del Cerro Santa Ana a 5 y 10 años. 50	
3.5 Conteo de vehículos en el túnel del Cerro del Carmen .....	53
3.5.1 Capacidad y nivel de servicio del túnel del Cerro Del Carmen a 5 y 10 años. 59	
3.6 Conteo de vehículos en los túneles del Cerro San Eduardo.....	62
3.6.1 Capacidad y nivel de servicio del túnel del Cerro San Eduardo SN a 5 y 10 años. 67	
3.6.2 Capacidad y nivel de servicio del túnel del Cerro San Eduardo NS a 5 y 10 años. 76	
3.7 Monitoreo Ambiental.....	79
3.7.1 Equipos para el monitoreo ambiental .....	79

3.7.2 Bomba de succión en campo (PM2.5 Y PM10).....	79
3.7.3 GEM 5000 y bolsas Tedlar.....	81
3.8 Resultados del monitoreo ambiental.....	84
3.9 Reducción con Normativa EURO por cambio de combustible.....	95
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	99
CONCLUSIONES.....	101
RECOMENDACIONES.....	103
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Entrada al túnel del cerro Santa Ana. ....	7
Figura 2. Salida del túnel del cerro Del Carmen .....	8
Figura 3. Túneles del cerro San Eduardo en ambos sentidos.....	9
Figura 4. Comparación del tamaño de las partículas .....	14
Figura 5. Configuración de un sistema de un sistema de sensor remoto perpendicular a la vialidad. ....	21
Figura 6. Sistema ERP en Singapur. ....	23
Figura 7. Emisiones de CO2 en Singapur (1980-2013) .....	24
Figura 8. Niveles de monóxido de carbono (CO) en diferentes calles de Guayaquil clasificados por el tipo de transporte.....	26
Figura 9. Niveles de material particulado (PM10) en diferentes calles de Guayaquil clasificados por el tipo de transporte.....	27
Figura 10. Niveles de material particulado (PM10) en diferentes calles de Guayaquil clasificados por el tipo de transporte.....	28
Figura 11. Datos Metrovía correspondientes al año 2015 para centros comerciales. 29	
Figura 12. Datos Metrovía correspondientes al año 2017 para clínicas. ....	29
Figura 13. Datos Metrovía correspondientes al año 2016 para hoteles. ....	30
Figura 14. Reducción de contaminantes por Norma hasta el año 2014 en Europa... 33	
Figura 15. Representación gráfica de los niveles de servicio de una vía.....	37
Figura 16. Vista satelital y distribución del túnel del cerro Santa Ana.....	41
Figura 17. Fórmula para el factor de ajuste por presencia de vehículos pesados. ....	46
Figura 18. Gráfico representativo del volumen de vehículos por hora de túnel del Cerro Santa Ana conteo del día 1.....	47

Figura 19. Gráfico de curvas de velocidad y flujo vehicular para obtener la capacidad.....	48
Figura 20.Vista satelital y distribución del túnel del cerro Del Carmen.....	53
Figura 21.Gráfico de volumen de vehículos por hora del túnel cerro del Carmen día 1.....	57
Figura 22.Vista satelital y distribución de los túneles del cerro San Eduardo.....	62
Figura 23.Gráfico de volumen de vehículos por hora del túnel cerro San Eduardo sentido sur-norte día 2.....	66
Figura 24.Gráfico de volumen de vehículos por hora del túnel cerro San Eduardo sentido norte-sur día 2.....	75
Figura 25. Bomba de succión en campo. ....	80
Figura 26.Papel filtro para el depósito de las partículas. ....	81
Figura 27.Monitoreo de gases con GEM 5000 .....	82
Figura 28.Equipo del GEM 5000 .....	82
Figura 29. Bolsas herméticas Tedlar .....	83
Figura 30.Resultados de concentraciones de contaminantes en el Túnel San Eduardo SN y Cerro Del Carmen. ....	86
Figura 31. Resultados de concentraciones de contaminantes en el Túnel San Eduardo NS y Cerro Santa Ana. ....	87
Figura 32.Resultados de concentraciones de contaminantes en el Túnel San Eduardo NS y Cerro Santa Ana. ....	89
Figura 33. Gráfico de reducción de emisiones EURO en vehículos a gasolina.....	97
Figura 34. Gráfico de reducción de emisiones EURO en vehículos a gasolina.....	98

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Efectos del monóxido de carbono CO a diferentes concentraciones. ....	12
<b>Tabla 2.</b> Efectos del dióxido de nitrógeno NO <sub>2</sub> a diferentes concentraciones. ....	17
<b>Tabla 3.</b> Efectos del dióxido de azufre SO <sub>2</sub> a diferentes concentraciones. ....	19
<b>Tabla 4.</b> Concentración de contaminantes y criterios que definen los niveles de alerta, alarma y emergencia.....	25
<b>Tabla 5.</b> Límites de emisiones establecidos por cada norma EURO. ....	31
<b>Tabla 6.</b> Proyección vehicular realizada a los 5 y 10 años respectivamente.....	38
<b>Tabla 7.</b> Conteo de vehículos en la Av. 12 NE Malecón Simón Bolívar y que pasan por el túnel cerro Santa Ana.....	41
<b>Tabla 8.</b> Hora pico correspondiente al túnel del Cerro Santa Ana.....	42
<b>Tabla 9.</b> Datos geométricos para autopistas de varios carriles según HCM.....	43
<b>Tabla 10.</b> Factor de ajuste por ancho de carril .....	44
<b>Tabla 11.</b> Factor de ajuste por tipo de división. ....	44
<b>Tabla 12.</b> Factor de ajuste por densidad de puntos de acceso. ....	45
<b>Tabla 13.</b> Equivalencia de pasajero por vehículo pesado debido al tipo de terreno. ....	46
<b>Tabla 14.</b> Capacidad de vehículos según su velocidad de flujo libre.....	47
<b>Tabla 15.</b> Determinación de nivel de servicio con respecto a la densidad de vehículos. ....	49
<b>Tabla 16.</b> Proyección vehicular del túnel Santa Ana a 5 y 10 años respectivamente. ....	50
<b>Tabla 17.</b> Conteo de vehículos en la Av. 6 Boyacá y que pasan por el túnel cerro del Carmen, el miércoles 17 de noviembre de 2021, obteniendo la hora pico de 10H15 a 11H15 con un volumen de 3575 vehículos.....	54
<b>Tabla 18.</b> Hora pico correspondiente al túnel del Cerro del Carmen.....	55

<b>Tabla 19.</b> Proyección vehicular del túnel Cerro Del Carmen a 5 y 10 años respectivamente.....	59
<b>Tabla 20.</b> Conteo de vehículos desde la Av. Barcelona y que pasan por el túnel cerro San Eduardo sentido sur-norte el viernes 26 de noviembre de 2021, obteniendo la hora pico de 9H15 a 10H15 con un volumen de 2054 vehículos.....	63
<b>Tabla 21.</b> Hora pico correspondiente al túnel San Eduardo sentido sur-norte.....	64
<b>Tabla 22.</b> Proyección vehicular del túnel Cerro San Eduardo SN a 5 y 10 años respectivamente.....	68
<b>Tabla 23.</b> Conteo de vehículos desde la Av. Barcelona y que pasan por el túnel cerro San Eduardo sentido norte-sur el viernes 3 de diciembre de 2021, obteniendo la hora pico de 18H00 a 19H00 con un volumen de 2329 vehículos.....	71
<b>Tabla 24.</b> Hora pico correspondiente al túnel San Eduardo sentido norte-sur.....	73
<b>Tabla 25.</b> Proyección vehicular del túnel Cerro San Eduardo NS a 5 y 10 años respectivamente.....	77
<b>Tabla 26.</b> Promedio de las muestras en el túnel del Cerro Santa Ana.....	88
<b>Tabla 27.</b> Promedio de las muestras en el túnel del Cerro San Eduardo NS. ....	88
<b>Tabla 28.</b> Comparativa de emisiones en el túnel del Cerro Santa Ana con la Norma de Calidad de aire.....	90
<b>Tabla 29.</b> Comparativa de emisiones en el túnel del Cerro San Eduardo NS con la Norma de Calidad de aire.....	92
<b>Tabla 30.</b> Comparativa de emisiones en el túnel del Cerro Del Carmen con la Norma de Calidad de aire.....	93
<b>Tabla 31.</b> Comparativa de emisiones en el túnel del Cerro San Eduardo SN con la Norma de Calidad de aire.....	94
<b>Tabla 32.</b> Evolución de la tabla EURO para el control de la emisión de gases. ....	96
<b>Tabla 33.</b> Resumen de resultados hora pico, PHF, FFS y volumen de demanda.....	99

<b>Tabla 34.</b> Resumen de resultados capacidad y niveles de servicio. ....	99
<b>Tabla 35.</b> Resumen de resultados por cambio de combustibles EURO en vehículos a gasolina. ....	99
<b>Tabla 36.</b> Resumen de resultados por cambio de combustibles EURO en vehículos a gasolina. ....	100



## RESUMEN

El presente proyecto de investigación muestra el nivel de contaminación ambiental que se genera producto de las emisiones vehiculares que son contabilizadas durante la hora de mayor demanda en los túneles de Guayaquil como los del Cerro San Eduardo, Cerro del Carmen y Cerro Santa Ana. El objetivo principal y hacia dónde va orientado este trabajo es buscar formas de mitigación, reducción y control de estos contaminantes como pueden ser el uso de sensores remoto de detección de gases, el cambio en el uso de combustibles EURO o mejorando las condiciones prevalecientes de la vía para así aumentar su capacidad y que no se susciten problemas de congestión que a su vez genera problemas de contaminación. Se establecen comparaciones de las emisiones en el momento más crítico del día con los niveles de alerta, alarma y emergencia de la Norma de Calidad de Aire ambiente analizando su aplicabilidad. Estas medidas de mitigación y control están respaldadas con información detallada y cálculos reales de la situación actual de tráfico y con proyecciones a 5 y 10 años respectivamente.

**Palabras claves:** congestión vehicular, contaminantes, hora pico, túneles, capacidad de la vía, niveles de servicio, concentración de emisiones.

## **ABSTRACT**

This research project shows the level of environmental pollution generated as a result of vehicle emissions accounted during the peak hour in the tunnels of Guayaquil San Eduardo Hill, del Carmen Hill and Santa Ana Hill. The main objective is determine the ways to mitigate, reduce and control these pollutants, such as the use of gas detection sensors, the change in the use of fuels and improving the prevailing speed conditions of the road to increase its capacity and avoid congestion problems. Comparisons of the emissions at the most critical moment of the day with the alert, alarm and emergency levels of the Air Quality Standard were established, analyzing their applicability. These mitigation and control measures were supported with detailed information and real calculations of the current traffic situation and proyected for 5 and 10 years.

**Keywords:** traffic congestion, pollutants, peak hour, tunnels, road capacity, service levels, concentration of emissions.

## **INTRODUCCIÓN**

El propósito del presente proyecto es dar a conocer el nivel de contaminación ambiental que es generado por el parque automotor de Guayaquil, en el que se encuentran vehículos livianos, pesados y buses y al cual están expuestos los túneles del Cerro San Eduardo, Cerro Del Carmen y Cerro Santa Ana.

El proceso por el cual se realizará el estudio será primero mediante conteos volumétricos manuales para conocer la cantidad de vehículos en los túneles, luego de eso proceder a tabular los datos y obtener el volumen de capacidad y el nivel de servicio de cada uno de ellos.

Con estos datos se determinará qué tan peligroso puede llegar a ser la exposición en estos túneles con los niveles de emisión mostrados en los resultados de los monitoreos ambientales realizados dentro de las horas de mayor tráfico y buscar alternativas de solución que ayuden a mitigar de alguna forma estas emisiones como el incremento de las velocidades máximas para así mejorar la capacidad de los túneles reduciendo las emisiones o también una mejora en del sistema de medición mediante la posible instalación de nuevos sensores de contaminantes y el cambio en el uso de combustibles.

# CAPÍTULO I: GENERALIDADES

## 1.1 Antecedentes

La contaminación ambiental es uno de los problemas más importantes que afectan al planeta, hay escasos estudios sobre impacto ambiental urbano realizados en el país donde principalmente el tema se ha centrado en determinar las posibilidades de reducir y de alguna forma controlar la contaminación producida por las emisiones de los vehículos automotores.

Para entrar en contexto fue en los dos períodos municipales de 1992-1996 y 1996 al 2000 respectivamente del exalcalde de Guayaquil, León Febres-Cordero quien decidió contratar los estudios sobre la implementación de túneles como solución al tráfico de ingreso al centro de la ciudad. El financiamiento de los túneles Cerro Santa Ana y Cerro del Carmen se consiguió a través de un crédito que alcanza los 64 millones de dólares que se gestionó con la CAF (Corporación Andina de Fomento) y los construye el consorcio español-ecuatoriano OHL Semaica. Fue el exalcalde el Ab. Jaime Nebot Saadi quien inauguró los túneles del Cerro Santa Ana (que une el Malecón Simón Bolívar hacia la Av. Pedro Menéndez Gilbert) y Cerro del Carmen (desde Juan Javier Marcos Aguirre hacia la Av Boyaca) el 24 de Julio del 2002 y el 5 de mayo del 2003 respectivamente. (El Universo, 2003).

Los túneles del Cerro San Eduardo fueron inaugurados el 31 de octubre de 2008 por la presencia de autoridades de la Municipalidad de Guayaquil con un costo total de 73,6 millones de dólares y fue financiada por un crédito otorgado de USD 35 millones por parte de la CAF y la diferencia siendo aporte municipal. Estas infraestructuras constan de un enlace vial que conecta mediante dos túneles de 3,75 km, la avenida Carlos Julio Arosemena con la avenida Barcelona y de ahí parte hacia el oeste y suroeste de la ciudad, es una obra que permite el descongestionamiento vehicular del tránsito de esta parte de la urbe mejorando las condiciones del tráfico de la red vial, reduciendo costos operativos de usuarios, disminuyendo tiempos de recorrido y otros aspecto socioeconómicos y ambientales de la ciudad. (CAF, 2008).

La condición atmosférica en un túnel se puede convertir en crítica cuando se sature o haya un accidente, por lo que es imprescindible determinar los niveles de emisión y las medidas de mitigación con sensores de gases o por cambio de combustible.

## **1.2 Planteamiento del problema**

En la actualidad la contaminación ambiental generada por las emisiones de los vehículos de Guayaquil es un tema muy delicado ya que casi la totalidad de los automotores usan combustibles fósiles y de baja calidad lo que afecta al aire donde se producen gases y partículas contaminantes y para tratar de disminuir o eliminar estos componentes puede resultar muy difícil y costoso.

El parque automotor de Guayaquil representa gran parte de los vehículos del país por lo que es necesario conocer hasta qué punto pueden llegar a afectar estas emisiones a la salud de las personas dentro de una infraestructura vial con menos flujo de aire, como es el caso de los túneles de la ciudad.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Determinar el nivel de impacto ambiental que generan los vehículos en los túneles Cerro San Eduardo, Cerro Santa Ana y Cerro del Carmen.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Realizar conteos de vehículos durante un par de días en cada túnel y determinar las horas pico.
- Obtener la capacidad y niveles de servicio de cada túnel.
- Determinar las concentraciones de CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y material particulado PM 2,5 y PM 10.
- Analizar la reducción de emisiones si los combustibles migraran de EURO 2 a EURO 4 o EURO 5.

## **1.4 Justificación del estudio**

El Municipio de Guayaquil realiza monitoreos ambientales de manera periódica, ya que estas emisiones son perjudiciales para la salud de las personas por lo que deben de ser debidamente moderadas, aunque sobre gases contaminantes producidos por los

automotores en la ciudad hasta la fecha no se ha hecho un estudio del impacto de esta contaminación en las horas críticas dentro de los túneles.

## **1.5 Alcance**

La presente investigación tiene un alcance exploratorio, pues siguiendo los lineamientos planteados, este alcance se utiliza “cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, del cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes” (p. 79). (Hernández, Fernandez, & Baptista, 2010).

Los resultados obtenidos serán de interés y uso de estudio para los profesionales de la UCSG, consultores y técnicos en general vinculados a la temática y seguimiento del proyecto. Se pretende motivar de alguna forma a los futuros tesisistas que serán ingenieros y llegar al lector de forma que se animen a seguir estudiando para también concientizar sobre los impactos ambientales que los vehículos generan en gran magnitud. Este trabajo abarca estudios bibliográficos, detalle y procesamiento de datos y aplicación de herramientas analíticas.

## **1.6 Metodología**

Para el desarrollo de este análisis se realizarán conteos manuales de tráfico clasificándolos en livianos, pesados y buses durante dos días en cada túnel (San Eduardo, Cerro del Carmen y Santa Ana).

Este procedimiento es necesario para determinar las horas pico o de mayor tránsito de vehículos junto con la capacidad y nivel de servicio de la vía que atraviesa cada túnel y para esto se utilizará el manual de capacidad de carreteras (*HCM por sus siglas en inglés*) de la Junta de Investigación del Transporte de los Estados Unidos: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB): titulado HIGHWAY CAPACITY MANUAL (2016) 6 Ed. Cap. 12: BASIC FREEWAY AND MULTILANE HIGHWAYS SEGMENTS, el capítulo 12 en lo que refiere a carreteras de varios carriles como es en el caso de los túneles de Guayaquil.

Así como también monitoreos ambientales con equipos usados bajo métodos de la AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS (*EPA POR sus siglas en inglés*) que sirven para medir los gases contaminantes que son el monóxido de Carbono CO, dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub>, dióxido de azufre SO<sub>2</sub> y el material particulado PM<sub>2.5</sub> Y PM<sub>10</sub>, estas emisiones serán medidas en las horas

críticas de mayor tránsito de vehículos para así determinar las concentraciones puntuales máximas que se pueden generar y compararlas con la Norma de Calidad Ambiental de la Legislación Secundaria (2015) Libro VI “de la calidad ambiental” Anexo 4, en su Reglamento de la Ley de Gestión Ambiental para la prevención y control de la Contaminación Ambiental en lo que compete a niveles de alerta, alarma y emergencia.

## 2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Túneles

Los túneles son obras de infraestructura vial subterránea que permiten al usuario atravesar cerros o montañas, reduciendo las distancias de viaje y costos de operación significativamente. (Structuralia, 2021)

Desde los inicios del siglo XX se hablaba de construir túneles en Guayaquil para cruzar por debajo de los cerros con la finalidad de unir el centro de la ciudad con la parte de crecimiento futuro hacia el norte y disminuir los recorridos de los automotores. (El Universo, 2003)

#### 2.1.1 Características del túnel del Cerro Santa Ana

- La entrada a este túnel abarca desde la Av. Malecón Simón Bolívar en el centro de Guayaquil hasta Juan Javier Marcos y Aguirre norte de la ciudad.
- En la Av. del malecón no se encuentra mayor problema con semáforos que suelen ser reguladores de la capacidad del túnel.



**Figura 1.** Entrada al túnel del cerro Santa Ana.

Nota. Fotografía tomada por el autor.



### 2.1.2 Características del túnel del Cerro del Carmen

- La entrada del túnel abarca desde la Av. Juan Javier Marcos y Aguirre hasta la Av. Boyacá en el centro de Guayaquil.
- Este túnel puede presentar una complicación debido al semáforo que se encuentra en la calle Piedrahita (calle posterior al túnel) que cruza con Boyacá (calle donde desemboca el túnel), porque la cola que se genere cuando este esté en rojo podría ingresar al túnel incrementando la contaminación.

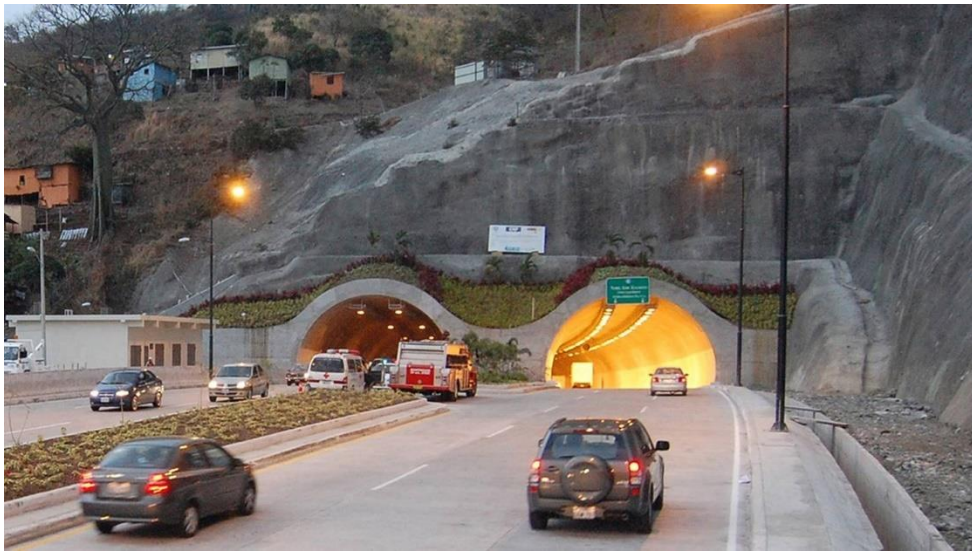


**Figura 2.** Salida del túnel del cerro Del Carmen

Nota. Fotografía tomada por el autor.

### 2.2.3 Características de los túneles del Cerro San Eduardo

- La entrada al túnel del Cerro San Eduardo en sentido sur-norte de la ciudad abarca desde la Av. Barcelona hasta la Vía Daule.
- Son los túneles más modernos de los ya mencionados anteriormente los cuales no se ven interferidos por semáforos antes o después de los mismos por lo que el flujo de vehículos se mantiene de una forma constante en el paso del túnel.



**Figura 3.** Túneles del cerro San Eduardo en ambos sentidos.

Nota. Tomado de la página web del diario Metro Ecuador  
<https://www.metroecuador.com.ec>

## 2.2 Contaminación del aire ambiente

La contaminación atmosférica en términos generales puede definirse como el cambio no deseado en las características físicas (sea color o temperatura), químicas (con la concentración de elementos o sustancias) o biológicas (presencia de microorganismos de la atmósfera), que causan o puede potencialmente causar daño sobre la salud y el bienestar de los seres humanos y otros seres vivos y/o que afectan el funcionamiento de los ecosistemas. (Pérez, 2008).

Se basa en la definición anterior el hecho de que existe un gran número de sustancias que son catalogadas como contaminantes del aire generadas por las emisiones de los

vehículos, principalmente por su efecto dañino sobre la salud de las personas, por lo que es conveniente recurrir a la clasificación de estas y definir las.

Los automóviles emiten contaminantes cuando se produce el proceso de combustión de gasolina por el tubo de escape, es importante saber que al cargar combustible la mayor parte de gases y partículas son emitidas durante el "arranque en frío" o durante los minutos que tarda el vehículo en calentarse. El aprovechar un mismo viaje para realizar más de una actividad contribuye a disminuir el nivel de emisiones, ya que reduce la cantidad de arranques en frío.

El aire que respiran los ecuatorianos está contaminado, lo dicen las mediciones y estudios realizados por el Ministerio de Ambiente del Ecuador y la Organización Mundial de la Salud (OMS), entre otras instituciones y universidades. Son varias las razones por las que el aire está contaminado y los mayores contaminantes son los vehículos automotores que utilizan gasolina o diésel.

Las personas que viven en territorios o centros urbanos suelen ser las más afectadas. En el Ecuador seis de cada diez personas vive en una ciudad. Por ende, se entiende que entre más vehículos y más tráfico hay, se genera más contaminación. (GK.CITY, 2019).

En cuanto a los contaminantes identificados en estas emisiones, a continuación, se presentan a detalle cada uno de ellos:

### **2.3 Monóxido de carbono o CO**

Al monóxido de carbono (CO) se lo conoce como "el asesino silencioso" debido a que es un gas inodoro, incoloro y a elevados niveles venenoso, este se origina tanto en procesos naturales como en actividades antropogénicas, como la combustión de gas natural, gas propano, gasolina y petróleo, también forma parte del humo que es producto de la combustión incompleta, este gas es muy estable y las cantidades que se emiten de CO anualmente son enormes siendo el contaminante atmosférico más abundante. (Pérez, 2008).

o, ya que a un tiempo de exposición corto llega a ser mortal para los humanos. Este gas disminuye la cantidad de oxígeno disponible para las células por lo que tiene una afinidad mucho más alta por la hemoglobina de la sangre, que es la molécula encargada del transporte de oxígeno desde los pulmones al resto del cuerpo. Al

respirar CO que entra en contacto con esta molécula se forma la carboxihemoglobina impidiendo el avance del oxígeno por lo que el organismo no obtiene la energía necesaria para sobrevivir. Por eso la intoxicación se produce cuando el gas entra al torrente sanguíneo y la prevención es de suma importancia pues los niveles de CO son aún más peligrosos en espacios confinados o con menos flujo de aire donde se concentran más las emisiones de los motores de combustión como es el caso de los túneles de Guayaquil. (USHUAIA, 2011)

Según el portal sanitario de la región de Murcia (Murcia Salud, 2010) : Para la protección de personas de efectos perjudiciales la carboxihemoglobina no debería excederse del 2,5%.

Las afectaciones a la salud dependen del grado de concentración del gas y el tiempo de exposición al mismo, a continuación, se muestra en la Tabla 1 los efectos del CO en diferentes cantidades:

**Tabla 1.** Efectos del monóxido de carbono CO a diferentes concentraciones.

Concentración de monóxido de carbono	Efecto
0-229 mg/m <sup>3</sup> (0-200 ppm)	Ligero dolor de cabeza en algunos casos
10 mg/m <sup>3</sup> (8,7 ppm)	No se excede el nivel carboxihemoglobina del 2.5 %, aun cuando un sujeto normal realice ejercicio ligero o moderado durante 8 horas
30 mg/m <sup>3</sup> (26 ppm)	No se excede el nivel carboxihemoglobina del 2.5 %, aun cuando un sujeto normal realice ejercicio ligero o moderado durante una hora
34,4 mg/m <sup>3</sup> (30 ppm)	La exposición diaria a esta concentración es equivalente a fumar 20 cigarrillos al día
40,1 mg/m <sup>3</sup> (35 ppm)	Las personas que tienen enfermedades cardíacas no deben exponerse a niveles superiores a esta concentración
60 mg/m <sup>3</sup> (52 ppm)	No se excede el nivel carboxihemoglobina del 2.5 %, aun cuando un sujeto normal realice ejercicio ligero o moderado durante 30 minutos
100 mg/m <sup>3</sup> (87 ppm)	No se excede el nivel carboxihemoglobina del 2.5 %, aun cuando un sujeto normal realice ejercicio ligero o moderado durante 15 minutos
115 mg/m <sup>3</sup> (100 ppm)	Se informó del primer indicio de angina en sujetos que hacían ejercicio con cardiopatía coronaria expuestos a esta concentración
229-458 mg/m <sup>3</sup> (200-400 ppm)	Después de 5-6 horas se puede observar un leve dolor de cabeza, náuseas, vértigo y síntomas mentales
458-802 mg/m <sup>3</sup> (400-700 ppm)	Después de 4-5 horas se puede observar un fuerte dolor de cabeza, incoordinación muscular, debilidad, vómitos y colapso
802-1260 mg/m <sup>3</sup> (700-1100 ppm)	Después de 3-5 horas se puede observar un fuerte dolor de cabeza, debilidad, vómitos y colapso
1260-1832 mg/m <sup>3</sup> (1100-1600 ppm)	Después de 1.5-3 horas se puede observar coma. (la respiración es aún bastante buena a no ser que el envenenamiento se haya prolongado)
1832-2290 mg/m <sup>3</sup> (1600-2000 ppm)	Después de 1-1.5 horas hay posibilidad de muerte
5726-11452 mg/m <sup>3</sup> (5000-10000 ppm)	Después de 2-15 minutos se puede producir la muerte

Nota. Obtenido de la página web del Portal Sanitario de la región de Murcia

(<http://www.murciasalud.es/>)

La Tabla 1 señala que las concentraciones que se muestran en un rango de 5726 a 11452 mg/m<sup>3</sup> respectivamente en una exposición de aproximadamente 15 minutos es probable que la persona pierda la vida. (Murcia Salud, 2010).

### 2.3.1 Casos de muertes recientes por monóxido de carbono (CO) en Ecuador

- El 14 de mayo de 2010, en Cuenca, cuatro personas, dos hombres y dos mujeres de 21 a 24 años fueron hallados sin vida en una habitación del motel El Edén, la autopsia mostró que murieron a causa de la inhalación de monóxido de carbono luego de que dejaron el vehículo encendido. (El Comercio, 2010)

- El 15 de noviembre de 2019, en Quito, dos oficiales de la policía nacional fueron hallados sin vida dentro de su patrullero producto de la inhalación accidental de monóxido de carbono mientras los occisos intentaban descansar en el vehículo. (El Comercio, 2019)
- El 17 de mayo de 2020, al norte de Quito, 5 personas murieron y otras 4 resultaron con afectaciones debido a la inhalación de altos niveles de monóxido de carbono provenientes de un calefón instalado en el interior de un baño de una vivienda. (DW, 2018).
- El 21 de agosto de 2020, en Guayaquil, dos oficiales de la policía de 36 y 24 años respectivamente fueron hallados inconscientes y sin signos vitales dentro de su patrullero debido a la inhalación de monóxido de carbono. (El Telégrafo, 2020)
- El 24 de agosto de 2021, en Quito, una madre de 44 años y su hijo de 7 murieron a causa de la acumulación de monóxido de carbono presente en las habitaciones donde se encontraban producto de un brasero con carbón encendido. (El Comercio, 2021)

## **2.4 El material particulado o partículas (PM)**

El material particulado o (MP O PM por *particulita matter*) se describe como una mezcla compleja de partículas que pueden ser sólidas o líquidas las cuales se encuentran suspendidas en el aire y que suelen variar tanto en tamaño como en su composición. Ciertos estudios epidemiológicos han reportado una asociación entre los incrementos a la exposición de corto plazo de PM con incrementos en mortalidad, especialmente entre personas con enfermedades respiratorias o cardiovasculares, por lo que actualmente existe un gran interés en estudiar a profundidad este contaminante, así como para regular también sus niveles de concentración en el ambiente. Las fuentes de PM son numerosas y entre ellas están procesos que ocurren naturalmente y actividades humanas que contribuyen por igual al PM total en el aire. El MP que es originado por los diversos procesos naturales incluye el polvo de la superficie de la tierra (material de la corteza), sal marina en áreas costeras y material biológico en forma de polen, esporas o desechos de plantas y animales. En algunas zonas rurales, los incendios forestales periódicos producen grandes cantidades de MP.

En los ambientes urbanos, las partículas son generadas principalmente como resultado de la combustión de fuentes móviles como carros livianos, buses, camiones y equipos de construcción. (Pérez, 2008).



**Figura 4.** Comparación del tamaño de las partículas

Nota. Tomado de la página web de la Agencia de protección ambiental de Estados Unidos EPA (<https://espanol.epa.gov/>)

### 2.4.1 Tamaño de las partículas

El material particulado puede variar grandemente en tamaño, composición y concentración, dependiendo de las fuentes de emisión de partículas y otros factores como la geografía y topografía, las condiciones climáticas y la hora del día. En términos normativos, generalmente se refiere a partículas totales en suspensión (PTS), partículas con diámetros menores a 10 μm (PM<sub>10</sub>) y partículas con diámetros menores a 2.5 μm (PM<sub>2.5</sub>).

### 2.4.2 Material particulado PM 2.5

En la atmósfera de las grandes urbes existe en forma sólida o líquida (polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, polen y cemento, entre otras) material particulado que se pueden dividir según su tamaño, principalmente en dos grupos, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>.

Se refiere a partículas PM<sub>2.5</sub> a todas aquellas cuyo diámetro es igual o inferior a 2.5 micras, unidad de longitud que equivale a una milésima parte de un milímetro, por lo que estas partículas son indetectables al ojo humano. Una diferencia es que PM<sub>2.5</sub>

son aún más peligrosas que las PM 10 ya que al ser más pequeñas llegan a rincones del pulmón donde ocurren intercambio de gases.

Las partículas en suspensión de menos de 2,5 micras (PM 2.5) no son medidas en muchas ciudades y parecen ser un mejor indicador de contaminación urbana que las PM 10. Esto se debe a que se conoce que su origen es antropogénico en una gran proporción, puesto que el PM 2.5, en buena medida son provenientes de las emisiones de los vehículos diésel en la ciudad. Y si se habla de salud los efectos que tienen en esta son muy graves ya que estas partículas poseen una gran capacidad de penetración en las vías respiratorias generando enfermedades y la disminución del funcionamiento pulmonar las cuales están asociadas cada vez con mayor evidencia científica. Ciertamente los grupos que se verán más afectados se consideran los más sensibles – niños, ancianos y personas con padecimientos respiratorios y cardíacos son los que corren el mayor riesgo de los efectos negativos de este contaminante. (Gil, 2008).

Los valores directrices recomendados de material particulado PM 2.5 según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) son:

- **5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$**  de media anual.
- **15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$**  de media diaria.

La legislación ambiental en Ecuador establece un límite permisible para material particulado PM 2.5 (Ministerio del Ambiente, 2015) en donde:

- El promedio aritmético de monitoreo continuo durante 24 horas no deberá exceder de **50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$** .

### **2.4.3 Material Particulado de PM 10**

Se define como PM 10 a aquellas partículas que son sólidas o líquidas dispersas en la atmósfera en el que su diámetro aerodinámico es menor que 10  $\mu\text{m}$  los cuales están formados por una serie de diversos compuestos inorgánicos como aluminatos y silicatos, partículas de carbono (hollín) como material orgánico y diferentes tipos de metales pesados, entre otros.

Existen varias fuentes de emisión de estas partículas, cuyas formas pueden ser móviles o estacionarias. La mayor parte de PM 10 procede del polvo que se



encuentra suspendido en la atmósfera, otras fuentes son el trabajo en las industrias de la construcción o del comercio y el transporte como también de quemas agrícolas. Y también suelen precipitar en la tierra donde se crea una capa de polvo en la superficie.

En cuanto a salud se refiere la constante exposición a las PM 10 se torna tóxico y puede llegar a provocar efectos nocivos en el sistema respiratorio de la persona, aunque como ya se mencionó, son menos perjudiciales que las PM 2.5, ya que al ser de mayor tamaño no logran entrar por los alveolos pulmonares, por lo que se quedan retenidas en la mucosa que recubre las vías respiratorias. (PRTR, 2007)

Los valores directrices recomendados de material particulado PM 10 según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) son:

- **15 µg/m<sup>3</sup>** de media anual.
- **45 µg/ m<sup>3</sup>** de media diaria.

La legislación ambiental en Ecuador establece un límite permisible para material particulado PM 10 (Ministerio del Ambiente, 2015) en donde:

- El promedio aritmético de monitoreo continuo durante 24 horas no deberá exceder de **100 µg/ m<sup>3</sup>**.

## **2.5 Dióxido de nitrógeno o NO<sub>2</sub>**

Los óxidos de nitrógeno se producen en cualquier parte que se está quemando un combustible; ya que a las altísimas presiones y temperaturas que ocurren en las cámaras de combustión, el nitrógeno y el oxígeno del aire se combinan para formar óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), formando también lluvias ácidas cuando entra en contacto con la atmósfera siendo considerados contaminantes del aire. Se conoce que los átomos de nitrógeno unidos a las moléculas orgánicas en algunos combustibles pueden contribuir significativamente a las emisiones de NO<sub>2</sub> durante este mismo proceso de combustión.

En términos de emisiones, el óxido nítrico el cual es un gas incoloro e insípido es predominante, pero una vez liberado, rápidamente se transforma en dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) debido a una reacción química con el ozono. Este NO<sub>2</sub> es un gas rojo-cobrizo y de un fuerte olor, el cual es mucho más dañino para la salud humana

que el NO, ya que al respirar altos niveles de este gas tóxico puede que rápidamente se sufra quemaduras, espasmos, dilatación de tejidos de la garganta y las vías respiratorias superiores, reduciendo así el oxígeno del cuerpo, lo que produce una acumulación de líquidos en los pulmones. (Pérez, 2008).

**Tabla 2.** Efectos del dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> a diferentes concentraciones.

Concentración de dióxido de nitrógeno	Efecto
14 µg/m <sup>3</sup> (0,01 ppm)	Aparición de síntomas leves respiratorios en niños
190 µg/m <sup>3</sup> (0,1 ppm)	Cuando se supera esta concentración media en el 40% de los días suele producirse un aumento de la frecuencia de infecciones en vías respiratorias
200 µg/m <sup>3</sup> (0,11 ppm)	Tras la exposición durante una hora se informó un aumento de reactividad de la vía aérea en varios sujetos expuestos
210 µg/m <sup>3</sup> (0,112 ppm)	Umbral del olor
400 µg/m <sup>3</sup> (0,2 ppm)	Tras la exposición durante dos horas se informó un aumento en la reactividad de la vía aérea en varios sujetos expuestos
µg470 µg/m <sup>3</sup> (µg0,25 ppm)	Se informó de un aumento en la reactividad de la vía aérea no específicos en asmáticos
470-900 µg/m <sup>3</sup> (0,25-0,50 ppm)	Estudios de exposición aguda con asmáticos muestran un aumento en la reactividad de la vía aérea
560 µg/m <sup>3</sup> (0,3 ppm)	Se ha observado respuestas en la función pulmonar bajo exposiciones a esta concentración en asmáticos realizando ejercicio moderado
600 µg/m <sup>3</sup> (0,32 ppm)	Tras la exposición durante 30 minutos se informó de que potenciaba los broncoespasmos inducidos por el ejercicio y la reactividad de la vía aérea a la provocación de aire frío en asmáticos
900 µg/m <sup>3</sup> (0,5 ppm)	Tras la exposición durante una hora se informó de un aumento en la reactividad de la vía aérea en sujetos normales
1.080 µg/m <sup>3</sup> (1 ppm)	Se ha comprobado que se necesita superar esta concentración para producir daños en adultos sanos
18.800-37.600 µg/m <sup>3</sup> (10-20 ppm)	Ligeramente irritante
37.600 µg/m <sup>3</sup> (20 ppm)	IDLH (Inmediatamente peligroso para la vida y la salud; 30 minutos)
≥282.300 µg/m <sup>3</sup> (≥150 ppm)	Se ha informado de muerte por edema pulmonar
327.400 µg/m <sup>3</sup> (174 ppm)	Se ha pronosticado que debería producirse un 50% de mortalidad durante una exposición de una hora

Nota. Obtenido de la página web del Portal Sanitario de la región de Murcia

(<http://www.murciasalud.es/>)

Los valores directrices recomendados de dióxido de nitrógeno según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) son:

- **10 µg/m<sup>3</sup>** de media anual.
- **25 µg/ m<sup>3</sup>** de media diaria.

La legislación ambiental en Ecuador establece un límite permisible para el dióxido de nitrógeno (Ministerio del Ambiente, 2015) en donde:

- La concentración máxima en una hora no deberá exceder de **200 µg/ m<sup>3</sup>**.

## **2.6 Dióxido de Azufre o SO<sub>2</sub>**

El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es un gas incoloro y con un olor desagradable muy contaminante que es emitido principalmente por los vehículos (a diésel), calefacciones o industrias energéticas y es originado por la combustión del carbón y petróleo. Es un gas muy peligroso al cual los ciudadanos se encuentran expuestos en los entornos urbanos donde se encuentra el radio de acción y focos emisores.

La elevada concentración, exposición e inhalación de este compuesto provoca afectaciones a la salud como irritación del sistema respiratorio dañando a su vez el tejido pulmonar y todo tipo de enfermedades relacionadas con el sistema cardiovascular que se agravan significativamente. La tasa de mortalidad se ve incrementada en las personas de tercera edad que junto con los niños son los más sensibles a estas emisiones. (Fernandez, 2009).

Al igual que el dióxido de nitrógeno el SO<sub>2</sub> en contacto con el aire produce lluvias ácidas que en el caso de los túneles no serían tan agravantes por el hecho de que es un espacio semicerrado.

**Tabla 3.** Efectos del dióxido de azufre SO<sub>2</sub> a diferentes concentraciones.

Concentración de dióxido de azufre	Efecto
520 µg/m <sup>3</sup> (0,2 ppm)	Los individuos normales y asmáticos (leves, moderados, graves) y atópicos más sensibles mostraron un aumento significativo de la resistencia específica de la vía aérea (sRaw), pero no clínicamente significativos debido a que no había síntomas respiratorios.
1,7 µg/m <sup>3</sup> (0.00053 ppm)	Concentración en aire asociadas con un aumento del riesgo para toda la vida por leucemia de 1/100.000
655 µg/m <sup>3</sup> (0,25 ppm)	Voluntarios con asma leve sometidos a ejercicio moderado y expuestos durante 75 minutos no mostraron aumento considerable de la sRaw
3.200 µg/m <sup>3</sup> (1ppm)	Aparición de casos de leucemia en exposiciones de 40 años.
4.800-15.000 µg/m <sup>3</sup> (1,5-4,7 ppm)	Concentración en aire asociadas con un aumento del riesgo para toda la vida por leucemia de 1/10.000
1.050 µg/m <sup>3</sup> (0,4 ppm)	Individuos asmáticos de moderados a graves mostraron después de una exposición de 55 minutos aumentos significativos de la sRaw y de los síntomas respiratorios.
1.300 µg/m <sup>3</sup> (0,5 ppm)	Individuos asmáticos leves sometidos a ejercicio y expuestos durante 75 minutos mostraron aumento significativo de la sRaw.
1.300-5.240 µg/m <sup>3</sup> (0,5-2 ppm)	La función pulmonar cambia en sujetos asmáticos durante el ejercicio
1.570 µg/m <sup>3</sup> (0,6 ppm)	Individuos asmáticos atópicos mostraron después de una exposición de 15 a 55 minutos aumentos significativos de la sRaw y de los síntomas respiratorios.
2.620 µg/m <sup>3</sup> (1 ppm)	Individuos asmáticos leves sometidos a ejercicio y expuestos durante 75 minutos mostraron aumento significativo de la sRaw.
5.240 µg/m <sup>3</sup> (2 ppm)	Individuos sanos sometidos durante 30 minutos y realizando ejercicio continuo no mostraron cambios en pruebas de función pulmonar.
7.900-13.000 µg/m <sup>3</sup> (3-5 ppm)	Detección del olor
16.000-31.000 µg/m <sup>3</sup> (6-12 ppm)	Puede causar irritación nasal y de la garganta.
21.000-31.000 µg/m <sup>3</sup> (8-12 ppm)	Puede producir irritación conjuntival y lagrimeo
26.000 µg/m <sup>3</sup> (10 ppm)	Se puede observar irritación en las vías respiratorias superiores y posibles hemorragias nasales.
52.000 µg/m <sup>3</sup> (20 ppm)	Puede causar irritación en los ojos
131.000-262.000 µg/m <sup>3</sup> (50-100 ppm)	Se puede observar irritación grave de los ojos, garganta, tracto respiratorio inferior y lagrimeo, que pueden ser tolerados durante 30 - 60 minutos.
262.000 µg/m <sup>3</sup> (100 ppm)	IDLH (Inmediatamente peligroso para la vida y la salud; 30 minutos)
1.049.000 µg/m <sup>3</sup> (400 ppm)	Concentración mínima letal en aire durante una exposición de 1 minuto.

Nota. Obtenido de la página web del Portal Sanitario de la región de Murcia (<http://www.murciasalud.es/>)

El valor directriz recomendado de dióxido de azufre SO<sub>2</sub> según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) es:

- **40 µg/ m3** de media diaria.

La legislación ambiental en Ecuador establece límites permisibles para el dióxido de azufre SO<sub>2</sub> (Ministerio del Ambiente, 2015) en donde:

- La concentración promedio en 24 horas no deberá exceder de **125 µg/ m3**.
- La concentración de este contaminante en un período de 10 minutos no deberá ser mayor que **500 µg/ m3**.

## 2.7 Sensores para el monitoreo y control de emisiones vehiculares.

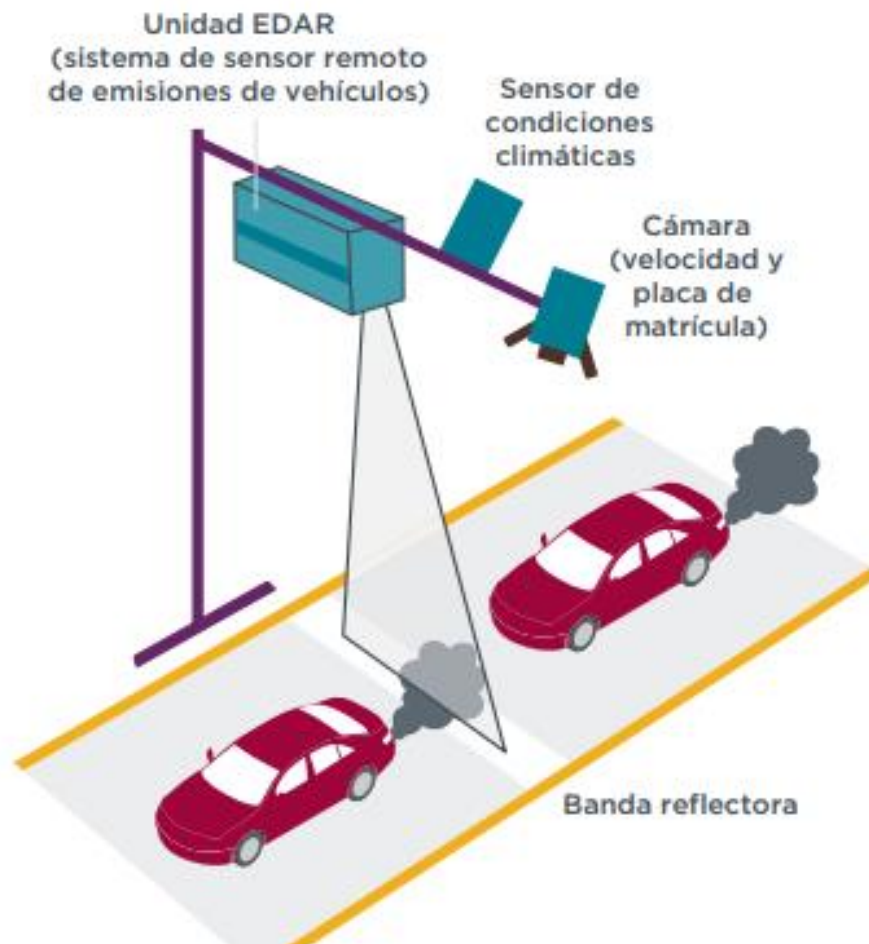
En el sector del transporte la medición de los gases emitidos por los vehículos que se encuentran en condiciones normales de circulación es un proceso importante de

cualquier sistema que busque controlar la contaminación atmosférica de manera precisa y eficaz. Dicho esto, la medición de emisiones permite fortalecer los protocolos y a su vez puede proporcionar a las entidades reguladoras y a los investigadores información sobre la contribución del transporte a los actuales problemas de contaminación y datos que ayuden a regular la eficacia orientada a mitigar dichos problemas, el caso de estudio del Consejo Internacional del Transporte Limpio de los Estados Unidos (ICCT por sus siglas en inglés) en una publicación de ‘‘The Real Urban Emissions Initiative (TRUE)’’ habla sobre un sistema que sin mayores inconvenientes podría ser adaptado, el sistema HEAT EDAR para el control de emisiones de gases contaminantes (CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>) cuando se encuentra en condiciones críticas advierte al usuario del uso o no del túnel. (Dallman, 2020).

Para medir las concentraciones de elementos contaminantes en los escapes de los vehículos en circulación se utilizan estos sistemas de sensores que se basan en la espectroscopia de absorción. Para ello, se instala una fuente y un detector de luz por encima de la vía pública, en el caso de los túneles estos sistemas irían instalados en la bóveda, de tal forma que la luz emitida por la fuente atravesase la pluma de gases de escape de los vehículos. Los elementos contaminantes van a interactuar con la luz de una forma específica y con esto se puede calcular su cantidad relativa midiendo cuánta haz de luz de determinadas longitudes de onda es absorbida mientras atraviesa la pluma de gases de escape. Cada medición dura menos de un segundo y de ser exitosa arroja una concentración de contaminantes en proporción relativa a los niveles de CO<sub>2</sub> en la pluma de gases de escape. El sistema mide la cantidad de dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub>, monóxido de carbono CO y dióxido de azufre SO<sub>2</sub>, las emisiones de partículas MP se miden de forma indirecta a partir de la opacidad de la pluma. Los resultados anteriores no tienen mucha utilidad si no se pueden correlacionar con información específica del vehículo, incluida la forma como se manejaba cuando se realizó la medición, por lo que este sistema permite recolectar información mediante una cámara que toma una foto a la matrícula y a partir de la cual se consiguen datos como el modelo, la marca, el tipo de combustible, el tamaño del motor y la norma de emisiones que cumple, mientras otro dispositivo está midiendo la velocidad y tasa de aceleración del vehículo lo que proporcionaría información sobre las condiciones de carga del motor, por último, otros sensores

miden las condiciones ambientales actuales, como la temperatura, presión atmosférica y humedad relativa. (Dallman, 2020)

En 5 y 10 años respectivamente los niveles de CO van a crecer producto del crecimiento vehicular, lo que incrementa la letalidad, este sistema ayuda a generar estadísticas de emisiones reales con distintos grados de detalle, dependiendo de la disponibilidad de los datos, se pueden generar factores de emisiones para distintas categorías de vehículos, como la flota general promedio, el tipo de vehículo (liviano o pesado) así también como el tipo de combustible (gasolina o diésel) e incluso norma de emisiones como las reconocidas en este informe la normativa EURO.



**Figura 5.** Configuración de un sistema de un sistema de sensor remoto perpendicular a la vialidad.

Nota. Obtenida de la página web del Consejo Internacional del transporte limpio de los Estados Unidos ICCT (<https://theicct.org/>)

El registro completo del sistema de sensores sobre un vehículo contiene la siguiente información:

- Grado de concentración de cada tipo de emisión, medido proporcionalmente al exceso de CO<sub>2</sub> en el aire.
- Velocidad y tasa de aceleración del vehículo.
- Condiciones de medición: pendiente de la vía, temperatura ambiente, presión atmosférica y humedad relativa.
- Descripción y especificaciones del vehículo: marca, modelo, categoría, año-modelo, tipo y tamaño de carrocería, tipo de combustible, tamaño del motor, norma de emisiones que cumple, valores de CO<sub>2</sub> de certificación y masa del vehículo vacío.

Actualmente existe un gran proveedor de estos sensores de medición: Hager Environmental and Atmospheric Technologies (HEAT), el cual con su sistema HEAT EDAR desde un punto de vista práctico facilita las mediciones en vías con múltiples carriles, siendo instalado por encima de la vía para que el haz de luz atraviese la pluma de forma vertical con lo cual este método depende menos de la altura y orientación de los tubos de escape. Este sistema usa un láser como fuente de luz que hace un barrido a todo el ancho de la vía para realizar las mediciones correspondientes. (Dallman, 2020)

Como medidas alternativas para mitigar las emisiones al ambiente con éxito países como Singapur han colocado sensores en la vía y cuando estos contaminantes llegan a niveles no aceptados por ellos se decide restringir el paso de los vehículos, Electronic Road Pricing o ERP se llama el sistema que se implementó en 1998 con el fin de disminuir los niveles de congestión vehicular, reducir las emisiones de gases que perjudican la calidad del aire y maximizar la productividad a nivel local al generar un tiempo de transporte más estandarizado. (Arcila, 2017)

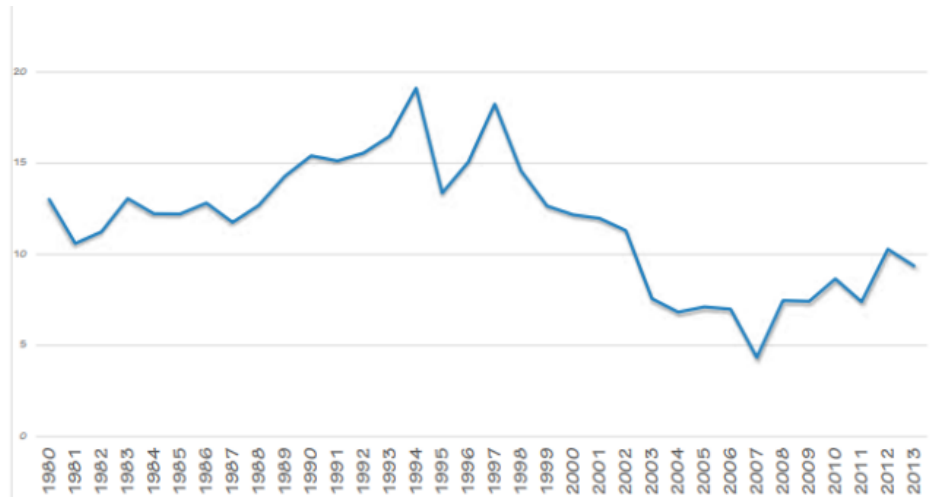


**Figura 6.** Sistema ERP en Singapur.

Nota. Obtenido de la revista Mundo Asia Pacífico.

El sistema en el cual está basado el ERP se basa en el concepto de cobrar tarifas dependiendo de la hora del día. Específicamente, la política implementada busca cobrar tarifas elevadas en horas de la mañana y la tarde (horas pico respectivamente) y disminuir el costo de tránsito en el día o noche con flujo normal de vehículos con esto se logra la restricción y reducción de emisiones sin lugar a dudas, gracias a la implementación de distintos sistemas de control de tráfico y mejoras en el sistema público masivo y privado de la ciudad, Singapur ha logrado dar solución al problema público generado por la gran cantidad de automóviles frente a una cantidad constante de carreteras. (Arcila, 2017).





**Figura 7.** Emisiones de CO2 en Singapur (1980-2013)

Obtenido de la revista Mundo Asia Pacífico.

## **2.8 Legislación ambiental ecuatoriana sobre gases contaminantes (CO, NO2, SO2) y material particulado PM2.5 Y PM10.**

Para los tipos de muestra y parámetros se miden los niveles de alerta, alarma y emergencia en la legislación ambiental del Ecuador donde existe el acuerdo ministerial 097 A en los cuales está el Anexo 4 (2015), el cual refiere a la Norma de Calidad del aire ambiente una tabla con los límites permisibles establecidos. (Ministerio del Ambiente, 2015)

La legislación ambiental del Ecuador en la siguiente tabla indica las concentraciones promedio tomadas por cada hora dependiendo del tipo de contaminante. Para el análisis de esta investigación se va a comparar para ver cuanto inciden las emisiones contabilizadas en la hora máxima de flujo debido a que es la hora crítica donde hay más usuarios en la vía, ya que en ingeniería de tráfico si se hace un promedio se obtendrá información equivocada de la magnitud del daño lo que causa que se diluya la peligrosidad. No es un análisis ambiental general sino un tema puntual muy crítico porque es la condición de mayor incidencia, dicho esto, no se analiza los volúmenes promedio sino el volumen sólo de la hora pico para ver cuál es el nivel de daño en ese lapso. Podría resultar equivocado el criterio de medir si bs de concentraciones ya que saldrían resultados menores que no se ajustan a la realidad debido a que el tráfico

no es el mismo en todo el día por lo que se analiza la aplicabilidad de la norma desde un punto de vista puntual.

Según el Libro VI “DE LA CALIDAD AMBIENTAL”: Título IV, Reglamento de la Ley de Gestión Ambiental para la prevención y control de la Contaminación Ambiental, Anexo 4. Norma de Calidad Aire Ambiente, en la que señala que:

**Tabla 4.** Concentración de contaminantes y criterios que definen los niveles de alerta, alarma y emergencia.

<b>CONTAMINANTE Y PERIODO DE TIEMPO</b>	<b>ALERTA</b>	<b>ALARMA</b>	<b>EMERGENCIA</b>
<b>Monóxido de Carbono</b> Concentración promedio en ocho horas ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	15000	30000	40000
<b>Ozono</b> Concentración promedio en ocho horas ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	200	400	600
<b>Dióxido de Nitrógeno</b> Concentración promedio en una hora ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1000	2000	3000
<b>Dióxido de Azufre</b> Concentración promedio en veinticuatro horas ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	200	1000	1800
<b>Material particulado PM 10</b> Concentración en veinticuatro horas ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	250	400	500
<b>Material Particulado PM 2,5</b> Concentración en veinticuatro horas ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	150	250	350

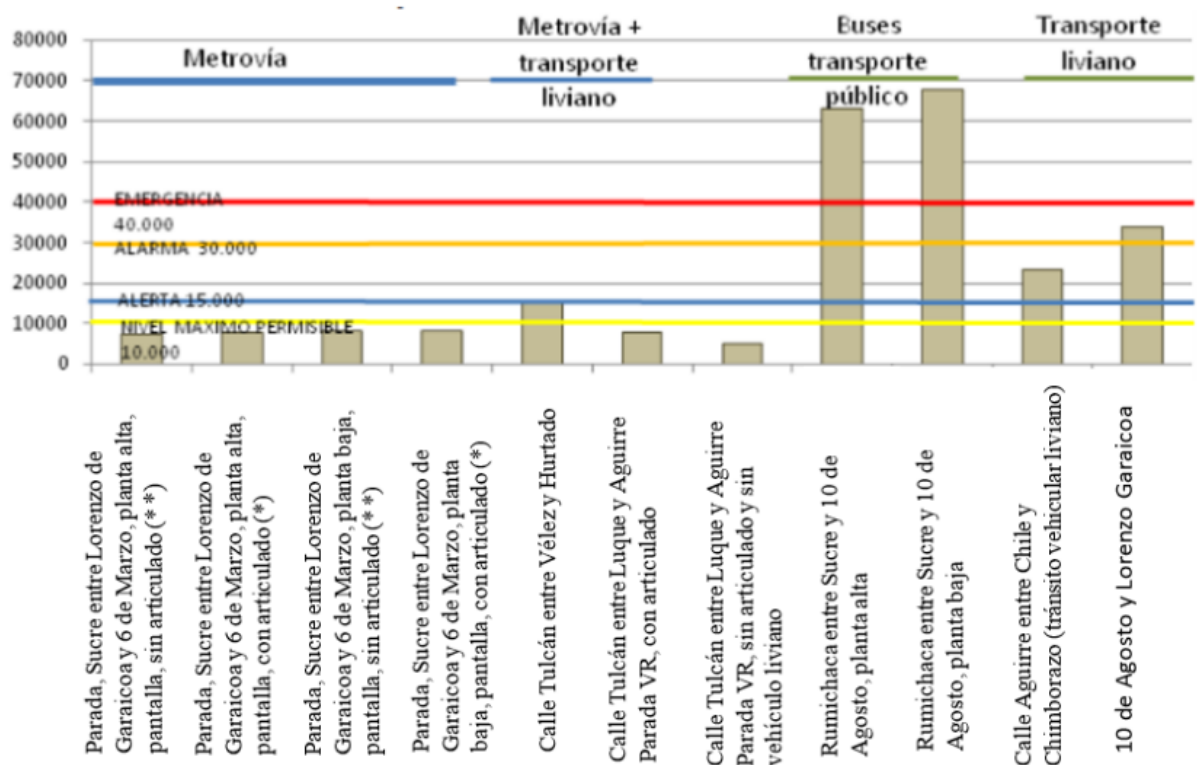
Nota. Obtenido de la Norma de Calidad de Aire Ambiente de la Legislación secundaria ambiental (2015).

Nota específica. En el desarrollo más adelante se va a realizar la comparación con los niveles de emisión mostrados en los resultados de las horas de mayor demanda vehicular con la hipótesis mencionada anteriormente.

- **En nivel de Alerta:** se debe informar al público, mediante los medios de comunicación. Restringir la circulación de los vehículos, así como la operación de fuentes fijas de combustión.
- **En nivel de Alarma:** informar al público del establecimiento del nivel de alarma, restringir la circulación de vehículos y si es necesario prohibirla.

- **En nivel de Emergencia:** Informar al público del nivel de emergencia, prohibir la circulación y el estacionamiento de los vehículos, se deberá considerar extender estas prohibiciones a toda operación de fuentes fijas de combustión.

La información que se presenta a continuación fue tomada del *Informe de calidad de aire ambiente de las estaciones de Metrovía y calles de la ciudad de Guayaquil* presentado por el Ingeniero Federico von Buchwald en su publicación *Movilidad Urbana de Guayaquil*. (von Buchwald, Movilidad Urbana, 2011) en función a los niveles permitidos y su clasificación en alerta, alarma y emergencia.

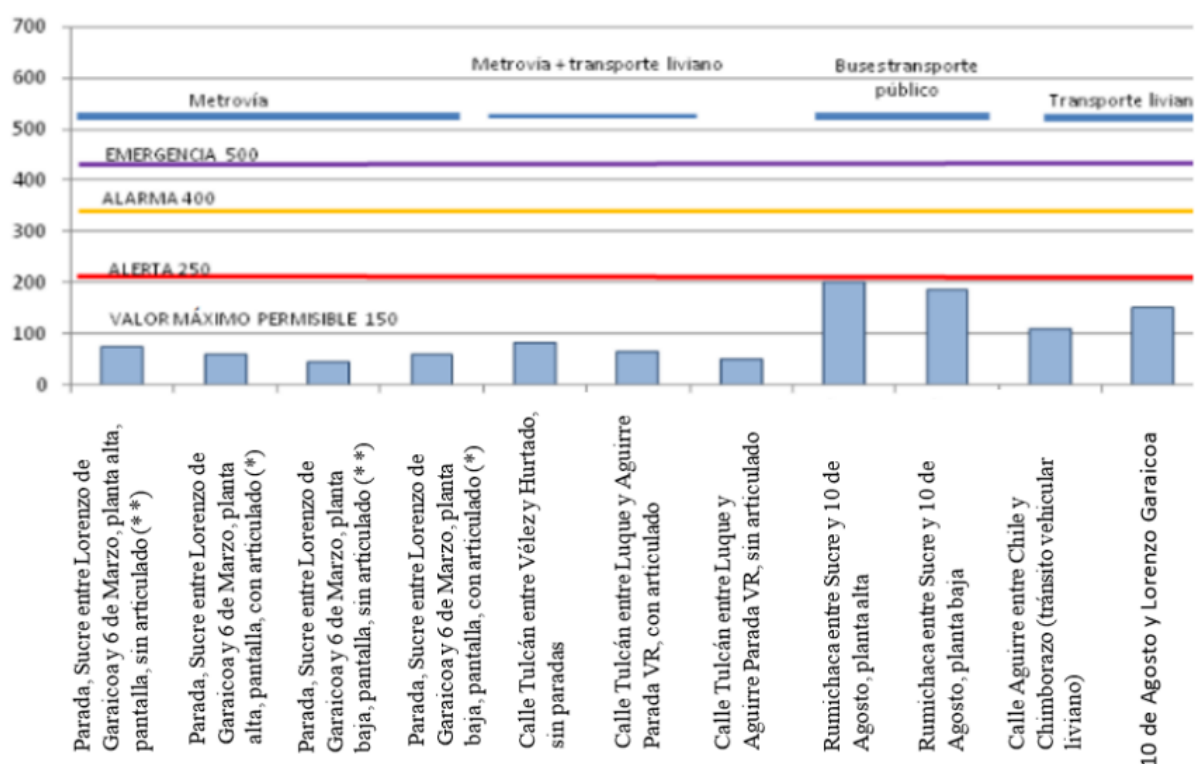


**Figura 8.** Niveles de monóxido de carbono (CO) en diferentes calles de Guayaquil clasificados por el tipo de transporte.

Nota. Obtenido de Movilidad Urbana de Guayaquil. (von Buchwald, Movilidad Urbana, 2011)

En la Figura 8 se muestra cómo los niveles de CO para transporte liviano llegan casi a 34.000 µg/m<sup>3</sup> siendo los niveles de alarma 30.000 µg/m<sup>3</sup>, mientras que los niveles producidos por los vehículos del sistema Metrovía no superan los 8.000 µg/m<sup>3</sup> siendo inferior al nivel máximo permisible (10.000 microgramos por metro cúbico). En el caso de la calle con la mayor cantidad de buses convencionales de la ciudad

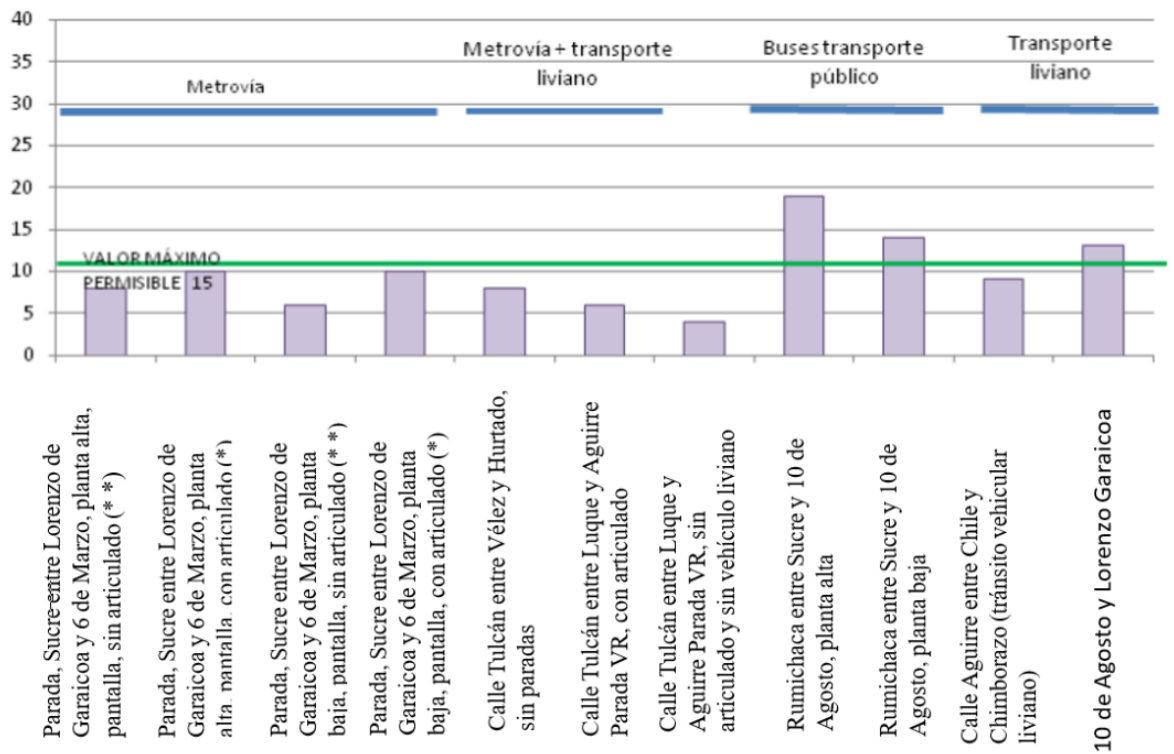
Rumichaca entre Sucre y 10 de Agosto llega aproximadamente a 67.800  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , superando los niveles de emergencia (40.000 microgramos/metro cúbico).



**Figura 9.** Niveles de material particulado (PM10) en diferentes calles de Guayaquil clasificados por el tipo de transporte.

Nota. Obtenido de Movilidad Urbana de Guayaquil. (von Buchwald, *Movilidad Urbana*, 2011)

Los resultados que se muestran en la Figura 9 sobre las concentraciones de material particulado PM10 del sistema Metrovía se encuentran en valores inferiores al máximo permisible según la Tabla 4, mientras que los vehículos livianos sobrepasan los valores máximos permisibles; los valores generados por los buses están muy cerca a los niveles de alerta con 185  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

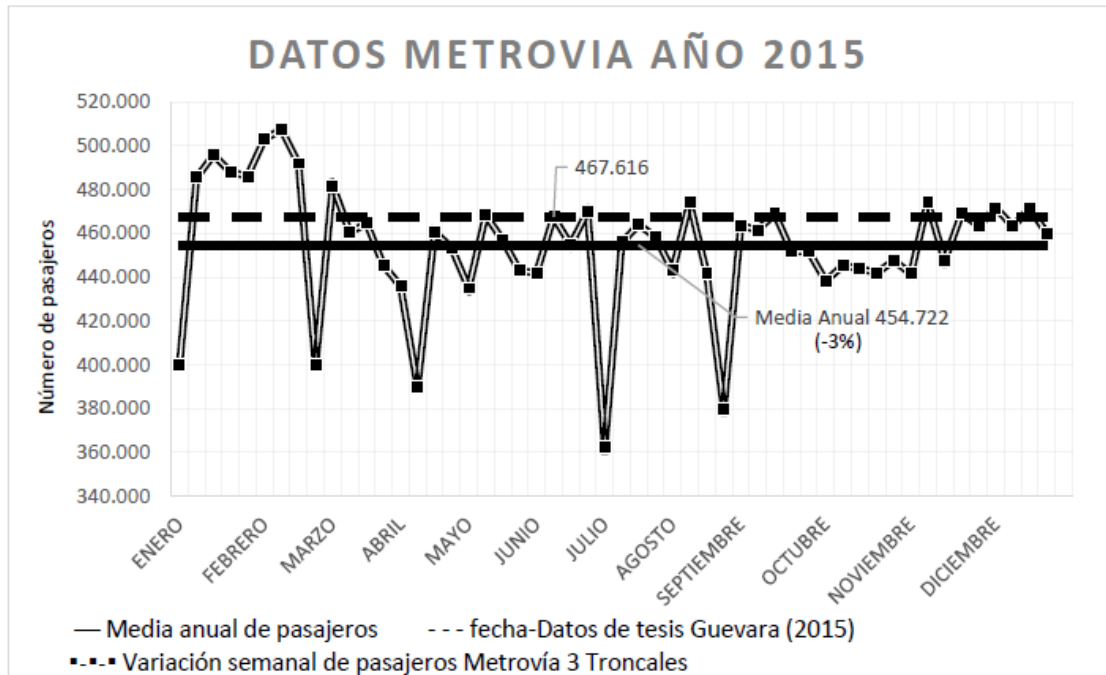


**Figura 10.** Niveles de material particulado (PM10) en diferentes calles de Guayaquil clasificados por el tipo de transporte.

Nota. Obtenido de Movilidad Urbana de Guayaquil. (von Buchwald, Movilidad Urbana, 2011)

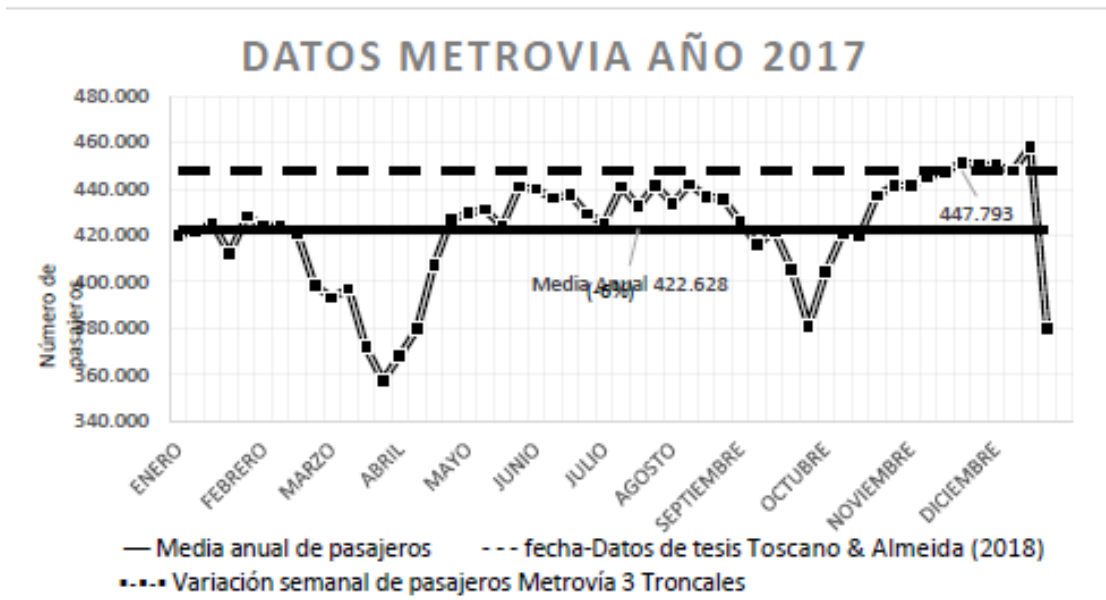
Para las concentraciones de material particulado PM 2.5 medidas en el aire, el sistema de la Metrovía fue el único en cumplir respecto al nivel máximo permisible, llegando a niveles de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , los vehículos livianos registraron  $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y los sectores con buses convencionales  $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

A continuación, con la idea de proyectar los conteos de tráfico y medición de gases a una media anual, se ha tomado como referencia el estudio de Generación de viajes de Guayaquil del Ingeniero Federico von Buchwald (**von Buchwald, 2021**) que hace referencia a conteos de todo el año y los correlaciona con una actividad constante que es el transporte de la Metrovía, esto refleja las intensidades de las actividades de la ciudad que se muestran en los gráficos a continuación:



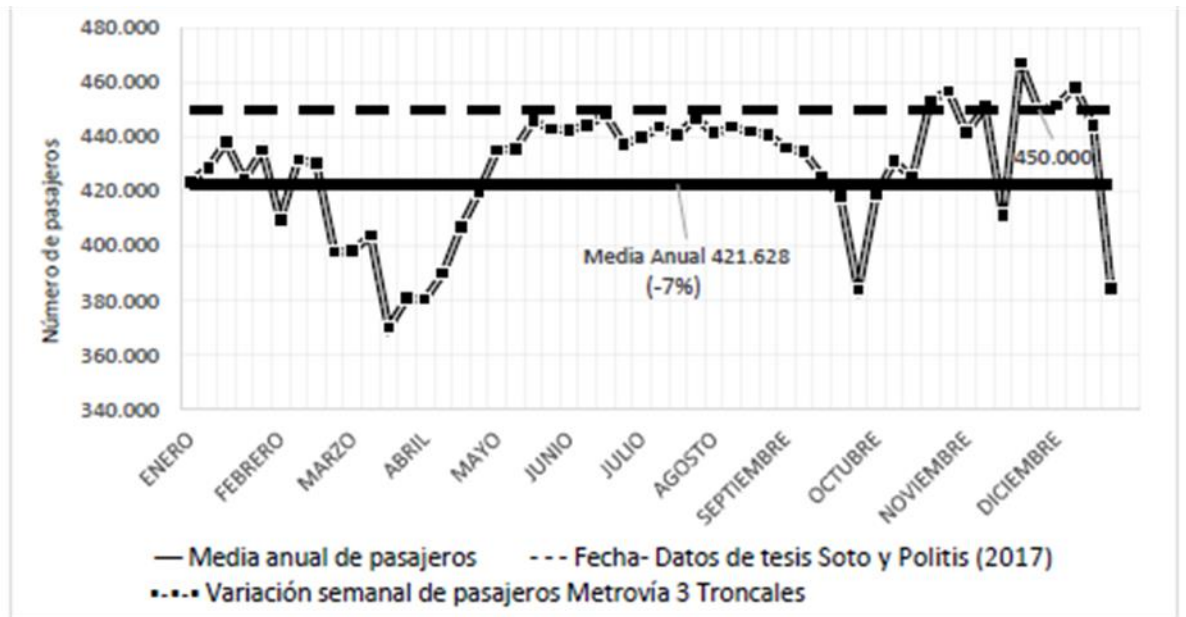
**Figura 11.** Datos Metrovía correspondientes al año 2015 para centros comerciales.

Nota. Obtenido de Generación de viajes de Guayaquil. (von Buchwald, 2021)



**Figura 12.** Datos Metrovía correspondientes al año 2017 para clínicas.

Nota. Obtenido de Generación de viajes de Guayaquil. (von Buchwald, 2021)



**Figura 13.** Datos Metrovía correspondientes al año 2016 para hoteles.

Nota. Obtenido de Generación de viajes de Guayaquil. (von Buchwald, 2021)

Se observa en los conteos anteriores, en los meses de noviembre, hasta la primera semana de diciembre (donde fueron realizados los conteos en los túneles), están entre el 2 % y 6% por encima de la media anual lo que no deja de ser importante por lo que estas relaciones son referenciales y el nivel de impacto si tiene representación ya que se asemeja a la realidad, cabe mencionar que no se han colocado conteos en los años 2019, 2020 y 2021 debido a que han sido años irregulares producto de restricciones por la pandemia.

## 2.9 Circunstancias por efecto de combustible (Normas EURO).

La preocupación de ciertos países europeos por la calidad del aire los llevó a crear la normativa que es la más importante a nivel mundial en temas de emisiones contaminantes generadas por vehículos propulsados por combustión fósil.

Hubo un avanzado crecimiento de emisiones contaminantes por el parque automotor y surgió la preocupación de la Unión Europea que implementó esta normativa EURO, que dicta que los vehículos nuevos deberán cumplir con las exigencias que limitan a los gases potencialmente peligrosos para la salud como el monóxido de

carbono y óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono que son cada vez más severos. (Tecnología del Automóvil, 2018)

Desde el año 1992 entro en vigor la primera norma EURO 1 y es así como la unión europea cada 4 años aproximadamente actualiza la misma con nuevos requisitos y valores que deben cumplir los vehículos; de esta forma su desarrollo ha sido mucho más riguroso en las normas EURO 2, EURO 3, EURO 4, EURO 5 y la más reciente EURO 6 que pasó por varias revisiones y se encontró vigente la C hasta que en 2020 entró en vigor la D en ciertos países del continente europeo. (Tecnología del Automóvil, 2018)

**Tabla 5.** Límites de emisiones establecidos por cada norma EURO.

Norma	Entrada en vigor	CO (g/km)	HCT (g/km)	NMHC	HCT+NOx (g/km)	NOx (g/km)	PM (g/km)
<b>Motor diésel</b>							
Euro 1**	01/07/92	2,72 (3,16)	----	----	0,97 (1,13)	----	0,14 (0,18)
Euro 2, IDI	01/01/96	1,0	----	----	0,7	----	0,08
Euro 2, DI	01/01/1996 <sup>a</sup>	1,0	----	----	0,9	----	0,10
Euro 3	01/01/00	0,64	----	----	0,56	0,50	0,05
Euro 4	01/01/05	0,50	----	----	0,30	0,25	0,025
Euro 5	01/09/09	0,50	----	----	0,23	0,18	0,005 <sup>c</sup>
Euro 6	01/09/14	0,50	----	----	0,17	0,08	0,005 <sup>c</sup>
<b>Motor gasolina</b>							
Euro 1**	01/04/92	2,72 (3,16)	----	----	0,97 (1,13)	----	----
Euro 2	01/01/96	2,2	----	----	0,5	----	----
Euro 3	01/01/00	2,30	0,20	----	----	0,15	----
Euro 4	01/01/05	1,0	0,10	----	----	0,08	----
Euro 5	01/09/09	1,0	0,10	0,068	----	0,06	0,005 <sup>b,c</sup>
Euro 6	01/09/14	1,0	0,10	0,068	----	0,06	0,005 <sup>b,c</sup>

■ CO: masa de monóxido de carbono; HCT: masa total de hidrocarburos; NOx: masa de óxidos de nitrógeno; PM: masa de partículas, NMHC: masa de hidrocarburos no metanos.  
IDI: inyección indirecta, DI: inyección directa.

Nota. Tomado de la página web de la Revista Autocrash

[\(https://www.revistaautocrash.com/\)](https://www.revistaautocrash.com/)

Nota específica. En el desarrollo más adelante se va a realizar la comparación de reducción de contaminantes si los vehículos que usan combustibles EURO 2 migraran a combustibles con condiciones ambientales más aceptables.



La norma para vehículos pesados utiliza números romanos, EURO III, EURO IV, etc.

Debido a la constante evolución de esta Norma EURO, siempre su finalidad ha sido buscar mejorar la calidad del aire pidiendo a los fabricantes implementar y acondicionar nuevas tecnologías para que cada vez haya menos emisiones de gases y se limpian cada vez más de toda salida por parte de los vehículos. (Tecnología del Automóvil, 2018)

### **Norma EURO 1**

Cuando fue introducida en el año 1992 requirió el cambio a gasolina sin plomo, así como también la instalación universal de convertidores catalíticos para tratar de reducir las emisiones de monóxido de carbono (CO) generadas por los vehículos.

### **Norma EURO 2**

Esta norma que fue introducida en el año 1997 se enfocó no solo en reducir aún más los límites de emisiones de monóxido de carbono, sino que a su vez lo hizo para el combinado de hidrocarburos no quemados y tanto de vehículos a gasolina como de diésel.

### **Norma EURO 3**

La norma EURO 3 llega en enero del año 2000, donde el procedimiento de prueba para eliminar el período de calentamiento del motor fue modificado y en la cual redujeron aún más los límites permitidos de partículas de diésel y monóxido de carbono. En esta norma se implementa de igual forma los límites para NO<sub>2</sub> en motores diésel y NO<sub>2</sub> para motores de gasolina, así como también para los hidrocarburos no quemados.

### **Norma EURO 4**

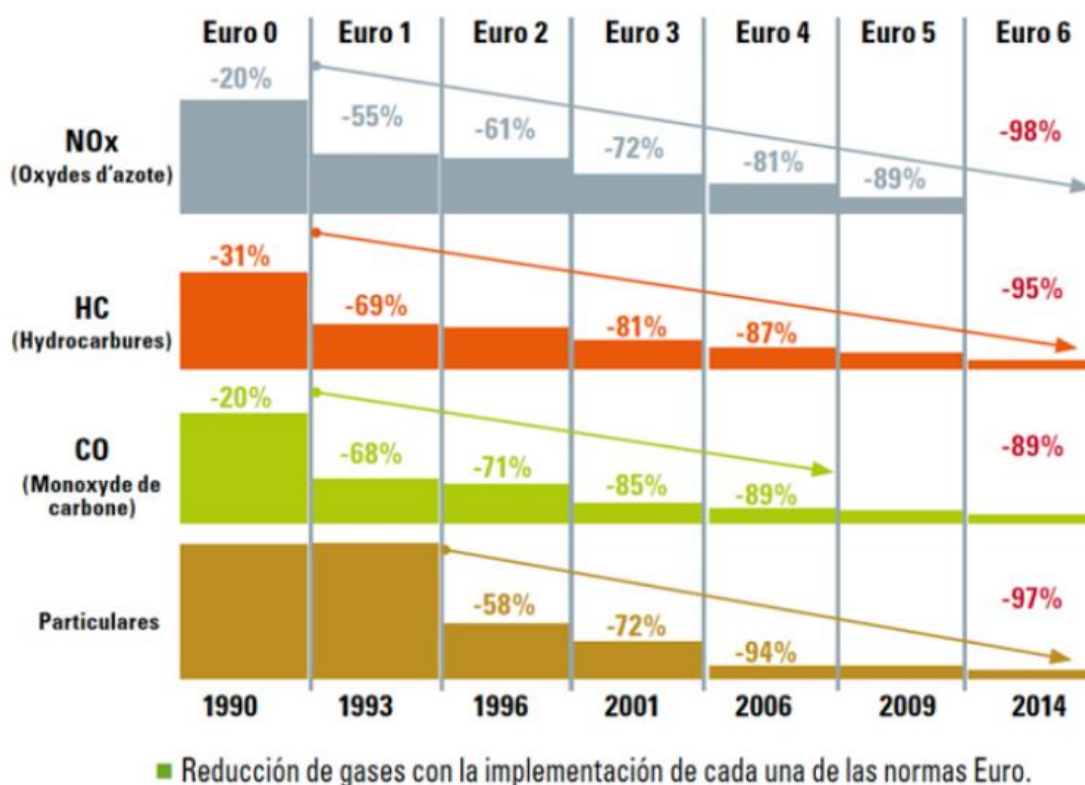
Desde el día que fue lanzada la norma EURO 4 en el año 2005 en sus estándares se concentraron más en mitigar y limpiar las emisiones de los automóviles diésel y en especial la reducción de PM o material particulado y de NO<sub>2</sub>. Fue por esta norma que muchos vehículos empezaron a equiparse con filtros de partículas.

## Norma EURO 5

Para la norma EURO 5 los vehículos deben estar equipados con motores de encendido por chispa o compresión de gas natural (GN) o gas licuado de petróleo. Siendo esta norma mucho más estricta que sus ediciones anteriores ya que, los límites de concentraciones de partículas de motores diésel se redujeron y esto provoca que para cumplir los nuevos requisitos se necesiten filtros.

## Norma EURO 6

En el año 2015, las normas EURO 6, impone un cambio significativo en la reducción de las emisiones de NO<sub>2</sub> de motores a diésel (Casi el 80% de disminución en comparación con EURO 2) y sus estándares son similares al EURO 5 para la gasolina y diésel.



**Figura 14.** Reducción de contaminantes por Norma hasta el año 2014 en Europa.

Nota. Tomado de la página web de la Revista Autocrash

(<https://www.revistaautocrash.com/>)

Aparte de regular las emisiones nocivas, esta normativa posee muchos otros beneficios. Ya que están alentando a los fabricantes de vehículos a crear nuevas tecnologías para lograr reducir las emisiones de contaminación al aire. De igual forma en Europa ya cumplen con las normas EURO 5 Y EURO 6 por lo que ha mejorado en gran capacidad la eficiencia del combustible como resultado del desarrollo del sistema de purificación de escape. (Doble Vía, 2017)

En el Ecuador la calidad de los combustibles no supera la norma EURO 2. La Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE) en su boletín informativo Motor Terra menciona que “ las gasolinas que se venden en el Ecuador cumplen con las exigencias de la norma EURO 2” es decir uno de los combustibles con más baja calidad de la región. A su vez el diésel que se comercializa en el país cumple con los requisitos de EURO 1, esto quiere decir que en Ecuador existe un retraso de más de 20 años en comparación con las nuevas normas. (Baldeón, 2020)

“Debido a la calidad de los combustibles, la oferta disponible en el Ecuador es limitada, por lo que los motores deben funcionar con gasolinas y diésel de características EURO 1 Y EURO 2. Sin Embargo, los motores que ingresan al país cuentan con tecnología que requieren combustibles EURO 3 o superior como es el caso de los vehículos alemanes como Volkswagen que integran dos catalizadores para la reducción de emisiones contaminantes al igual que Ford que integran dos catalizadores con cuatro sensores O2 para el análisis de datos y verificación de las emisiones que emite el vehículo” (Baldeón, 2020).

## **2.10 Capacidad y niveles de servicio**

Se define como capacidad de un camino o vía como el número máximo de vehículos que pueden circular durante un tiempo establecido y bajo condiciones prevalecientes que pueden ser la composición del tránsito, los alineamientos horizontales y verticales, así como el ancho de los carriles. Esta capacidad no puede ser excedida sin cambiar una de estas condiciones.

Los niveles de servicio son aquellos que denotan un número de condiciones de operación diferente que pueden ocurrir en una vía cuando aloja varios volúmenes de tránsito. Existen 6 niveles de servicio clasificados de la siguiente forma:

- **Nivel de Servicio A:** Este nivel representa un flujo libre de vehículos para una vía que contiene especificaciones geométricas adecuadas, se torna fácil al momento de conducir hay libertad para maniobrar con facilidad dentro de la corriente vehicular ya que prácticamente no existe interferencia con otros vehículos.
- **Nivel de Servicio B:** Las restricciones para el flujo libre comienzan a aparecer y las especificaciones geométricas reducen algo la velocidad, la libertad del usuario para conducir y maniobrar dentro de la corriente vehicular se ve disminuida, ocurren ligeras interferencias con otros vehículos, a pesar de esto sigue siendo un nivel de operación bueno para el conductor.
- **Nivel de Servicio C:** El flujo es estable, pero representa condiciones medias o empiezan a presentarse restricciones de geometría y pendiente. La libertad para conducir a la velocidad deseada se ve afectada cuando se presentan interferencias un tanto tolerables con otros automotores, deficiencias de la vía son aceptables y el nivel de comodidad del conductor es adecuado.
- **Nivel de servicio D:** El flujo sigue siendo estable, pero se presentan restricciones de geometría y pendiente considerables, ya que no existe tal libertad para conducir con la velocidad deseada en la vía, existen frecuentes interferencias con otros vehículos y puede haber condiciones de vía defectuosas, nivel de comodidad del conductor suele ser deficiente.
- **Nivel de servicio E:** Suele representar la circulación a la capacidad de la vía cuando aun cuando las velocidades son bajas pero el tránsito fluye sin interrupciones, en esta condición es prácticamente imposible rebasar siendo los niveles de comodidad y libertad de manejo muy bajos. La circulación a su capacidad suele ser muy inestable por lo que una pequeña perturbación en el camino causa congestión.
- **Nivel de servicio F:** Este nivel representa una circulación ya congestionada y se da cuando el volumen de demanda de vehículos supera la capacidad de la vía en tránsito por lo que se rompe la continuidad del flujo que suele ser muy irregular. Se forman largas colas y hay constantes paradas y avances cortos.

Según el HIGHWAY CAPACITY MANUAL (2016) 6ta Ed. Cap. 12: Para autopista de varios carriles se considera que:

Un flujo máximo en intervalos de 15 min se obtiene a partir de un volumen horario dividiendo el volumen horario para un PHF (factor de hora pico) apropiado y representa aquella intensidad por carril en la que los vehículos pueden pasar a través de la autopista. La intensidad de flujo para una autopista de varios carriles se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$V_p = \frac{V}{PHF * N * fHV}$$

$V_p$ : Intensidad de flujo en un periodo de 15 min. (veh/h).

$V$ : Volumen máximo horario (veh/h).

$PHF$ : Factor de hora pico.

$fHV$ : Factor de ajuste por presencia de vehículos pesados.

$N$ : Número de carriles

$$PHF = \frac{V}{V_{15m\acute{a}x} * 4}$$

El factor de hora de pico (PHF) es el volumen horario durante la hora de volumen máximo del día dividido por el flujo máximo de 15 minutos dentro de la hora pico y multiplicado por 4, este factor se utiliza en el análisis de capacidad y nivel de servicio para tener en cuenta la variación en los volúmenes de tráfico durante la hora pico.



**Figura 15.** Representación gráfica de los niveles de servicio de una vía.

Nota. Tomado del libro Ingeniería de tránsito, fundamentos y aplicaciones de Reyes Espíndola (2007).

## CAPÍTULO 3: DESARROLLO

### 3.1 Generalidades

La demanda de tráfico actual o futura se puede considerar como una cantidad conocida y es muy importante en la operación, planeación y proyectos de infraestructura vial como es el caso de los túneles de Guayaquil.

Un indicador de eficiencia por la que una carretera o vía presta un servicio en función de su operatividad de la demanda de vehículos se conoce como capacidad. Y para poder determinarla se debe tener un conocimiento general de las características del flujo de tránsito, así como también de condiciones físicas o a su vez geométricas de operación de la vía.

### 3.2 Crecimiento vehicular y proyección

Según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) en el 2019 (último año antes de la pandemia) hubo 529908 vehículos matriculados en Guayaquil, con este dato se va a realizar una proyección a 5 y 10 años para conocer la cantidad de vehículos estimada en la ciudad. (INEC, 2019)

Para simplificar el análisis del crecimiento vehicular la empresa del consorcio ILM – Guayaquil contrató al consultor Roberto Sáenz que realizó una proyección de tasa de crecimiento vehicular, poblacional y económico en donde se utilizan los siguientes valores:

**Tabla 6.** Proyección vehicular realizada a los 5 y 10 años respectivamente.

AÑOS	Proyección a:		r	Factor	Cantidad de vehículos
2019	-	-	-	-	529908
2024	P5	$Ta(1+r)^n$	3.25%	1,173668	621936
2029	P10	$Ta(1+r)^n$	3.86%	1,460352	773852

Nota. Elaboración propia.

Nota específica. Los mismos factores serán utilizados para realizar la proyección vehicular de las horas pico en el análisis de capacidad.

En la tabla anterior se puede observar cómo la cantidad de vehículos en el año 2024 incrementará en un 17% con respecto al año 2019 con un total de 619,993 automotores y en el año 2029 con un total de 773,665 automotores incrementará en un 46% respectivamente.

### **3.3 Determinación de volumen y capacidad de tránsito por túnel**

El volumen de tráfico se puede definir como el número de vehículos que pueden pasar por un carril o tramo de una calle durante un período de tiempo que es determinado, cuando el periodo de tiempo es una hora se lo conoce como volumen horario y para obtener estos volúmenes de tráfico se deberán realizar estudios siendo los más comunes los conteos volumétricos. Los mismos que consisten en contar los vehículos que pasan por una determinada sección o carril durante un período que se determina previamente de acuerdo con las necesidades de campo y a la precisión del estudio.

Los volúmenes horarios están sujetos a variaciones durante el día y dentro de la misma hora que fueron medidos. El volumen y el volumen ajustado son variables encargadas de cuantificar la demanda, esto es el número de conductores (expresado en vehículos) que usan una infraestructura vial, en este caso los túneles, durante un periodo específico. Los conteos en este análisis son realizados en días diferentes de la misma semana de 7H00 A 19H00 en intervalos de 15 minutos, clasificando los vehículos en livianos, pesados y buses.

El volumen demanda o ajuste es la tasa equivalente a en lo que los vehículos pasan por un punto o tramo de un carril o carretera durante un intervalo de tiempo usualmente de 15 min durante la hora de mayor tránsito.

- Al realizar el análisis de cada uno de los tramos por intervalos de 15 min, se pudo obtener que la hora pico está comprendida entre las 17h15 y 18h15 en el túnel del cerro Santa Ana los dos días de conteo.
- De 10h15 a 11h15 en el túnel de cerro del Carmen los dos días de conteo.
- De 9h15 a 10h15 en el túnel del cerro San Eduardo en sentido sur-norte los dos días de conteo.



- De 18h00 a 19h00 los dos días de conteo en el túnel del cerro San Eduardo en sentido norte-sur
- Para el análisis de la capacidad y niveles de servicio de los túneles se realizaron dos días de conteo en cada uno y se va a escoger el día el cual la hora pico tiene mayor número de vehículos.

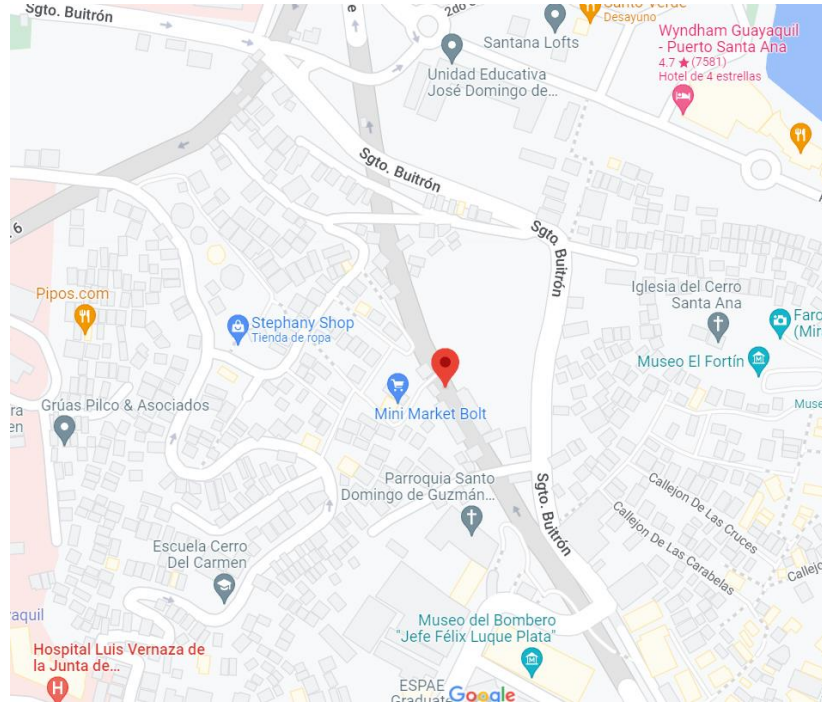
A continuación, se muestran los resultados (los conteos de los otros días se encuentran en Anexos):

### **3.4 Conteo de vehículos en el túnel del Cerro Santa Ana**

Para el cálculo del volumen de capacidad del túnel cuya vía está constituida por 3 carriles, se tomó como referencia el conteo realizado el viernes 12 de noviembre del 2021 cuya hora pico fue de 17H15 a 18H15 con un volumen de 3832 vehículos y en el cual circularon un total de 28001 automotores en un período comprendido entre 7H00 y 19H00.

- **Ubicación:** Centro-Norte de la ciudad de Guayaquil.
- **Dirección de circulación:** Sentido sur-norte.
- **Año de inauguración:** 2002
- **Longitud:** 540 m
- **Número de carriles:** 3 carriles
- **Ancho de carriles:** 3.25 m

A continuación, se muestra la zona de estudio:



**Figura 16.** Vista satelital y distribución del túnel del cerro Santa Ana.

Nota. Extraída de Google Maps.

**Tabla 7.** Conteo de vehículos en la Av. 12 NE Malecón Simón Bolívar y que pasan por el túnel cerro Santa Ana.

<b>CONTEO DE VEHÍCULOS</b>					
<b>LUGAR:</b>	<b>TUNEL CERRO SANTA ANA DESDE AV. 12 NE (MALECÓN SIMÓN BOLÍVAR)</b>				
<b>SENTIDO:</b>	<b>HASTA JUAN JAVIER MARCOS Y AGUIRRE</b>				
<b>FECHA:</b>	<b>NOVIEMBRE 12 DEL 2021</b>				
<b>HORA</b>	<b>LIVIANOS</b>	<b>PESADOS</b>	<b>BUSES</b>	<b>TOTAL</b>	<b>VOL/HORA</b>
7:00 - 7:15	379	3	8	390	0
7:15 - 7:30	385	5	4	394	0
7:30 - 7:45	411	6	9	426	0
7:45 - 8:00	401	6	7	414	1624
8:00 - 8:15	521	4	6	531	1765
8:15 - 8:30	580	7	8	595	1966
8:30 - 8:45	543	4	6	553	2093
8:45 - 9:00	496	6	7	509	2188
9:00 - 9:15	461	7	4	472	2129
9:15 - 9:30	379	6	4	389	1923
9:30 - 9:45	356	5	4	365	1735
9:45 - 10:00	391	6	8	405	1631
10:00 - 10:15	331	9	8	348	1507
10:15 - 10:30	432	11	6	449	1567
10:30 - 10:45	403	7	5	415	1617
10:45 - 11:00	452	6	5	463	1675
11:00 - 11:15	468	7	7	482	1809
11:15 - 11:30	477	9	6	492	1852
11:30 - 11:45	402	7	4	413	1850
11:45 - 12:00	489	9	7	505	1892
12:00 - 12:15	501	8	4	513	1923
12:15 - 12:30	397	9	5	411	1842
12:30 - 12:45	541	5	6	552	1981
12:45 - 13:00	511	7	4	522	1998
13:00 - 13:15	639	9	7	655	2140
13:15 - 13:30	647	3	4	654	2383
13:30 - 13:45	654	6	5	665	2496
13:45 - 14:00	711	6	7	724	2698
14:00 - 14:15	539	6	4	549	2592
14:15 - 14:30	618	6	7	631	2569
14:30 - 14:45	601	8	3	612	2516
14:45 - 15:00	519	6	5	530	2322
15:00 - 15:15	542	6	7	555	2328
15:15 - 15:30	549	9	7	565	2262
15:30 - 15:45	558	10	4	572	2222
15:45 - 16:00	562	6	8	576	2268
16:00 - 16:15	534	11	4	549	2262
16:15 - 16:30	667	8	2	677	2374
16:30 - 16:45	638	6	4	648	2450
16:45 - 17:00	794	8	8	810	2684
17:00 - 17:15	859	7	5	871	3006
17:15 - 17:30	945	9	7	961	3290
17:30 - 17:45	884	5	7	896	3538
17:45 - 18:00	1022	6	10	1038	3766
18:00 - 18:15	924	6	7	937	<b>3832</b>
18:15 - 18:30	811	4	8	823	3694
18:30 - 18:45	732	8	7	747	3545
18:45 - 19:00	741	4	3	748	3255
				<b>28001</b>	

Nota. Elaboración propia.

**Tabla 8.** Hora pico correspondiente al túnel del Cerro Santa Ana.

<b>Túnel Cerro Santa Ana</b>				
<b>HORA PICO</b>	<b>LIVIANOS</b>	<b>PESADOS</b>	<b>BUSES</b>	<b>TOTAL</b>
<b>17:15 - 17:30</b>	<b>945</b>	<b>9</b>	<b>7</b>	<b>961</b>
<b>17:30 - 17:45</b>	<b>884</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>896</b>
<b>17:45 - 18:00</b>	<b>1022</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>1038</b>
<b>18:00 - 18:15</b>	<b>924</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>937</b>
				<b>3832</b>

Nota. Elaboración propia.

**Tabla 9.** Datos geométricos para autopistas de varios carriles según HCM

<i>Geometric Data—Multilane Highway Segments</i>		
<b>Free-flow speed (mi/h)</b>	Direct speed measurements, estimate from design speed or speed limit	Base free-flow speed: speed limit + 5 mi/h (range 45–70 mi/h)
<b>Number of mainline freeway lanes (one direction)</b>	Road inventory, aerial photo	At least 2
Lane width (ft)	Road inventory, aerial photo	12 ft (range 10–12 ft)
Right-side lateral clearance (ft)	Road inventory, aerial photo	6 ft (range 0–6 ft)
Median (left-side) lateral clearance (ft)	Road inventory, aerial photo	6 ft (range 0–6 ft)

Nota. Obtenido del Manual de Capacidades de carreteras (HCM) del capítulo 12 para autopistas de varios carriles.

Nota específica. Las mismas condiciones excepto la del ancho del carril se van a repetir en los otros túneles debido a que se toman como autopistas de varios carriles.

1. El factor de hora pico (**PHF**):

$$PHF = \frac{V}{V_{15\text{máx}} * 4}$$

$$PHF = \frac{3832}{1038 * 4}$$

$$PHF = 0,92$$

## 2. FFS (Free Flow Speed) o Velocidad de flujo libre:

$$FFS: BFFS - Flw - Ftlc - Fm - Fa$$

- **BFFS: Velocidad de flujo libre base**, dado que la regulación municipal de Guayaquil tiene como velocidad máxima de circulación **50 km/h** o **31,25 mi/h** la capacidad esta reducida artificialmente por imposición, pero por diseño y según el HCM los "multilanes" o autopista de varios carriles tienen como velocidad mínima **45 mi/h** o **72,4 km/h** por lo que se procede a calcular bajo este parámetro.
- **Flw: Factor de ajuste por ancho de carril**, el ancho del carril en el túnel es de 3.25m o 10.66 ft, por lo tanto, el Flw es de **6.6mi/h**.

**Tabla 10.** Factor de ajuste por ancho de carril

Average Lane Width (ft)	Reduction in FFS, $f_{lw}$ (mi/h)
≥12	0.0
≥11-12	1.9
≥10-11	6.6

Nota. Obtenido del Manual de Capacidades de carreteras (HCM) del capítulo 12 para autopistas de varios carriles.

- **Ftlc: Factor de ajuste por ancho de visibilidad**, El valor asumido para este factor será de **0** porque los anchos de visibilidad son muy pequeños y no hay obstrucciones en el túnel para considerar un valor predeterminado, no hay un apartado en HCM para este factor en autopistas de 3 carriles.
- **Fm: Factor de ajuste por tipo de división**, como esta es una vía dividida el factor de ajuste es **0**.

**Tabla 11.** Factor de ajuste por tipo de división.

Median Type	Reduction in FFS, $f_M$ (mi/h)
Undivided	1.6
TWLT	0.0
Divided	0.0

Nota. Obtenido del Manual de Capacidades de carreteras (HCM) del capítulo 12 para autopistas de varios carriles.

- **Fa: Factor de ajuste por densidad de puntos de acceso por kilómetro**, se asume como **0** debido a que no se encuentran puntos de acceso en todo el largo del túnel además de la entrada por la Av Malecón Simón Bolívar.

**Tabla 12.** Factor de ajuste por densidad de puntos de acceso.

Access Point Density (access points/mi)	Reduction in FFS, $f_A$ (mi/h)
0	0.0
10	2.5
20	5.0
30	7.5
≥40	10.0

Note: Interpolation to the nearest 0.1 is recommended.

Nota. Obtenido del Manual de Capacidades de carreteras (HCM) del capítulo 12 para autopistas de varios carriles.

Con los datos anteriores se calcula la velocidad de flujo libre en millas para concordar con las unidades del HCM y poder relacionar con las curvas de velocidad y densidad de flujo:

$$FFS: 45 - 6.6 - 0 - 0 - 0$$

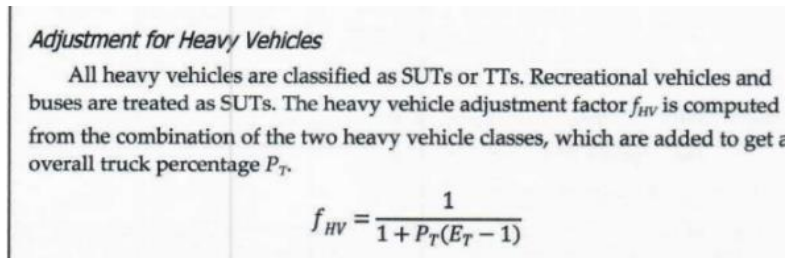
$$FFS: 38,4 \text{ mi/h}$$

*Es la velocidad de flujo libre del túnel del Cerro Santa Ana.*

### 3. Ajuste del volumen de demanda

$$V_p = \frac{V}{PHF * N * f_{HV}}$$

- Donde **V** es el volumen de vehículos dentro de la hora pico = **3832 veh/h**.
- **PHF**: factor de hora pico = **0,92**.
- **N (número de carriles) = 3 carriles**
- **F<sub>hV</sub>**= Es un factor de ajuste por presencia de vehículos pesados y se calcula de la siguiente forma:



**Figura 17.** Fórmula para el factor de ajuste por presencia de vehículos pesados.

Nota. Obtenido del Manual de Capacidades de carreteras (HCM) del capítulo 12 para autopistas de varios carriles.

- Donde **PT** es la proporción de vehículos pesados y buses, que durante la hora pico fueron un total de **57** de **3832** dando una proporción respecto al volumen dentro de la hora pico de **0,014** o **1,4%**.
- **ET** es un equivalente de pasajero por vehículo pesado en tránsito que es clasificado por el tipo de terreno, level o a nivel en el caso de no haber pendientes mayores al 2% y los vehículos pesados pueden circular a su velocidad normal y rolling es cuando existe un terreno ondulado o con pendientes mayores al 2% que causan que el vehículo pesado tenga que reducir su velocidad.

**Tabla 13.** Equivalencia de pasajero por vehículo pesado debido al tipo de terreno.

Passenger Car Equivalent	Terrain Type	
	Level	Rolling
$E_T$	2.0	3.0

Nota. Obtenido del Manual de Capacidades de carreteras (HCM) del capítulo 12 para autopistas de varios carriles.

Se realiza el cálculo:

$$F_{hv} = \frac{1}{1 + PT(ET - 1)}$$

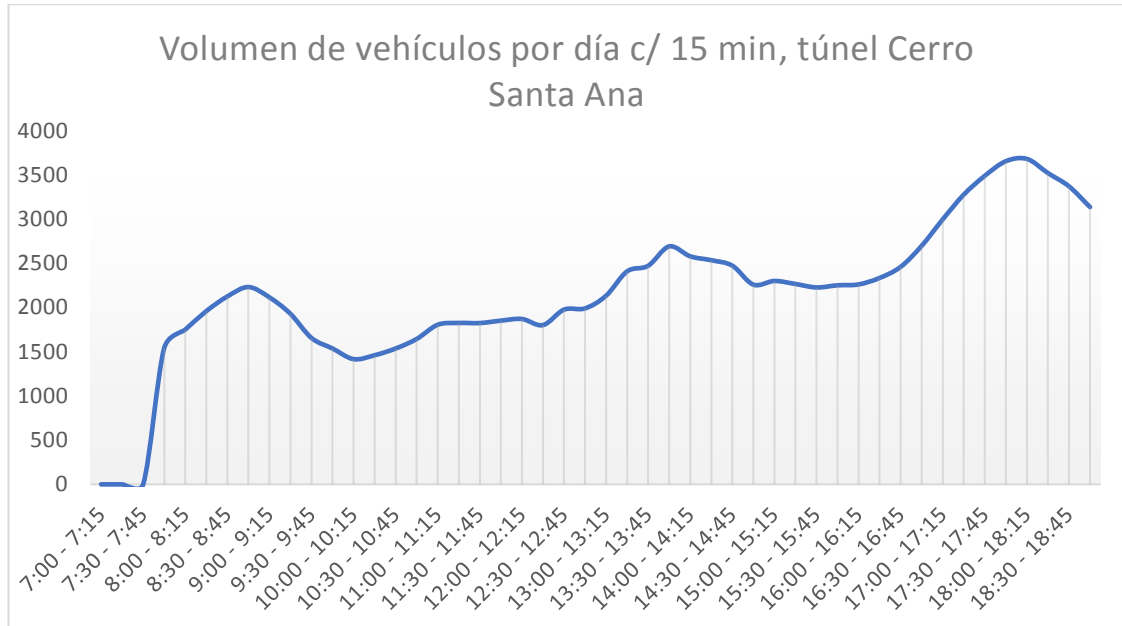
$$F_{hv} = \frac{1}{1 + 0,014(2 - 1)}$$

$$F_{hv} = 0,986$$

## Volumen de demanda de vehículos

$$Vp = \frac{3832}{0,92 * 3 * 0,986}$$

$$Vp = 1408,11 \text{ veh/h}$$



**Figura 18.** Gráfico representativo del volumen de vehículos por hora de túnel del Cerro Santa Ana conteo del día 1.

Nota. Elaboración propia

## 4. Capacidad del túnel

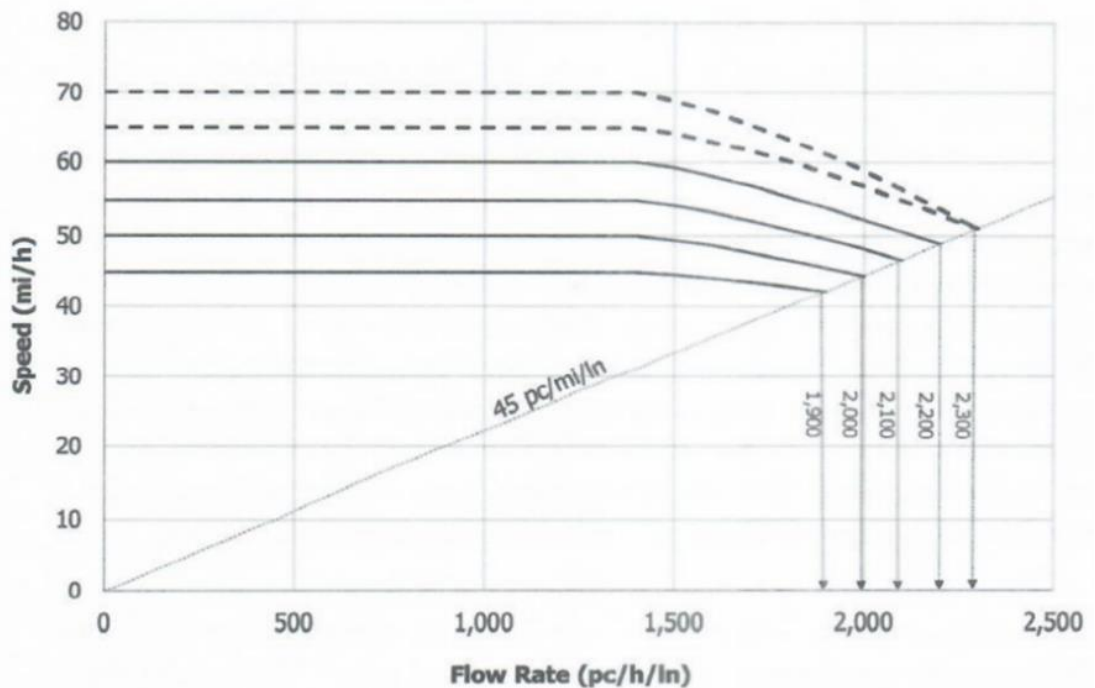
Para el cálculo de la capacidad del túnel se hace el análisis mediante la relación de velocidades y flujo de vehículos utilizando el HCM.

**Tabla 14.** Capacidad de vehículos según su velocidad de flujo libre.

FFS (mi/h)	Capacity of Basic Freeway Segments (pc/h/ln)	Capacity of Multilane Highway Segments (pc/h/ln)
75	2,400	NA
70	2,400	2,300 <sup>a</sup>
65	2,350	2,300 <sup>a</sup>
60	2,300	2,200
55	2,250	2,100
50	NA	2,000
45	NA	1,900



Nota. Obtenido del Manual de Capacidades de carreteras (HCM) del capítulo 12 para autopistas de varios carriles.



**Figura 19.** Gráfico de curvas de velocidad y flujo vehicular para obtener la capacidad.

Nota. Obtenido del Manual de Capacidades de carreteras (HCM) del capítulo 12 para autopistas de varios carriles.

- La velocidad de flujo libre obtenida anteriormente es de **38,4 mi/h**, obteniendo una capacidad a partir de la Figura 19 de **1700 veh/h por carril**.
- Este valor obtenido se multiplica por 3 (número de carriles) **para obtener la capacidad máxima del túnel**,  $1700 * N = 100 * 3 = 5100 \text{ veh/h}$ .
- **3832 veh/h** que es el volumen máximo horario se divide para el número de carriles para obtener la capacidad máxima por carril,  $3832/3 = 1277,33 \text{ veh/h}$
- **1700 veh/h** comparado con la capacidad máxima por carril del túnel de **1277 veh/h**, en porcentaje representa:  $(1277 * 100) / 1700 = 75,11\%$
- **El túnel del Cerro Santa Ana está operando al 75,11% de su capacidad total actualmente.**

## 5. Densidad y Nivel de servicio de la vía del túnel

**Tabla 15.** Determinación de nivel de servicio con respecto a la densidad de vehículos.

LOS	Density (pc/mi/ln)
A	≤11
B	>11-18
C	>18-26
D	>26-35
E	>35-45
F	Demand exceeds capacity OR density > 45

Nota. Obtenido del Manual de Capacidades de carreteras (HCM) del capítulo 12 para autopistas de varios carriles.

$$D = \frac{Vp}{S}$$

Para el cálculo de densidad y nivel de servicio de la vía se consideran las siguientes variables donde:

- **D:** Densidad de vehículos (veh/mi)
- **Vp:** Volumen de demanda
- **S:** Velocidad media de tránsito en la vía, que para efectos de diseño se calcula con la velocidad de flujo libre base de **45 mi/h.**

$$D = \frac{1408,11}{45}$$

$$D = 31,29 \frac{\text{veh}}{\text{mi}} / c$$

- El túnel se encuentra en el nivel de servicio **D** es decir la demanda de vehículos no va a exceder a la capacidad.
- Si se realiza el mismo cálculo, pero para la velocidad impuesta por la ATM de Guayaquil que es **50 km/h o 31,25 mi/h** que al ser una velocidad baja de operación el ancho del carril no va a afectar es decir se puede despreciar la

reducción con los factores de corrección, disminuyendo su capacidad de **1700 veh/h a 1400 veh/h.**

$$D = \frac{1408,11}{31,25}$$

$$D = 45,05 \frac{\text{veh}}{\text{mi}}/c$$

- Si se mantiene a **50 km/h o 31,25 mi/h** la vía en su hora de máxima demanda estará en un nivel de servicio **F** es decir que representa una circulación congestionada ya que el volumen de demanda será mayor al de capacidad de la vía y el flujo va a ser muy irregular y hay altos niveles de contaminación.

### 3.4.1 Capacidad y nivel de servicio del túnel del Cerro Santa Ana a 5 y 10 años.

Se va a calcular la proyección vehicular con los factores de la Tabla 4 para determinar cuál será la capacidad y nivel de servicio del túnel del cerro Santa Ana en los próximos 5 y 10 años respectivamente, se tomará como referencia el año 2021 que fue cuando se hicieron los conteos y la capacidad máxima de **1277 veh/h.**

**Tabla 16.** Proyección vehicular del túnel Santa Ana a 5 y 10 años respectivamente.

Años	Proyección a:		r	Factor	Cantidad de vehículos
2021	-	-	-	-	1277
2026	P5		3.25%	1,173668	1499
2031	P10		3.86%	1,460352	1865

Nota. Elaboración propia.

- A **5 años** la capacidad máxima será de **1499 veh/h**, si se mantiene la velocidad a 72,4 km/h o **38,4 mi/h** con los factores de reducción y si se

compara con la capacidad máxima de **1700 veh/h**, (1499/1700) **el túnel del Cerro Santa Ana estará operando al 88% de su capacidad máxima.**

- $1499 * N$  (número de carriles) =  $1499 * 3 = 4497$  **veh/h capacidad total máxima.** Calculando el volumen de demanda a 5 años se obtiene:

$$Vp = \frac{4497}{0,92 * 3 * 0,986}$$

$$Vp = 1652,48 \text{ veh/h}$$

- **Se procede a calcular la densidad y nivel de servicio a 5 años:**

$$D = \frac{1652,48}{45}$$

$$D = 36,72 \frac{\text{veh}}{\text{mi}} / c$$

- El túnel del Cerro Santa Ana en 5 años se va a encontrar en el nivel de servicio **E** si se mantiene la velocidad de **38,4 mi/h**, por lo que el túnel estaría cerca de operar a su capacidad total, el flujo será sin interrupciones, pero cualquier perturbación en el camino causaría congestión.
- Si se hace el cálculo con la velocidad impuesta por la ATM de **50 km/h o 31,25 mi/h** en 5 años:

$$D = \frac{1652,48}{31,25}$$

$$D = 52,87 \frac{\text{veh}}{\text{mi}} / c$$

- El nivel de servicio será **F** y va a ver congestión severo y muchas más concentraciones de contaminantes por lo que no sería recomendable mantener esta velocidad en 5 años.
- A **10 años** la capacidad máxima será de **1865 veh/h** si se mantiene la velocidad a 72,4 km/h o **38,4 mi/h** con los factores de reducción y si se compara con la capacidad máxima de **1700 veh/h**, el túnel con esta velocidad va a estar totalmente congestionado, ya que sobrepasa la capacidad máxima.
- $1865 * N$  (número de carriles) =  $1865 * 3 = 5595$  **veh/h capacidad total máxima.** Calculando el volumen de demanda a 10 años se obtiene:

$$Vp = \frac{5595}{0,92 * 3 * 0,986}$$

$$Vp = 2055,95 \text{ veh/h}$$

- Se procede a calcular la densidad y nivel de servicio a 10 años:

$$D = \frac{2055,95}{45}$$

$$D = 45,68 \frac{\text{veh}}{\text{mi}}/c$$

- El túnel del Cerro Santa Ana en 10 años se va a encontrar en el nivel de servicio **F** si se mantiene la velocidad de **38,4 mi/h**, por lo que la demanda excede a la capacidad, el flujo será interrumpido, causando congestión y largas colas de vehículos.

### 3.5 Cuento de vehículos en el túnel del Cerro del Carmen

Para el cálculo del volumen de capacidad del túnel cuya vía está constituida por 3 carriles, se tomó como referencia el conteo realizado el miércoles 17 de noviembre del 2021 cuya hora pico fue de 10H15 a 11H15 con un volumen de 3575 vehículos y en el cual circularon un total de 32571 automotores en el período comprendido entre 7H00 y 19H00.

- **Ubicación:** Centro-Norte de la ciudad de Guayaquil.
- **Dirección de circulación:** Sentido norte-sur.
- **Año de inauguración:** 2003
- **Longitud:** 745 m
- **Número de carriles:** 3 carriles
- **Ancho de carriles:** 3.38 m

A continuación, se muestra la zona de estudio:



**Figura 20.** Vista satelital y distribución del túnel del cerro Del Carmen.

Nota. Extraída de Google mapas.

**Tabla 17.** Conteo de vehículos en la Av. 6 Boyacá y que pasan por el túnel cerro del Carmen, el miércoles 17 de noviembre de 2021, obteniendo la hora pico de 10H15 a 11H15 con un volumen de 3575 vehículos.

<b>CONTEO DE VEHÍCULOS</b>					
<b>LUGAR:</b>	<b>TUNEL CERRO DEL CARMEN DESDE JUAN JAVIER MARCOS Y AGUIRRE</b>				
<b>SENTIDO:</b>	<b>HASTA AV. 6 (BOYACÁ)</b>				
<b>FECHA:</b>	<b>NOVIEMBRE 17 DEL 2021</b>				
<b>HORA</b>	<b>LIVIANOS</b>	<b>PESADOS</b>	<b>BUSES</b>	<b>TOTAL</b>	<b>VOL/HORA</b>
7:00 - 7:15	662	6	5	673	0
7:15 - 7:30	517	9	6	532	0
7:30 - 7:45	444	4	4	452	0
7:45 - 8:00	500	3	5	508	2165
8:00 - 8:15	731	5	0	736	2228
8:15 - 8:30	412	3	2	417	2113
8:30 - 8:45	462	2	6	470	2131
8:45 - 9:00	705	8	4	717	2340
9:00 - 9:15	752	4	5	761	2365
9:15 - 9:30	641	2	7	650	2598
9:30 - 9:45	828	4	5	837	2965
9:45 - 10:00	804	3	6	813	3061
10:00 - 10:15	776	4	9	789	3089
10:15 - 10:30	878	8	6	892	3331
10:30 - 10:45	780	4	8	792	3286
10:45 - 11:00	839	5	5	849	3322
11:00 - 11:15	1028	9	5	1042	<b>3575</b>
11:15 - 11:30	840	5	7	852	3535
11:30 - 11:45	702	6	6	714	3457
11:45 - 12:00	681	8	8	697	3305
12:00 - 12:15	892	6	6	904	3167
12:15 - 12:30	724	10	7	741	3056
12:30 - 12:45	718	10	7	735	3077
12:45 - 13:00	626	5	2	633	3013
13:00 - 13:15	523	5	4	532	2641
13:15 - 13:30	735	1	5	741	2641
13:30 - 13:45	609	5	2	616	2522
13:45 - 14:00	484	6	6	496	2385
14:00 - 14:15	650	4	3	657	2510
14:15 - 14:30	643	7	6	656	2425
14:30 - 14:45	640	9	3	652	2461
14:45 - 15:00	687	13	3	703	2668
15:00 - 15:15	776	10	4	790	2801
15:15 - 15:30	655	4	5	664	2809
15:30 - 15:45	705	5	3	713	2870
15:45 - 16:00	628	5	3	636	2803
16:00 - 16:15	595	7	3	605	2618
16:15 - 16:30	578	4	5	587	2541
16:30 - 16:45	753	9	8	770	2598
16:45 - 17:00	601	0	3	604	2566
17:00 - 17:15	699	9	4	712	2673
17:15 - 17:30	681	8	3	692	2778
17:30 - 17:45	668	3	2	673	2681
17:45 - 18:00	625	9	3	637	2714
18:00 - 18:15	553	9	4	566	2568
18:15 - 18:30	585	11	5	601	2477
18:30 - 18:45	536	2	1	539	2343
18:45 - 19:00	512	6	5	523	2229
				<b>32571</b>	

Nota. Elaboración propia.

**Tabla 18.** Hora pico correspondiente al túnel del Cerro del Carmen.

<b>Túnel Cerro del Carmen</b>				
<b>HORA PICO</b>	<b>LIVIANOS</b>	<b>PESADOS</b>	<b>BUSES</b>	<b>TOTAL</b>
<b>10:15 - 10:30</b>	<b>878</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>892</b>
<b>10:30 - 10:45</b>	<b>780</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>792</b>
<b>10:45 - 11:00</b>	<b>839</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>849</b>
<b>11:00 - 11:15</b>	<b>1028</b>	<b>9</b>	<b>5</b>	<b>1042</b>
				<b>3575</b>

Nota. Elaboración propia,

A continuación, se realizarán los cálculos:

1. El factor de hora pico (**PHF**):

$$PHF = \frac{V}{V_{15m\acute{a}x} * 4}$$

$$PHF = \frac{3575}{1042 * 4}$$

$$PHF = 0,85$$

1. **FFS (Free Flow Speed) o Velocidad de flujo libre:**

$$FFS: BFFS - Flw - F_{tlc} - F_m - F_a$$

- **BFFS: Velocidad de flujo libre base**, dado que la regulación municipal de Guayaquil tiene como velocidad máxima de circulación **50 km/h** o **31,25 mi/h** la capacidad esta reducida artificialmente por imposición, pero por diseño y según el HCM los "multilanes" o autopista de varios carriles tienen como velocidad mínima **45 mi/h** o **72,4 km/h** por lo que se procede a calcular bajo este parámetro.
- **Flw: Factor de ajuste por ancho de carril**, el ancho del carril en el túnel es de 3.36m o 11,02 ft, por lo tanto, el Flw es de 1,9mi/h según la tabla 8.
- **Todos los demás factores se mantienen iguales al del túnel anterior debido a que sus condiciones son similares.**

- **FFS: 45 - 1,9 - 0 - 0 - 0**



- **FFS: 43,1 mi/h**

## 2. Ajuste del volumen de demanda

$$Vp = \frac{V}{PHF * N * fHV}$$

- Donde **V** es el volumen de vehículos dentro de la hora pico = **3575 veh/h.**
- **PHF:** factor de hora pico = **0,85.**
- **N (número de carriles) = 3 carriles**
- **Fhv=** Factor de ajuste por presencia de vehículos pesados se calcula de la siguiente forma:  
 -Donde **PT** es la proporción de vehículos pesados y buses, que durante la hora pico fueron un total de 50 de 3575 dando una proporción dentro de la hora pico de **0,013.**
- **ET = 2**

$$Fhv = \frac{1}{1 + PT(ET - 1)}$$

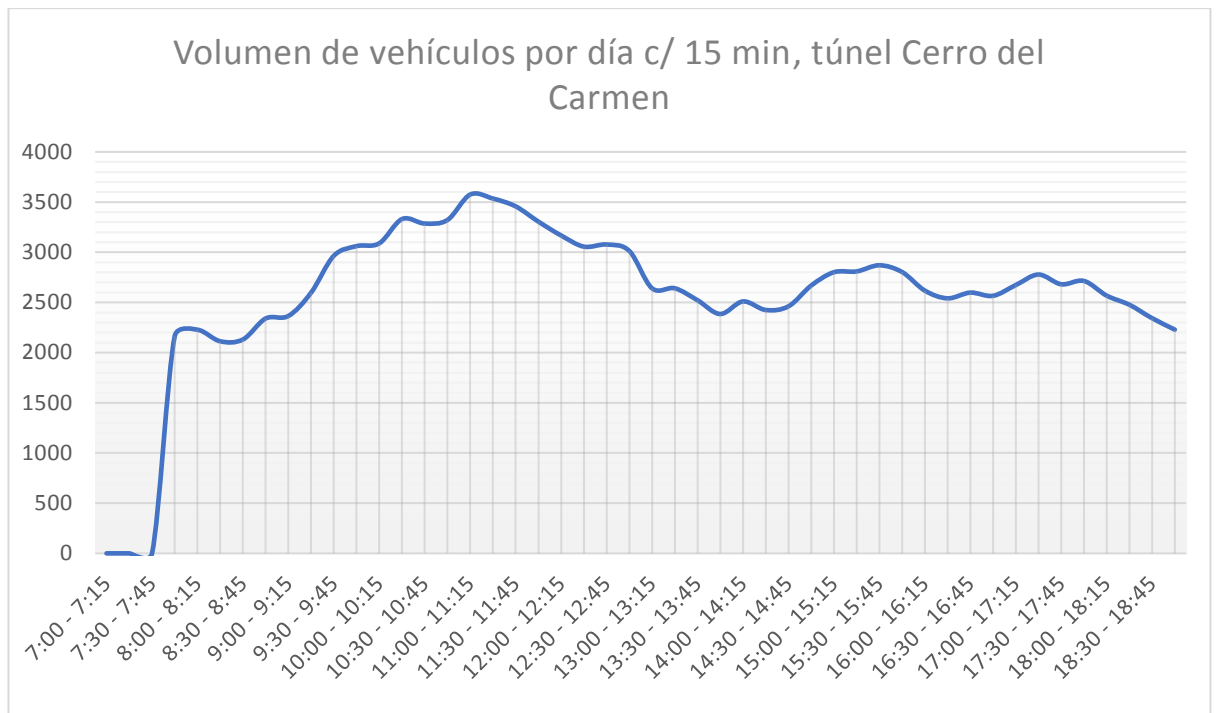
$$Fhv = \frac{1}{1 + 0,013(2 - 1)}$$

$$Fhv = 0,986$$

### Volumen de demanda de vehículos

$$Vp = \frac{3575}{0,85 * 3 * 0,986}$$

$$Vp = 1421,86 \text{ veh/h}$$



**Figura 21.** Gráfico de volumen de vehículos por hora del túnel cerro del Carmen día 1.

Nota. Elaboración propia.

### 3. Capacidad del túnel

- La velocidad de flujo libre obtenida anteriormente es de **43,1 mi/h**, obteniendo una capacidad a partir de la Figura 19 de **1800 veh/h por carril**.
- Este valor obtenido se multiplica por 3 (número de carriles) **para obtener la capacidad máxima del túnel**,  $1800 * N = 1800 * 3 = 5400 \text{ veh/h}$ .
- **3575 veh/h** que es el volumen máximo horario se divide para el número de carriles para obtener la capacidad máxima por carril,  $3575/3 = 1191,66 \text{ veh/h}$
- **1800 veh/h** comparado con la capacidad máxima por carril del túnel de **1191 veh/h**, en porcentaje representa:  $(1191 * 100) / 1800 = 66,16\%$
- **El túnel del Cerro Del Carmen está operando al 66,16% de su capacidad total actualmente.**

### 4. Densidad y Nivel de servicio de la vía

$$D = \frac{V_p}{S}$$

Para el cálculo de densidad y nivel de servicio de la vía se consideran las siguientes variables donde:

- **D:** Densidad de vehículos (veh/km)
- **V<sub>p</sub>:** Volumen de demanda
- **S:** Velocidad media de tránsito en la vía, que para efectos de diseño se calcula con la velocidad de flujo libre base de **45 mi/h**.

$$D = \frac{1420,42}{45}$$

$$D = 31,56 \frac{\text{veh}}{\text{mi}}/c$$

- Según la Tabla 13 el túnel se encuentra en el nivel de servicio **D** es decir la demanda de vehículos no va a exceder a la capacidad
- Si se realiza el mismo cálculo, pero para la velocidad impuesta por la ATM de Guayaquil que es **50 km/h o 31,25 mi/h** que al ser una velocidad baja de operación el ancho del carril no va a afectar es decir se puede despreciar la reducción con los factores de corrección, disminuyendo su capacidad de **1800 veh/h a 1400 veh/h**.

$$D = \frac{1420,42}{31,25}$$

$$D = 45,45 \frac{\text{veh}}{\text{mi}}/c$$

- Según la tabla 13 si se mantiene a **50 km/h o 31,25 mi/h** la vía en su hora de máxima demanda estará en un nivel de servicio **F** es decir que va a representar una circulación congestionada ya que el volumen de demanda será mayor al de capacidad de la vía y el flujo va a ser muy irregular y hay altos niveles de contaminación.

### 3.5.1 Capacidad y nivel de servicio del túnel del Cerro Del Carmen a 5 y 10 años.

Se va a calcular la proyección vehicular con los factores de la Tabla 4 para determinar cuál será la capacidad y nivel de servicio del túnel del Cerro Del Carmen en los próximos 5 y 10 años respectivamente, se tomará como referencia el año 2021 que fue cuando se hicieron los conteos y la capacidad máxima de **1191 veh/h**.

**Tabla 19.** Proyección vehicular del túnel Cerro Del Carmen a 5 y 10 años respectivamente.

Años	Proyección a:		r	Factor	Cantidad de vehículos
2021	-	-	-	-	1191
2026	P5		3.25%	1,173668	1397
2031	P10		3.86%	1,460352	1739

Nota. Elaboración propia.

- A **5 años** la capacidad máxima será de **1397 veh/h** si se mantiene la velocidad a 72,4 km/h o **43,1 mi/h** con los factores de reducción y si se compara con la capacidad máxima de **1800 veh/h**, (1397/1800) **el túnel del Cerro Del Carmen estará operando al 77% de su capacidad máxima.**
- $1397 * N$  (número de carriles) =  $1499 * 3 = 4191$  **veh/h capacidad total máxima.** Calculando el volumen de demanda a 5 años se obtiene:

$$Vp = \frac{4191}{0,85 * 3 * 0,986}$$

$$Vp = 1666,86 \text{ veh/h}$$

- Se procede a calcular la densidad y nivel de servicio a 5 años:

$$D = \frac{1666,86}{45}$$

$$D = 37,04 \frac{\text{veh}}{\text{mi}} / c$$

- El túnel del Cerro Del Carmen en 5 años se va a encontrar en el nivel de servicio **E** si se mantiene la velocidad de **43,1 mi/h**, por lo que el túnel estaría cerca de operar a su capacidad total, el flujo será sin interrupciones, pero cualquier perturbación en el camino causaría congestión.
- Si se hace el cálculo con la velocidad impuesta por la ATM de **50 km/h o 31,25 mi/h** en **5 años**:

$$D = \frac{1666,86}{31,25}$$

$$D = 53,33 \frac{\text{veh}}{\text{mi}}/c$$

- El nivel de servicio será **F** y va a ver congestión severo y muchas más concentraciones de contaminantes por lo que no sería recomendable mantener esta velocidad en 5 años.
- A **10 años** la capacidad máxima será de **1739 veh/h** si se mantiene la velocidad a 72,4 km/h o **43,1 mi/h** con los factores de reducción y si se compara con la capacidad máxima de **1800 veh/h**, (1739/1800) **el túnel del Cerro Del Carmen estará operando al 96% de su capacidad máxima.**
- $1739 * N$  (número de carriles) =  $1739 * 3 = 5217 \text{ veh/h}$  **capacidad total máxima.** Calculando el volumen de demanda a 10 años se obtiene:

$$Vp = \frac{5217}{0,85 * 3 * 0,986}$$

$$Vp = 2074,93 \text{ veh/h}$$

- **Se procede a calcular la densidad y nivel de servicio a 10 años:**

$$D = \frac{2074,93}{45}$$

$$D = 46,10 \frac{\text{veh}}{\text{mi}}/c$$

- El túnel del Cerro Del Carmen en 10 años se va a encontrar en el nivel de servicio **F** si se mantiene la velocidad de **43,1 mi/h**, por lo que la demanda

excede a la capacidad, el flujo será interrumpido, causando congestión y largas colas de vehículos.

### 3.6 Conteo de vehículos en los túneles del Cerro San Eduardo

#### Sentido sur-norte

Para el cálculo del volumen de capacidad del túnel del cerro San Eduardo en sentido sur-norte desde la Av. Barcelona cuya vía está constituida por 3 carriles, se tomó como referencia el conteo realizado el viernes 26 de noviembre del 2021 cuya hora pico fue de 9:15 a 10:15 con un volumen de 2054 vehículos y en cual circularon un total de 16458 automotores en el período comprendido entre 7H00 y 19H00.

- **Ubicación:** Noroeste de la ciudad de Guayaquil.
- **Dirección de circulación:** Sentidos sur-norte y norte-sur.
- **Año de inauguración:** 2008
- **Longitud:** 1295 m
- **Número de carriles:** 3 carriles
- **Ancho de carriles:** 3.25 m

A continuación, se muestra la zona de estudio:

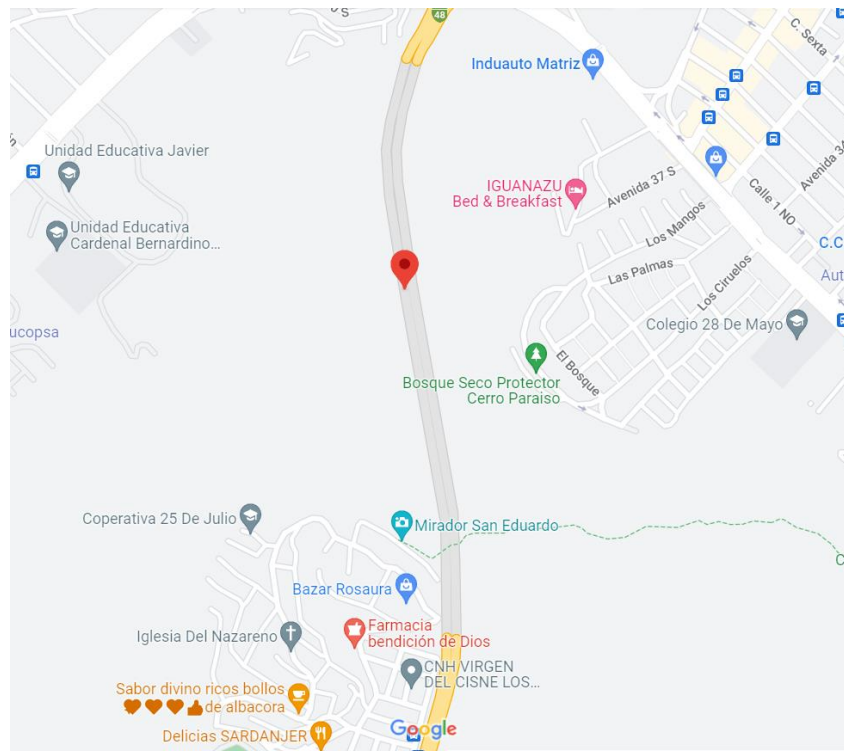


Figura 22. Vista satelital y distribución de los túneles del cerro San Eduardo.

Nota. Extraída de Google Maps.

**Tabla 20.** Conteo de vehículos desde la Av. Barcelona y que pasan por el túnel cerro San Eduardo sentido sur-norte el viernes 26 de noviembre de 2021, obteniendo la hora pico de 9H15 a 10H15 con un volumen de 2054 vehículos.

<b>CONTEO DE VEHÍCULOS</b>					
<b>LUGAR:</b>	TUNEL CERRO SAN EDUARDO DESDE AV BARCELONA				
<b>SENTIDO:</b>	HASTA LA VÍA DAULE				
<b>SENTIDO:</b>	SUR-NORTE				
<b>FECHA:</b>	NOVIEMBRE 26 DEL 2021				
<b>HORA</b>	<b>LIVIANOS</b>	<b>PESADOS</b>	<b>BUSES</b>	<b>TOTAL</b>	<b>VOL/HORA</b>
7:00 - 7:15	346	15	1	362	0
7:15 - 7:30	299	8	2	309	0
7:30 - 7:45	334	12	2	348	0
7:45 - 8:00	225	10	1	236	1255
8:00 - 8:15	488	7	1	496	1389
8:15 - 8:30	389	7	1	397	1477
8:30 - 8:45	411	8	1	420	1549
8:45 - 9:00	498	7	3	508	1821
9:00 - 9:15	358	7	0	365	1690
9:15 - 9:30	584	4	1	589	1882
9:30 - 9:45	445	4	2	451	1913
9:45 - 10:00	510	5	1	516	1921
10:00 - 10:15	488	8	2	498	<b>2054</b>
10:15 - 10:30	479	4	1	484	1949
10:30 - 10:45	466	4	3	473	1971
10:45 - 11:00	489	6	1	496	1951
11:00 - 11:15	401	4	0	405	1858
11:15 - 11:30	455	6	0	461	1835
11:30 - 11:45	383	5	1	389	1751
11:45 - 12:00	492	6	1	499	1754
12:00 - 12:15	365	6	2	373	1722
12:15 - 12:30	422	6	2	430	1691
12:30 - 12:45	253	13	1	267	1569
12:45 - 13:00	266	10	1	277	1347
13:00 - 13:15	224	9	1	234	1208
13:15 - 13:30	244	10	1	255	1033
13:30 - 13:45	198	8	0	206	972
13:45 - 14:00	222	15	1	238	933
14:00 - 14:15	258	19	1	278	977
14:15 - 14:30	231	8	0	239	961
14:30 - 14:45	211	16	1	228	983
14:45 - 15:00	227	18	2	247	992
15:00 - 15:15	215	11	1	227	941
15:15 - 15:30	198	24	2	224	926
15:30 - 15:45	247	14	2	263	961
15:45 - 16:00	233	15	1	249	963
16:00 - 16:15	201	7	1	209	945
16:15 - 16:30	265	12	2	279	1000
16:30 - 16:45	213	7	1	221	958
16:45 - 17:00	257	15	0	272	981
17:00 - 17:15	269	20	1	290	1062
17:15 - 17:30	333	11	1	345	1128
17:30 - 17:45	324	17	1	342	1249
17:45 - 18:00	249	17	0	266	1243
18:00 - 18:15	278	13	2	293	1246
18:15 - 18:30	333	11	1	345	1246
18:30 - 18:45	345	7	0	352	1256
18:45 - 19:00	301	6	0	307	1297
				<b>16458</b>	

Nota. Elaboración propia.



**Tabla 21.** Hora pico correspondiente al túnel San Eduardo sentido sur-norte.

<b>Túnel Cerro San Eduardo sentido sur-norte</b>				
<b>HORA PICO</b>	<b>LIVIANOS</b>	<b>PESADOS</b>	<b>BUSES</b>	<b>TOTAL</b>
<b>9:15 - 9:30</b>	<b>584</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>589</b>
<b>9:30 - 9:45</b>	<b>445</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>451</b>
<b>9:45 - 10:00</b>	<b>510</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>516</b>
<b>10:00 - 10:15</b>	<b>488</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>498</b>
				<b>2054</b>

Nota. Elaboración propia.

- **Número de carriles:** 3 carriles
- **Ancho de carriles:** 3.25 m

A continuación, se realizarán los cálculos:

1. El factor de hora pico (**PHF**):

$$PHF = \frac{V}{V_{15m\acute{a}x} * 4}$$

$$PHF = \frac{2054}{589 * 4}$$

$$PHF = 0,87$$

1. **FFS (Free Flow Speed) o Velocidad de flujo libre:**

$$FFS: BFFS - Flw - Ftlc - Fm - Fa$$

- **BFFS: Velocidad de flujo libre base**, dado que la regulación municipal de Guayaquil tiene como velocidad máxima de circulación **50 km/h** o **31,25 mi/h** la capacidad esta reducida artificialmente por imposición, pero por diseño y según el HCM los "multilanes" o autopista de varios carriles tienen como velocidad mínima **45 mi/h** o **72,4 km/h** por lo que se procede a calcular bajo este parámetro.

- **Flw: Factor de ajuste por ancho de carril**, el ancho del carril en el túnel es de 3.25m o 10,66 ft, por lo tanto, el Flw es de 6,6mi/h.
- **Todos los demás factores se mantienen iguales que el túnel anterior debido a que tiene similares condiciones.**
  - **FFS: 45 – 6,6 – 0 – 0 – 0**
  - **FFS: 38,4 km/h**

## 2. Ajuste del volumen de demanda

$$V_p = \frac{V}{PHF * N * f_{HV}}$$

- Donde **V** es el volumen de vehículos dentro de la hora pico = **2054 veh/h.**
- **PHF:** factor de hora pico = **0,87.**
- **N (número de carriles) = 3 carriles**
- **F<sub>hV</sub>**= Factor de ajuste por presencia de vehículos pesados se calcula de la siguiente forma:
  - Donde **PT** es la proporción de vehículos pesados y buses, que durante la hora pico fueron un total de 27 en 2054 dando una proporción respecto al volumen dentro de la hora pico de **0,013.**
- **ET = 2**

$$F_{hV} = \frac{1}{1 + PT(ET - 1)}$$

$$F_{hV} = \frac{1}{1 + 0,013(2 - 1)}$$

$$F_{hV} = 0,986$$

## Volumen de demanda de vehículos

$$V_p = \frac{2054}{0,87 * 3 * 0,986}$$

$$V_p = 798,14 \text{ veh/h}$$

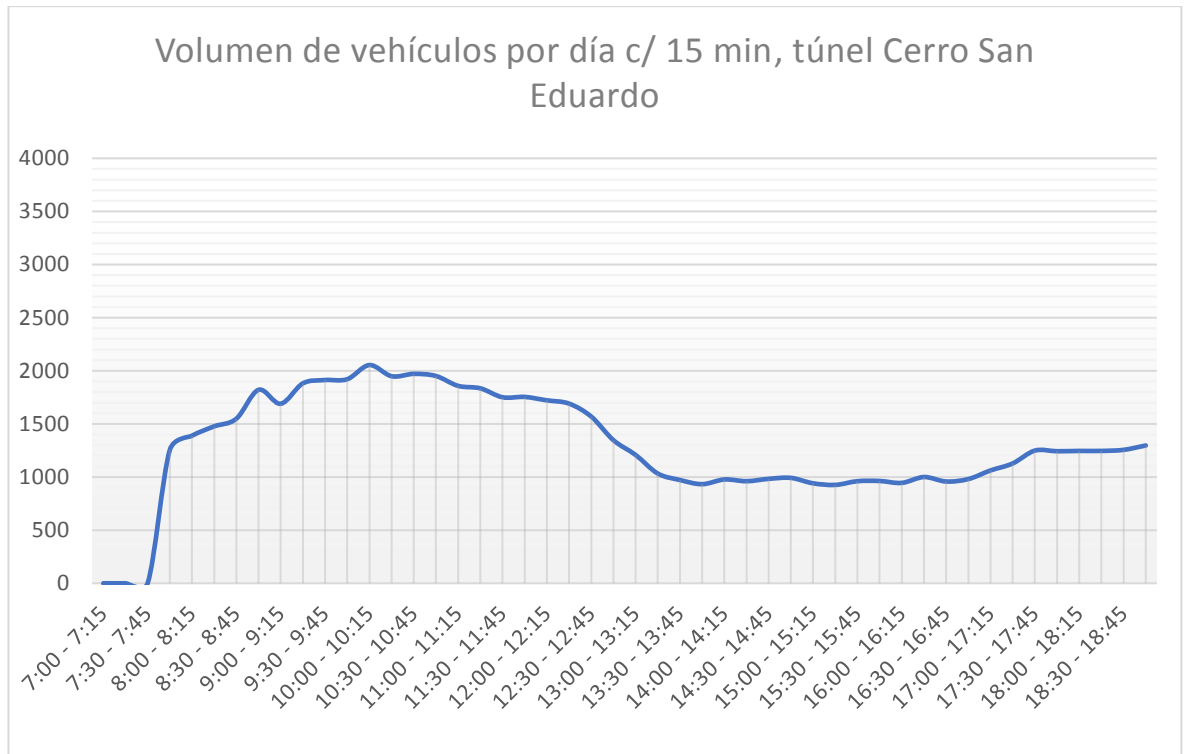


Figura 23. Gráfico de volumen de vehículos por hora del túnel Cerro San Eduardo sentido sur-norte día 2.

Nota. Elaboración propia.

### 3. Capacidad del túnel

- La velocidad de flujo libre obtenida anteriormente es de **36,8 mi/h**, obteniendo una capacidad a partir de la Figura 19 de **1700 veh/h por carril**.
- Este valor obtenido se multiplica por 3 (número de carriles) **para obtener la capacidad máxima del túnel**,  $1700 * N = 1700 * 3 = 5100 \text{ veh/h}$ .
- **2054 veh/h** que es el volumen máximo horario se divide para el número de carriles para obtener la capacidad máxima por carril,  $2054/3 = 684,66 \text{ veh/h}$
- **1700 veh/h** comparado con la capacidad máxima por carril del túnel de **684 veh/h**, en porcentaje representa:  $(684,66 * 100) / 1700 = 40,27\%$
- **El túnel del Cerro San Eduardo SN está operando al 40,27 % de su capacidad total actualmente.**

### 4. Densidad y Nivel de servicio de la vía

$$D = \frac{Vp}{S}$$

- **D:** Densidad de vehículos (veh/km)
- **Vp:** Volumen de demanda
- **S:** Velocidad media de tránsito en la vía, que para efectos de diseño se calcula con la velocidad de flujo libre base de **45 mi/h**.

$$D = \frac{798,14}{45}$$

$$D = 17,73 \frac{\text{veh}}{\text{mi}} / c$$

- Según la Tabla 13 túnel del Cerro San Eduardo SN se encuentra en el nivel de servicio **B** es decir la demanda de vehículos no va a exceder a la capacidad.
- Si se realiza el mismo cálculo, pero para la velocidad impuesta por la ATM de Guayaquil que es **50 km/h o 31,25 mi/h** que al ser una velocidad baja de operación el ancho del carril no va a afectar es decir se puede despreciar la reducción con los factores de corrección, disminuyendo su capacidad de **1700 veh/h a 1400 veh/h**.

$$D = \frac{798,14}{31,25}$$

$$D = 25,54 \frac{\text{veh}}{\text{mi}} / c$$

- Si se mantiene a **50 km/h o 31,25 mi/h** la vía en su hora de máxima demanda estará en un nivel de servicio **D** es decir que el flujo seguiría siendo estable, pero con ciertas interferencias con otros vehículos, la capacidad para maniobrar es moderada.

### 3.6.1 Capacidad y nivel de servicio del túnel del Cerro San Eduardo SN a 5 y 10 años.

Se va a calcular la proyección vehicular con los factores de la Tabla 4 para determinar cuál será la capacidad y nivel de servicio del túnel del Cerro San Eduardo SN en los próximos 5 y 10 años respectivamente, se tomará como referencia el año 2021 que fue cuando se hicieron los conteos y la capacidad máxima de **684 veh/h**.

**Tabla 22.** Proyección vehicular del túnel Cerro San Eduardo SN a 5 y 10 años respectivamente.

<b>Años</b>	<b>Proyección</b> <b>a:</b>		<b>r</b>	<b>Factor</b>	<b>Cantidad de</b> <b>vehículos</b>
<b>2021</b>	-	-	-	-	<b>684</b>
<b>2026</b>	<b>P5</b>		<b>3.25%</b>	<b>1,173668</b>	<b>802</b>
<b>2031</b>	<b>P10</b>		<b>3.86%</b>	<b>1,460352</b>	<b>998</b>

Nota. Elaboración propia.

- A **5 años** la capacidad máxima será de **802 veh/h** si se mantiene la velocidad a 72,4 km/h o **38,4 mi/h** con los factores de reducción y si se compara con la capacidad máxima de **1700 veh/h**, (802/1700) **el túnel del Cerro San Eduardo SN estará operando al 47,17% de su capacidad máxima.**
- $802 * N$  (número de carriles) =  $802 * 3 = 2406 \text{ veh/h}$  **capacidad total máxima.**  
Calculando el volumen de demanda a 5 años se obtiene:

$$Vp = \frac{2406}{0,87 * 3 * 0,986}$$

$$Vp = 934,92 \text{ veh/h}$$

- **Se procede a calcular la densidad y nivel de servicio a 5 años:**

$$D = \frac{934,92}{45}$$

$$D = 20,76 \frac{\text{veh}}{\text{mi}} / c$$

- El túnel del Cerro San Eduardo SN en 5 años se va a encontrar en el nivel de servicio **C** si se mantiene la velocidad de **38,4 mi/h**, el flujo será continuo, no habrá congestionamiento, pero la capacidad de maniobrar será moderada.
- Si se hace el cálculo con la velocidad impuesta por la ATM de **50 km/h o 31,25 mi/h** en 5 años:

$$D = \frac{934,92}{31,25}$$

$$D = 29,91 \frac{\text{veh}}{\text{mi}}/c$$

- El nivel de servicio será **D**, el flujo será ininterrumpido, la capacidad de maniobrar es aún más moderada si se mantiene esta velocidad en 5 años.
- A **10 años** la capacidad máxima será de **998 veh/h** si se mantiene la velocidad a 72,4 km/h o **38,4 mi/h** con los factores de reducción y si se compara con la capacidad máxima de **1700 veh/h**, (998/1700) **el túnel del Cerro San Eduardo SN estará operando al 58% de su capacidad máxima.**
- $998 * N$  (número de carriles) =  $998 * 3 = 2994 \text{ veh/h}$  **capacidad total máxima.**  
Calculando el volumen de demanda a 10 años se obtiene:

$$Vp = \frac{2994}{0,87 * 3 * 0,986}$$

$$Vp = 1163,41 \text{ veh/h}$$

- **Se procede a calcular la densidad y nivel de servicio a 10 años:**

$$D = \frac{1163,41}{45}$$

$$D = 25,85 \frac{\text{veh}}{\text{mi}}/c$$

- Según la Tabla 13 el túnel del Cerro San Eduardo SN en 10 años se va a encontrar en el nivel de servicio **D** si se mantiene la velocidad de **38,4 mi/h**, el flujo seguiría siendo estable, pero con ciertas interferencias con otros vehículos, la capacidad para maniobrar es moderada.
- Si se hace el cálculo con la velocidad impuesta por la ATM de **50 km/h o 31,25 mi/h** en **10 años:**

$$D = \frac{1163,41}{31,25}$$

$$D = 37,22 \frac{\text{veh}}{\text{mi}}/c$$

- El nivel de servicio será **E**, por lo que el túnel estaría cerca de operar a su capacidad total, el flujo será sin interrupciones, pero cualquier perturbación en el camino causaría congestión. si se mantiene esta velocidad en 10 años.

### **Sentido norte-sur**

Para el cálculo del volumen de capacidad del túnel del cerro San Eduardo en sentido norte-sur desde la vía Daule hacia la Av Barcelona cuya vía está constituida por 3 carriles, se tomó como referencia el conteo realizado el viernes 3 de diciembre del 2021 cuya hora pico fue de 18:00 a 19:00 con un volumen de 2329 vehículos y en cual circularon un total de 19716 automotores en el período comprendido entre 7H00 y 19H00.

**Tabla 23.** Conteo de vehículos desde la Av. Barcelona y que pasan por el túnel cerro San Eduardo sentido norte-sur el viernes 3 de diciembre de 2021, obteniendo la hora pico de 18H00 a 19H00 con un volumen de 2329 vehículos.



<b>CONTEO DE VEHÍCULOS</b>					
<b>LUGAR:</b>	TUNEL CERRO SAN EDUARDO DESDE LA VÍA DAULE				
<b>SENTIDO:</b>	HASTA AV BARCELONA				
<b>FECHA:</b>	NORTE-SUR				
<b>HORA:</b>	DICIEMBRE 3 DEL 2021				
HORA	LIVIANOS	PESADOS	BUSES	TOTAL	
7:00 - 7:15	401	10	1	412	0
7:15 - 7:30	456	12	2	470	0
7:30 - 7:45	479	11	1	491	0
7:45 - 8:00	336	10	2	348	1721
8:00 - 8:15	466	8	2	476	1785
8:15 - 8:30	402	6	1	409	1724
8:30 - 8:45	441	4	0	445	1678
8:45 - 9:00	465	9	2	476	1806
9:00 - 9:15	466	5	1	472	1802
9:15 - 9:30	488	6	1	495	1888
9:30 - 9:45	444	7	0	451	1894
9:45 - 10:00	411	6	1	418	1836
10:00 - 10:15	423	5	2	430	1794
10:15 - 10:30	452	7	2	461	1760
10:30 - 10:45	445	9	1	455	1764
10:45 - 11:00	410	5	2	417	1763
11:00 - 11:15	423	7	0	430	1763
11:15 - 11:30	415	6	1	422	1724
11:30 - 11:45	451	8	0	459	1728
11:45 - 12:00	466	4	2	472	1783
12:00 - 12:15	411	7	1	419	1772
12:15 - 12:30	403	6	1	410	1760
12:30 - 12:45	368	5	2	375	1676
12:45 - 13:00	331	8	2	341	1545
13:00 - 13:15	289	7	0	296	1422
13:15 - 13:30	324	5	1	330	1342
13:30 - 13:45	298	6	2	306	1273
13:45 - 14:00	302	7	2	311	1243
14:00 - 14:15	311	11	0	322	1269
14:15 - 14:30	285	8	1	294	1233
14:30 - 14:45	289	12	2	303	1230
14:45 - 15:00	284	11	1	296	1215
15:00 - 15:15	332	15	0	347	1240
15:15 - 15:30	312	18	2	332	1278
15:30 - 15:45	288	22	1	311	1286
15:45 - 16:00	319	14	2	335	1325
16:00 - 16:15	268	14	0	282	1260
16:15 - 16:30	342	12	1	355	1283
16:30 - 16:45	301	9	2	312	1284
16:45 - 17:00	332	14	1	347	1296
17:00 - 17:15	356	19	0	375	1389
17:15 - 17:30	375	15	2	392	1426
17:30 - 17:45	499	19	1	519	1633
17:45 - 18:00	557	11	0	568	1854
18:00 - 18:15	534	14	2	550	2029
18:15 - 18:30	587	16	1	604	2241
18:30 - 18:45	581	14	2	597	2319
18:45 - 19:00	567	11	0	578	2329
				<b>19716</b>	

Nota. Elaboración propia.

**Tabla 24.** Hora pico correspondiente al túnel San Eduardo sentido norte-sur.

<b>Túnel del Cerro San Eduardo norte-sur</b>				
<b>HORA PICO</b>	<b>LIVIANOS</b>	<b>PESADOS</b>	<b>BUSES</b>	<b>TOTAL</b>
<b>18:00 - 18:15</b>	<b>534</b>	<b>14</b>	<b>2</b>	<b>550</b>
<b>18:15 - 18:30</b>	<b>587</b>	<b>16</b>	<b>1</b>	<b>604</b>
<b>18:30 - 18:45</b>	<b>581</b>	<b>14</b>	<b>2</b>	<b>597</b>
<b>18:45 - 19:00</b>	<b>567</b>	<b>11</b>	<b>0</b>	<b>578</b>
				<b>2329</b>

Nota. Elaboración propia.

- **Ubicación:** Noroeste de la ciudad de Guayaquil.
- **Dirección de circulación:** Sentido norte-sur.
- **Año de inauguración:** 2008
- **Longitud:** 1295 m
- **Número de carriles:** 3 carriles
- **Ancho de carriles:** 3.25 m

A continuación, se realizarán los cálculos:

1. El factor de hora pico (**PHF**):

$$PHF = \frac{V}{V_{15máx} * 4}$$

$$PHF = \frac{2329}{604 * 4}$$

$$PHF = 0,96$$

Según HCM para autopistas de varios carriles Cap.12 el PHF está en un rango de 0,75 y 0,95, por lo que se usa 0,95.

$$PHF = 0,95$$

2. **FFS (Free Flow Speed) o Velocidad de flujo libre:**

$$FFS: BFFS - Flw - Ftlc - Fm - Fa$$

- **BFFS: Velocidad de flujo libre base,**
- **Flw: Factor de ajuste por ancho de carril,** el ancho del carril en el túnel es de 3.25m o 10,66 ft, por lo tanto, el Flw es de **6,6mi/h**

- Todos los demás factores se mantienen iguales que el cálculo del túnel anterior debido a que tiene similares condiciones.

$$FFS: 45 - 6,6 - 0 - 0 - 0$$

$$FFS: 38,4 \text{ km/h}$$

### 3. Ajuste del volumen de demanda

$$Vp = \frac{V}{PHF * N * fHV}$$

- Donde **V** es el volumen de vehículos dentro de la hora pico = **2329 veh/h.**
- **PHF:** factor de hora pico = **0,95.**
- **N (número de carriles) = 3 carriles**
- **Fhv=** Factor de ajuste por presencia de vehículos pesados se calcula de la siguiente forma:  
-Donde **PT** es la proporción de vehículos pesados y buses, que durante la hora pico fueron un total de 31 en 2329 dando una proporción respecto al volumen dentro de la hora pico de **0,013.**
- **ET = 2**

$$Fhv = \frac{1}{1 + PT(ET - 1)}$$

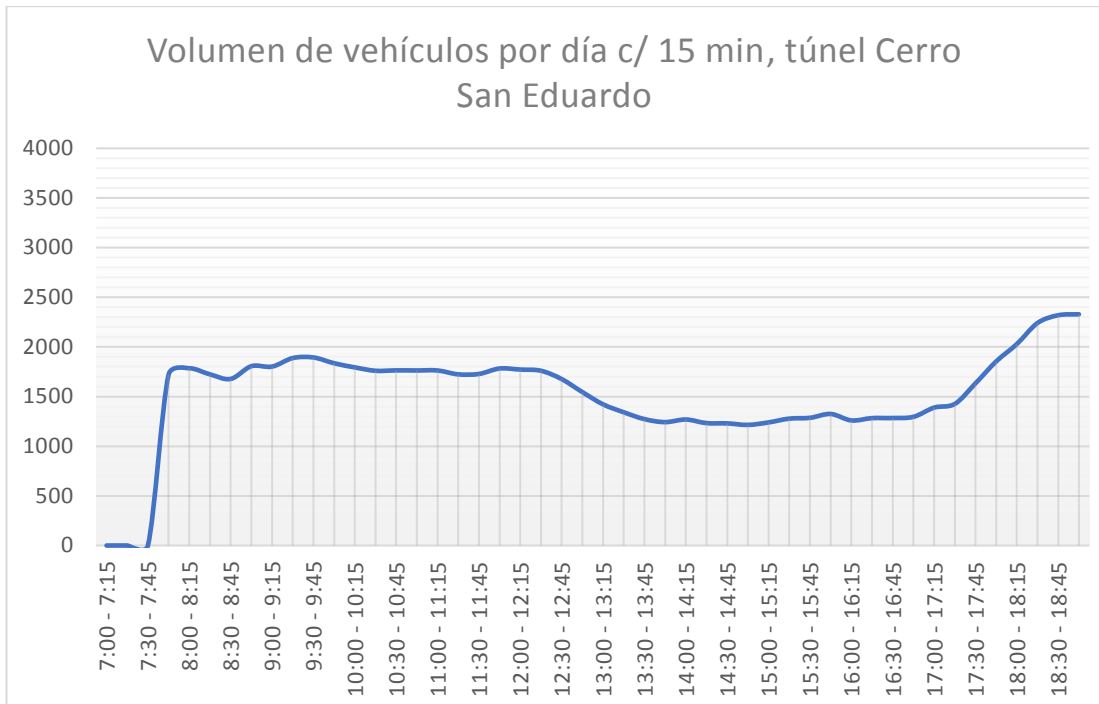
$$Fhv = \frac{1}{1 + 0,013(2 - 1)}$$

$$Fhv = 0,986$$

#### Volumen de demanda de vehículos

$$Vp = \frac{2329}{0,95 * 3 * 0,986}$$

$$Vp = 828,79 \text{ veh/h}$$



**Figura 24.** Gráfico de volumen de vehículos por hora del túnel cerro San Eduardo sentido norte-sur día 2.

#### 4. Capacidad del túnel

- La velocidad de flujo libre obtenida anteriormente es de **38,4 mi/h**, obteniendo una capacidad a partir de la Figura 19 de **1700 veh/h por carril**.
- Este valor obtenido se multiplica por 3 (número de carriles) **para obtener la capacidad máxima del túnel**,  $1700 * N = 1700 * 3 = 5100 \text{ veh/h}$ .
- **2329 veh/h** que es el volumen máximo horario se divide para el número de carriles para obtener la capacidad máxima por carril,  $2329/3 = 776,33 \text{ veh/h}$
- **1700 veh/h** comparado con la capacidad máxima por carril del túnel de **776,33 veh/h**, en porcentaje representa:  $(776,33 * 100) / 1700 = 45,66\%$
- **El túnel del Cerro San Eduardo NS está operando al 45,66% de su capacidad total actualmente.**

#### 5. Densidad y Nivel de servicio de la vía

$$D = \frac{Vp}{S}$$

- **D:** Densidad de vehículos (veh/km)
- **Vp:** Volumen de demanda

- **S:** Velocidad media de tránsito en la vía, que para efectos de diseño se calcula con la velocidad de flujo libre base de **45 mi/h**.

$$D = \frac{828,79}{45}$$

$$D = 18,41 \frac{\text{veh}}{\text{mi}}/c$$

- Según la Tabla 13 túnel del Cerro San Eduardo NS se encuentra en el nivel de servicio **C** es decir la demanda de vehículos no va a exceder a la capacidad.
- Si se realiza el mismo cálculo, pero para la velocidad impuesta por la ATM de Guayaquil que es **50 km/h o 31,25 mi/h** que al ser una velocidad baja de operación el ancho del carril no va a afectar es decir se puede despreciar la reducción con los factores de corrección, disminuyendo su capacidad de **1600 veh/h a 1400 veh/h**.

$$D = \frac{828,79}{31,25}$$

$$D = 26,52 \frac{\text{veh}}{\text{mi}}/c$$

- Si se mantiene a **50 km/h o 31,25 mi/h** la vía en su hora de máxima demanda estará en un nivel de servicio **D** es decir que el flujo seguiría siendo estable, pero con ciertas interferencias con otros vehículos, la capacidad para maniobrar es moderada.

### **3.6.2 Capacidad y nivel de servicio del túnel del Cerro San Eduardo NS a 5 y 10 años.**

Se va a calcular la proyección vehicular con los factores de la Tabla 4 para determinar cuál será la capacidad y nivel de servicio del túnel del Cerro San Eduardo NS en los próximos 5 y 10 años respectivamente, se tomará como referencia el año 2021 que fue cuando se hicieron los conteos y la capacidad máxima de **776 veh/h**.

**Tabla 25.** Proyección vehicular del túnel Cerro San Eduardo NS a 5 y 10 años respectivamente.

<b>Años</b>	<b>Proyección a:</b>		<b>r</b>	<b>Factor</b>	<b>Cantidad de vehículos</b>
<b>2021</b>	-	-	-	-	<b>776</b>
<b>2026</b>	<b>P5</b>		<b>3.25%</b>	<b>1,173668</b>	<b>910</b>
<b>2031</b>	<b>P10</b>		<b>3.86%</b>	<b>1,460352</b>	<b>1133</b>

Nota. Elaboración propia.

- A **5 años** la capacidad máxima será de **910 veh/h** si se mantiene la velocidad a 72,4 km/h o **38,4 mi/h** con los factores de reducción y si se compara con la capacidad máxima de **1700 veh/h**, (910/1700) **el túnel del Cerro San Eduardo NS estará operando al 53% de su capacidad máxima.**
- $910 * N$  (número de carriles) =  $910 * 3 = 2730 \text{ veh/h}$  **capacidad total máxima.**  
Calculando el volumen de demanda a 5 años se obtiene:

$$Vp = \frac{2730}{0,95 * 3 * 0,986}$$

$$Vp = 971,49 \text{ veh/h}$$

- **Se procede a calcular la densidad y nivel de servicio a 5 años:**

$$D = \frac{971,49}{45}$$

$$D = 21,58 \frac{\text{veh}}{\text{mi}} / c$$

- El túnel del Cerro San Eduardo NS en 5 años se va a encontrar en el nivel de servicio **C** si se mantiene la velocidad de **38,4 mi/h**, el flujo será continuo, no habrá congestionamiento, pero la capacidad de maniobrar será moderada.
- Si se hace el cálculo con la velocidad impuesta por la ATM de **50 km/h o 31,25 mi/h** en 5 años:

$$D = \frac{971,49}{31,25}$$

$$D = 31,08 \frac{\text{veh}}{\text{mi}} / c$$

- El nivel de servicio será **D**, el flujo será ininterrumpido, la capacidad de maniobrar es aún más moderada si se mantiene esta velocidad en 5 años.
- A **10 años** la capacidad máxima será de **1133 veh/h** si se mantiene la velocidad a 72,4 km/h o **38,4 mi/h** con los factores de reducción y si se compara con la capacidad máxima de **1700 veh/h**, (1133/1700) **el túnel del Cerro San Eduardo NS estará operando al 66% de su capacidad máxima.**
- $1133 * N$  (número de carriles) =  $1133 * 3 = 3399 \text{ veh/h}$  **capacidad total máxima.** Calculando el volumen de demanda a 10 años se obtiene:

$$Vp = \frac{3399}{0,95 * 3 * 0,986}$$

$$Vp = 1208,33 \text{ veh/h}$$

- **Se procede a calcular la densidad y nivel de servicio a 10 años:**

$$D = \frac{1208,33}{45}$$

$$D = 26,85 \frac{\text{veh}}{\text{mi}} / c$$

- Según la Tabla 13 el túnel del Cerro San Eduardo NS en 10 años se va a encontrar en el nivel de servicio **D** si se mantiene la velocidad de **36,8 mi/h**, el flujo seguiría siendo estable, pero con ciertas interferencias con otros vehículos, la capacidad para maniobrar es moderada.
- Si se hace el cálculo con la velocidad impuesta por la ATM de **50 km/h o 31,25 mi/h** en **10 años:**

$$D = \frac{1208,33}{31,25}$$

$$D = 38,66 \frac{\text{veh}}{\text{mi}} / c$$

- El nivel de servicio será **E**, por lo que el túnel estaría cerca de operar a su capacidad total, el flujo será sin interrupciones, pero cualquier perturbación en el camino causaría congestión. Si se mantiene esta velocidad en 10 años.

## **3.7 Monitoreo Ambiental**

### **3.7.1 Equipos para el monitoreo ambiental**

Las siguientes pruebas de medición para el monitoreo del ambiente se hacen bajo los métodos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos EPA:

La determinación de material particulado se lo realiza cumpliendo con el método EPA 40 CFR apartado 50 apéndice J, M, L. (EPA, 2022)

### **3.7.2 Bomba de succión en campo (PM2.5 Y PM10).**

#### **Datos del equipo**

- **Marca:** SUPELCO
- **Número de serie:** 011922
- **Calibración:** Fue realizada el 19 de julio del año 2021 en el laboratorio de lixiviados y gases del consorcio las iguanas – ILM Guayaquil.

Este equipo es utilizado para la evaluación y medición de concentraciones de material particulado suspendido en el aire y consiste en hacer pasar una muestra de aire a caudal fijo por un papel filtro donde se van a depositar las partículas una vez que se enciende la bomba cuando empieza el proceso de succión para posteriormente enviar a procesar las muestras en el laboratorio mediante gravimetría.





**Figura 25.** Bomba de succión en campo.

Nota. Fotografía tomada por el autor.



**Figura 26.** Papel filtro para el depósito de las partículas.

Nota. Fotografía tomada por el autor.

### 3.7.3 GEM 5000 y bolsas Tedlar

Datos del equipo

- **Marca:** LANDTEC
- **Número de serie:** GEM 5000 nueva generación
- **Calibración:** Hasta el año 2021 por el laboratorio de lixiviados y gases del consorcio las iguanas – ILM Guayaquil.

Se va a regir bajo el método 18 o método EPA que detalla: la medición de las emisiones de compuestos orgánicos gaseosos por cromatografía de gases (bolsa hermética y cartuchos absorbentes), USEPA (U.S.A) CFR título 40, parte 60, apéndice A-6. (EPA, 2022)

El GEM™5000 es un instrumento portátil de analizador de gases que está diseñado específicamente para monitorear contaminantes como el monóxido de carbono CO, dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub>, dióxido de azufre SO<sub>2</sub>, entre otros. Recoge muestras y analiza el contenido cuando se activa el equipo mediante una manguera que absorbe

y hace circular a los gases por un filtro donde el equipo determinará las concentraciones.



**Figura 27.**Monitoreo de gases con GEM 5000

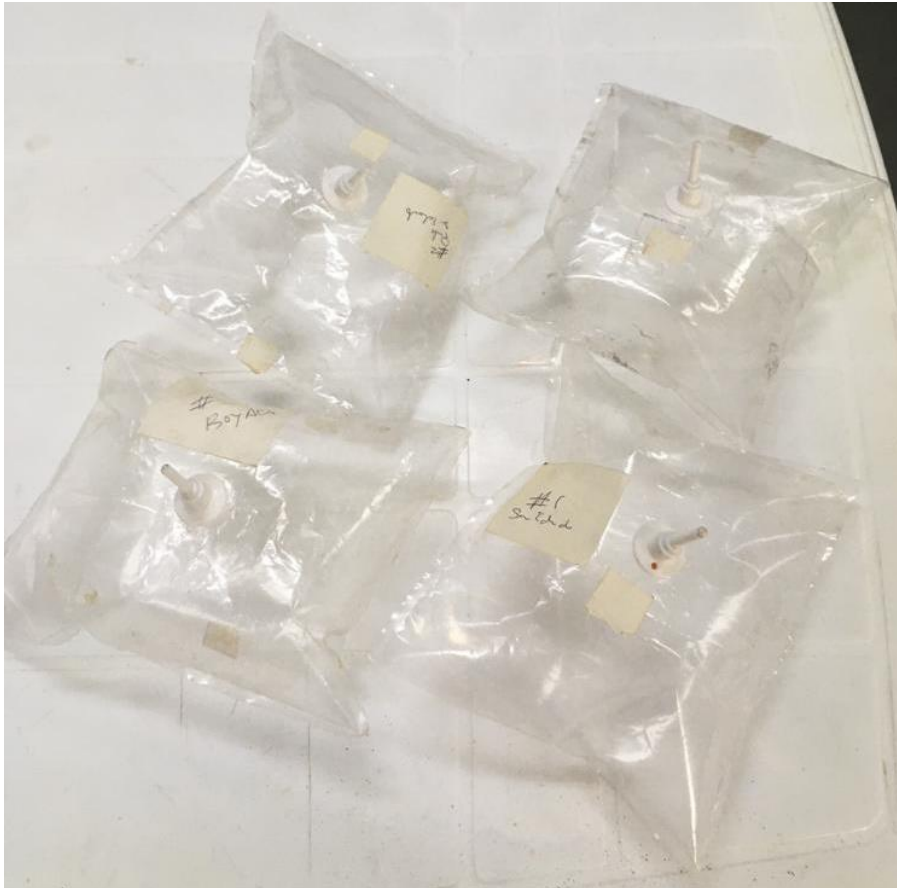
Nota. Fotografía tomada por el autor



**Figura 28.**Equipo del GEM 5000

Nota. Tomado de la página web de Landtec (<https://www.landtecna.com>)

Las muestras que serán recogidas mediante unas bolsas herméticas llamadas tedlar las cuales se llenan en 30 segundos y tienen una capacidad de 500ml se procesan por medio de cromatografía.



**Figura 29.** Bolsas herméticas Tedlar

Nota. Fotografía tomada por el autor

Las bolsas que se van a utilizar deben purgarse en repetidas ocasiones utilizando aire puro o nitrógeno y una fuente de vacío, por lo que siempre deben permanecer cerradas antes de efectuar un muestreo se comprueba que estén totalmente vacías y se cierra cuidadosamente una vez llenadas para que no existan pérdidas. La manipulación manual es desaconsejable porque perjudica la estanqueidad de la bolsa y no permite conocer el volumen de aire real muestreado.

### **3.8 Resultados del monitoreo ambiental**

En los siguientes informes se detallan los resultados de emisiones de gases contaminantes y material particulado, los cuales fueron medidos durante las horas pico de cada uno de los túneles mediante una serie de monitoreos fuera y dentro de estos, para esta medición se utilizaron los métodos de cromatografía de gases para determinar las concentraciones de monóxido de carbono CO, dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> y dióxido de azufre SO<sub>2</sub> y el de gravimetría para el material particulado PM<sub>2.5</sub> Y PM<sub>10</sub>.

Estas tomas fueron procesadas en el Laboratorio de Lixiviados y Gases del Consorcio ILM-Guayaquil y los resultados fueron los siguientes:

## INFORME DE RESULTADOS AIRE AMBIENTE

### DATOS DEL CLIENTE

<b>Nombre:</b>	Daniel Vallejo Robalino
<b>Dirección:</b>	Garzota III Etapa Mz 104 V 15
<b>Teléfono:</b>	0999285097
<b>Solicitado Por:</b>	Ing. Federico von Buchwald

### DATOS DE LA MUESTRA

<b>Tipo de muestra:</b>	Aire ambiente	<b>Equipo utilizado:</b>	
<b>Identificación:</b>	Túnel San Eduardo Túnel Cerro del Carmen	<b>Hora de muestreo:</b>	09h00-10h00 10h00-11h00
<b>Lugar de Toma:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fuera del Túnel San Eduardo 9 -10 am (Sur-Norte)</li> <li>Dentro túnel San Eduardo 9-10 am (Sur-Norte)</li> <li>Fuera túnel Cerro del Carmen 10 – 11 am</li> <li>Dentro del túnel del Cerro del Carmen 10-11 am</li> </ul>		
<b>Fecha de muestreo:</b>	17 de diciembre de 2021		

### CONDICIONES AMBIENTALES

<b>Temperatura:</b>	22°C	<b>Humedad:</b>	48%
<b>Fecha de Inicio del Análisis</b>	17 de diciembre de 2021	<b>Fecha Recepción muestra:</b>	17 de diciembre de 2021
<b>Fecha de Finalización del Análisis</b>	23 de diciembre de 2021	<b>Fecha de Emisión Informe</b>	10 de enero de 2022

Sustancias	Formula	UNIDADES					METODO
			Fuera del Túnel San Eduardo 9 -10 am (Sur-Norte)	Dentro túnel San Eduardo 9-10 am (Sur-Norte)	Fuera túnel Cerro del Carmen 10 – 11 am	Dentro del túnel del Cerro del Carmen 10-11 am	
*MONOXIDO DE CARBONO	CO	µg/m <sup>3</sup>	4571	9143	5714	11429	Cromatografía de Gases
*DIOXIDO DE AZUFRE	SO2	µg/m <sup>3</sup>	549	1019	731	993	Cromatografía de Gases
*DIOXIDO DE NITRÓGENO	NO2	µg/m <sup>3</sup>	60	90	56	98	Cromatografía de Gases
*MATERIAL PARTICULADO 10	PM10	µg/m <sup>3</sup>	80	304	136	336	Gravimetría
*MATERIAL PARTICULADO 2.5	PM2.5	µg/m <sup>3</sup>	16	64	16	80	Gravimetría

### NOTAS:

- Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la(s) muestra(s) sometidas al ensayo.
- Los ensayos marcados con asterisco (\*) NO están incluidos en el alcance de acreditación del SAE.

**Figura 30.** Resultados de concentraciones de contaminantes en el Túnel San Eduardo SN y Cerro Del Carmen.

Nota. Informe obtenido del laboratorio.

## INFORME DE RESULTADOS AIRE AMBIENTE

DATOS DEL CLIENTE	
<b>Nombre:</b>	Daniel Vallejo Robalino
<b>Dirección:</b>	Garzota III Etapa Mz 104 V 15
<b>Teléfono:</b>	0999285097
<b>Solicitado Por:</b>	Ing. Federico von Buchwald

DATOS DE LA MUESTRA			
<b>Tipo de muestra:</b>	Aire ambiente	<b>Equipo utilizado:</b>	
<b>Identificación:</b>	Túnel Cerro Santana Túnel San Eduardo	<b>Hora de muestreo:</b>	17h00-18h00 18h00-19h00
<b>Lugar de Toma:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuera túnel Cerro Santana 17h00 – 18h00</li> <li>• Dentro del túnel del Cerro Santana 17h00 – 18h00</li> <li>• Fuera del Túnel San Eduardo 9 -10 am (Norte-Sur) 18h00-19h00</li> <li>• Dentro túnel San Eduardo 9-10 am (Norte-Sur) 18h00-19h00</li> </ul>		
<b>Fecha de muestreo:</b>	02 de febrero de 2022		

CONDICIONES AMBIENTALES			
<b>Temperatura:</b>	23°C	<b>Humedad:</b>	46%
<b>Fecha de Inicio del Análisis</b>	02 de febrero de 2022	<b>Fecha Recepción muestra:</b>	02 de febrero de 2022
<b>Fecha de Finalización del Análisis</b>	02 de febrero de 2022	<b>Fecha de Emisión Informe</b>	03 de febrero de 2022

Sustancias	Formula	UNIDADES					METODO
			Fuera túnel Cerro Santana 17h00-18h00	Dentro túnel Cerro Santana 17h00-18h00	Fuera túnel San Eduardo 18h0-19h00 (Norte-Sur)	Dentro túnel San Eduardo 18hh-19h00 (Norte-Sur)	
*MONOXIDO DE CARBONO	CO	µg/m <sup>3</sup>	3429	15200	4571	14629	Cromatografía de Gases
*DIOXIDO DE AZUFRE	SO <sub>2</sub>	µg/m <sup>3</sup>	418	1071	470	1254	Cromatografía de Gases
*DIOXIDO DE NITRÓGENO	NO <sub>2</sub>	µg/m <sup>3</sup>	94	116	103	128	Cromatografía de Gases
*MATERIAL PARTICULADO 10	PM10	µg/m <sup>3</sup>	112	384	136	408	Gravimetría
*MATERIAL PARTICULADO 2.5	PM2.5	µg/m <sup>3</sup>	32	96	32	120	Gravimetría

ND: NO DETECTADO

### NOTAS:

- Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la(s) muestra(s) sometidas al ensayo.
- Los ensayos marcados con asterisco (\*) NO están incluidos en el alcance de acreditación del SAE.

**Figura 31.** Resultados de concentraciones de contaminantes en el Túnel San Eduardo NS y Cerro Santa Ana.

Nota. Informe entregado por el laboratorio.

Adicionalmente se hicieron dos monitoreos más dentro de la hora pico en los túneles Cerro Santa Ana y San Eduardo NS debido a que son los de mayor tráfico e incidencia ambiental en los que salieron resultados similares y en el cual se escogió



un promedio de las tres tomas para continuar con el análisis, a continuación, se muestran los resultados:

**Tabla 26.** Promedio de las muestras en el túnel del Cerro Santa Ana.

Contaminante	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio Túnel Santa Ana
CO	15200 µg/m <sup>3</sup>	15270 µg/m <sup>3</sup>	15310 µg/m <sup>3</sup>	15260 µg/m <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub>	1071 µg/m <sup>3</sup>	1076 µg/m <sup>3</sup>	1088 µg/m <sup>3</sup>	1078 µg/m <sup>3</sup>
NO <sub>2</sub>	128 µg/m <sup>3</sup>	123 µg/m <sup>3</sup>	136 µg/m <sup>3</sup>	125 µg/m <sup>3</sup>
PM 2.5	96 µg/m <sup>3</sup>	82 µg/m <sup>3</sup>	89 µg/m <sup>3</sup>	89 µg/m <sup>3</sup>
PM 10	384 µg/m <sup>3</sup>	390 µg/m <sup>3</sup>	404 µg/m <sup>3</sup>	392 µg/m <sup>3</sup>

Nota. Elaboración propia.

**Tabla 27.** Promedio de las muestras en el túnel del Cerro San Eduardo NS.

Contaminante	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio Túnel San Eduardo NS
CO	14629 µg/m <sup>3</sup>	14710 µg/m <sup>3</sup>	14860 µg/m <sup>3</sup>	14733 µg/m <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub>	1254 µg/m <sup>3</sup>	1276 µg/m <sup>3</sup>	1260 µg/m <sup>3</sup>	1263 µg/m <sup>3</sup>
NO <sub>2</sub>	116 µg/m <sup>3</sup>	142 µg/m <sup>3</sup>	136 µg/m <sup>3</sup>	131 µg/m <sup>3</sup>
PM 2.5	120 µg/m <sup>3</sup>	122 µg/m <sup>3</sup>	116 µg/m <sup>3</sup>	119 µg/m <sup>3</sup>
PM 10	408 µg/m <sup>3</sup>	412 µg/m <sup>3</sup>	405 µg/m <sup>3</sup>	408 µg/m <sup>3</sup>

Nota. Elaboración propia.

## INFORME DE RESULTADOS AIRE AMBIENTE

### DATOS DEL CLIENTE

<b>Nombre:</b>	Daniel Vallejo Robalino
<b>Dirección:</b>	Garzota III Etapa Mz 104 V 15
<b>Teléfono:</b>	0999285097
<b>Solicitado Por:</b>	Ing. Federico von Buchwald

### DATOS DE LA MUESTRA

<b>Tipo de muestra:</b>	Aire ambiente	<b>Equipo utilizado:</b>	
<b>Identificación:</b>	Túnel Cerro Santana Túnel San Eduardo	<b>Hora de muestreo:</b>	17h00-18h00 18h00-19h00
<b>Lugar de Toma:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dentro del túnel del Cerro Santana 17h00 – 18h00 (M1-M2)</li> <li>Dentro túnel San Eduardo 9-10 am (Norte-Sur) 18h00-19h00 (M3-M4)</li> </ul>		
<b>Fecha de muestreo:</b>	16 de febrero de 2022		

### CONDICIONES AMBIENTALES

<b>Temperatura:</b>	23°C	<b>Humedad:</b>	46%
<b>Fecha de Inicio del Análisis</b>	16 de febrero de 2022	<b>Fecha Recepción muestra:</b>	16 de febrero de 2022
<b>Fecha de Finalización del Análisis</b>	17 de febrero de 2022	<b>Fecha de Emisión Informe</b>	18 de febrero de 2022

Sustancias	Formula	UNIDADES					METODO
			M1 Dentro túnel Cerro Santana 17h00-18h00	M2 Dentro túnel Cerro Santana 17h00-18h00	M3 Dentro túnel San Eduardo 18hh-19h00 (Norte-Sur)	M4 Dentro túnel San Eduardo 18hh-19h00 (Norte-Sur)	
*MONOXIDO DE CARBONO	CO	µg/m <sup>3</sup>	15270	15310	14710	14680	Cromatografía de Gases
*DIOXIDO DE AZUFRE	SO2	µg/m <sup>3</sup>	1076	1088	1276	1260	Cromatografía de Gases
*DIOXIDO DE NITRÓGENO	NO2	µg/m <sup>3</sup>	123	136	142	136	Cromatografía de Gases
*MATERIAL PARTICULADO 10	PM10	µg/m <sup>3</sup>	390	404	412	405	Gravimetría
*MATERIAL PARTICULADO 2.5	PM2.5	µg/m <sup>3</sup>	82	89	122	116	Gravimetría

ND: NO DETECTADO

### NOTAS:

- Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la(s) muestra(s) sometidas al ensayo.
- Los ensayos marcados con asterisco (\*) NO están incluidos en el alcance de acreditación del SAE.

**Figura 32.** Resultados de concentraciones de contaminantes en el Túnel San Eduardo NS y Cerro Santa Ana.

Nota. Informe entregado por el laboratorio.

En los informes anteriores se detallan los resultados por gases contaminantes los cuales fueron medidos mediante una serie de monitoreos fuera y dentro de los túneles, se utilizaron los métodos de cromatografía para los gases contaminantes, el monóxido de carbono CO, dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> y dióxido de azufre SO<sub>2</sub>.

Para el material particulado PM 2.5 y PM10 se utilizó el método de gravimetría.

Estas tomas fueron procesadas en el Laboratorio de Lixiviados y Gases del Consorcio ILM-Guayaquil.

A continuación, se va a comparar las emisiones tomadas en estas muestras para probar la aplicabilidad de la Norma de Calidad de Aire Ambiente en lo que refiere a niveles de Alerta, Alarma y Emergencia de concentraciones contaminantes:

**Tabla 28.** Comparativa de emisiones en el túnel del Cerro Santa Ana con la Norma de Calidad de aire.

Contaminante	Emisiones fuera del túnel Santa Ana	Emisiones dentro del túnel Santa Ana	Alerta	Alarma	Emergencia	Nivel de incidencia
µg/m <sup>3</sup>						
<b>Monóxido de Carbono CO</b>	3429 µg/m <sup>3</sup>	15260 µg/m <sup>3</sup>	15000 µg/m <sup>3</sup>	30000 µg/m <sup>3</sup>	40000 µg/m <sup>3</sup>	CO se encuentra en nivel de Alerta
<b>Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)</b>	94 µg/m <sup>3</sup>	125 µg/m <sup>3</sup>	1000 µg/m <sup>3</sup>	2000 µg/m <sup>3</sup>	3000 µg/m <sup>3</sup>	Inofensivo
<b>Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)</b>	418 µg/m <sup>3</sup>	1078 µg/m <sup>3</sup>	200 µg/m <sup>3</sup>	1000 µg/m <sup>3</sup>	1800 µg/m <sup>3</sup>	SO <sub>2</sub> se encuentra en nivel de Alarma.
<b>Material Particulado PM<sub>2,5</sub></b>	32 µg/m <sup>3</sup>	89 µg/m <sup>3</sup>	150 µg/m <sup>3</sup>	250 µg/m <sup>3</sup>	350 µg/m <sup>3</sup>	PM 2,5 se encuentra en niveles inofensivos.
<b>Material Particulado PM<sub>10</sub></b>	112 µg/m <sup>3</sup>	392 µg/m <sup>3</sup>	250 µg/m <sup>3</sup>	400 µg/m <sup>3</sup>	500 µg/m <sup>3</sup>	PM 10 se encuentra en nivel de Alerta.

Nota. Elaboración propia.

- La Tabla 28 muestra los niveles de concentración de los distintos contaminantes medidos en la hora pico del túnel del Cerro Santa Ana.
- Las concentraciones de monóxido de carbono CO están en niveles de alerta con una emisión de 15200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , dado que en un túnel el nivel de CO es letal y ya que las horas pico son muy puntuales se tiene que legislar para las condiciones críticas y no promedios engañosos.
- El dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> se emite en niveles muy inofensivos con una emisión de 116  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la hora pico.
- Las concentraciones de dióxido de azufre SO<sub>2</sub> están en niveles de alerta con una emisión de 1071  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Las concentraciones de material particulado PM 2,5 con una emisión de 96  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se encuentra en niveles inofensivos.
- Las concentraciones de material particulado PM 10 con una emisión de 384  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se encuentra en niveles de alerta.

**Tabla 29.** Comparativa de emisiones en el túnel del Cerro San Eduardo NS con la Norma de Calidad de aire.

Contaminante	Emisiones fuera del túnel San Eduardo NS	Emisiones dentro del túnel San Eduardo NS	Alerta	Alarma	Emergencia	Nivel de incidencia
$\mu\text{g}/\text{m}^3$						
<b>Monóxido de Carbono CO</b>	4571 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	14733 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	15000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	30000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	CO está muy cerca de llegar al nivel de Alerta.
<b>Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)</b>	103 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	131 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	3000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Inofensivo
<b>Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)</b>	470 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1263 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	SO <sub>2</sub> se encuentra en nivel de Alarma.
<b>Material Particulado PM<sub>2,5</sub></b>	32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	119 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM 2,5 se encuentra en niveles inofensivos.
<b>Material Particulado PM<sub>10</sub></b>	136 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	408 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM 10 se encuentra en nivel de Alarma.

Nota. Elaboración propia.

- La Tabla 29 muestra los niveles de concentración de los distintos contaminantes medidos en la hora pico del túnel del Cerro San Eduardo NS.
- Las concentraciones de monóxido de carbono CO están muy cerca de los niveles de alerta con una emisión de 14629  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- El dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> se emite en niveles muy inofensivos con una emisión de 128  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la hora pico.
- Las concentraciones de dióxido de azufre SO<sub>2</sub> están en niveles de alarma con una emisión de 1254  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Las concentraciones de material particulado PM 2,5 con una emisión de 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se encuentra en niveles inofensivos.
- Las concentraciones de material particulado PM 10 con una emisión de 408  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se encuentra en niveles de alarma.

**Tabla 30.** Comparativa de emisiones en el túnel del Cerro Del Carmen con la Norma de Calidad de aire.

Contaminante	Emisiones fuera del túnel Cerro Del Carmen	Emisiones dentro del túnel Cerro Del Carmen	Alerta	Alarma	Emergencia	Nivel de incidencia
$\mu\text{g}/\text{m}^3$						
Monóxido de Carbono CO	5714 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	11429 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	15000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	30000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	CO se encuentra cerca de llegar al nivel de Alerta
Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	3000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Inofensivo
Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	731 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	993 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	SO <sub>2</sub> se encuentra en nivel de Alerta.
Material Particulado PM <sub>2,5</sub>	16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM 2,5 se encuentra en niveles inofensivos.
Material Particulado PM <sub>10</sub>	136 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	336 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM 10 se encuentra en nivel de Alerta.

Nota. Elaboración propia.

- La Tabla 30 muestra los niveles de concentración de los distintos contaminantes medidos en la hora pico del túnel del Cerro Del Carmen.
- Las concentraciones de monóxido de carbono CO están en niveles cercanos al de alerta con una emisión de 11429  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , dado que en un túnel el nivel de CO es letal y ya que las horas pico son muy puntuales se tiene que legislar para las condiciones críticas y no promedios engañosos.
- El dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> se emite en niveles muy inofensivos con una emisión de 98  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la hora pico.
- Las concentraciones de dióxido de azufre SO<sub>2</sub> están en niveles de alerta con una emisión de 993  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Las concentraciones de material particulado PM 2,5 con una emisión de 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se encuentra en niveles inofensivos.

- Las concentraciones de material particulado PM 10 con una emisión de 336  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se encuentra en niveles de alerta.

**Tabla 31.** Comparativa de emisiones en el túnel del Cerro San Eduardo SN con la Norma de Calidad de aire.

Contaminante	Emisiones fuera del túnel San Eduardo SN	Emisiones dentro del túnel San Eduardo SN	Alerta	Alarma	Emergencia	Nivel de incidencia
$\mu\text{g}/\text{m}^3$						
<b>Monóxido de Carbono CO</b>	4571 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	9134 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	15000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	30000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	CO se encuentra cerca del nivel de Alerta
<b>Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)</b>	60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	3000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Inofensivo
<b>Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)</b>	549 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1019 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	SO <sub>2</sub> se encuentra en nivel de Alarma.
<b>Material Particulado PM<sub>2,5</sub></b>	16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM 2,5 se encuentra en niveles inofensivos.
<b>Material Particulado PM<sub>10</sub></b>	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	304 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM 10 se encuentra en nivel de Alerta.

Nota. Elaboración propia.

- La Tabla 31 muestra los niveles de concentración de los distintos contaminantes medidos en la hora pico del túnel del Cerro Del Carmen.
- Las concentraciones de monóxido de carbono CO están en niveles cercanos al de alerta con una emisión de 9134  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , dado que en un túnel el nivel de CO es letal y ya que las horas pico son muy puntuales se tiene que legislar para las condiciones críticas y no promedios engañosos.
- El dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> se emite en niveles muy inofensivos con una emisión de 90  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la hora pico.

- Las concentraciones de dióxido de azufre SO<sub>2</sub> están en niveles de alarma con una emisión de 1019 µg/m<sup>3</sup>.
- Las concentraciones de material particulado PM 2,5 con una emisión de 64 µg/m<sup>3</sup> se encuentra en niveles inofensivos.
- Las concentraciones de material particulado PM 10 con una emisión de 304 µg/m<sup>3</sup> se encuentra en niveles de alerta.

### **3.9 Reducción con Normativa EURO por cambio de combustible**

En el Ecuador la calidad de los combustibles se encuentra en su mayoría con estándares EURO 2, en algunos casos como la Metrovía se usa EURO 3 según el Ing. Federico von Buchwald (von Buchwald, Movilidad Urbana, 2011) a continuación, se hará una relación si estos migraran a uno con mejores condiciones ambientales como el EURO 4 o EURO 5. Algo importante a aclarar es que el cambio de combustibles depende únicamente del estado ecuatoriano, cabe recalcar que este es un análisis de reducción de emisiones por el tipo de combustible y se hace en cuestión de porcentaje, cabe mencionar que las normativas EURO se encuentran en unidades de gramos por kilómetro recorrido **g/km** los cuales son límites para vehículos individuales y la calidad de aire es medida en microgramos por metro cúbico **µg/m<sup>3</sup>**.



**Tabla 32.** Evolución de la tabla EURO para el control de la emisión de gases.

Tipo	Fecha	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
<b>Diésel</b>						
Euro I†	Julio de 1992	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	0.14 (0.18)
Euro II, IDI	Enero de 1996	1.0	-	0.7	-	0.08
Euro II, DI	Enero de <sup>a</sup>	1.0	-	0.9	-	0.10
Euro III	Enero de 2000	0.64	-	0.56	0.50	0.05
Euro IV	Enero de 2005	0.50	-	0.30	0.25	0.025
Euro V	Septiembre de 2009	0.50	-	0.23	0.18	0.005
Euro VI (propuesto)	Septiembre de 2014	0.50	-	0.17	0.08	0.005
<b>Gasolina</b>						
Euro I†	Julio de 1992	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	-
Euro II	Enero de 1996	2.2	-	0.5	-	-
Euro III	Enero de 2000	2.30	0.20	-	0.15	-
Euro IV	Enero de 2005	1.0	0.10	-	0.08	-
Euro V	Septiembre de 2009	1.0	0.10	-	0.06	0.005 <sup>b</sup>
Euro VI	Septiembre de 2014	1.0	0.10	-	0.06	0.005

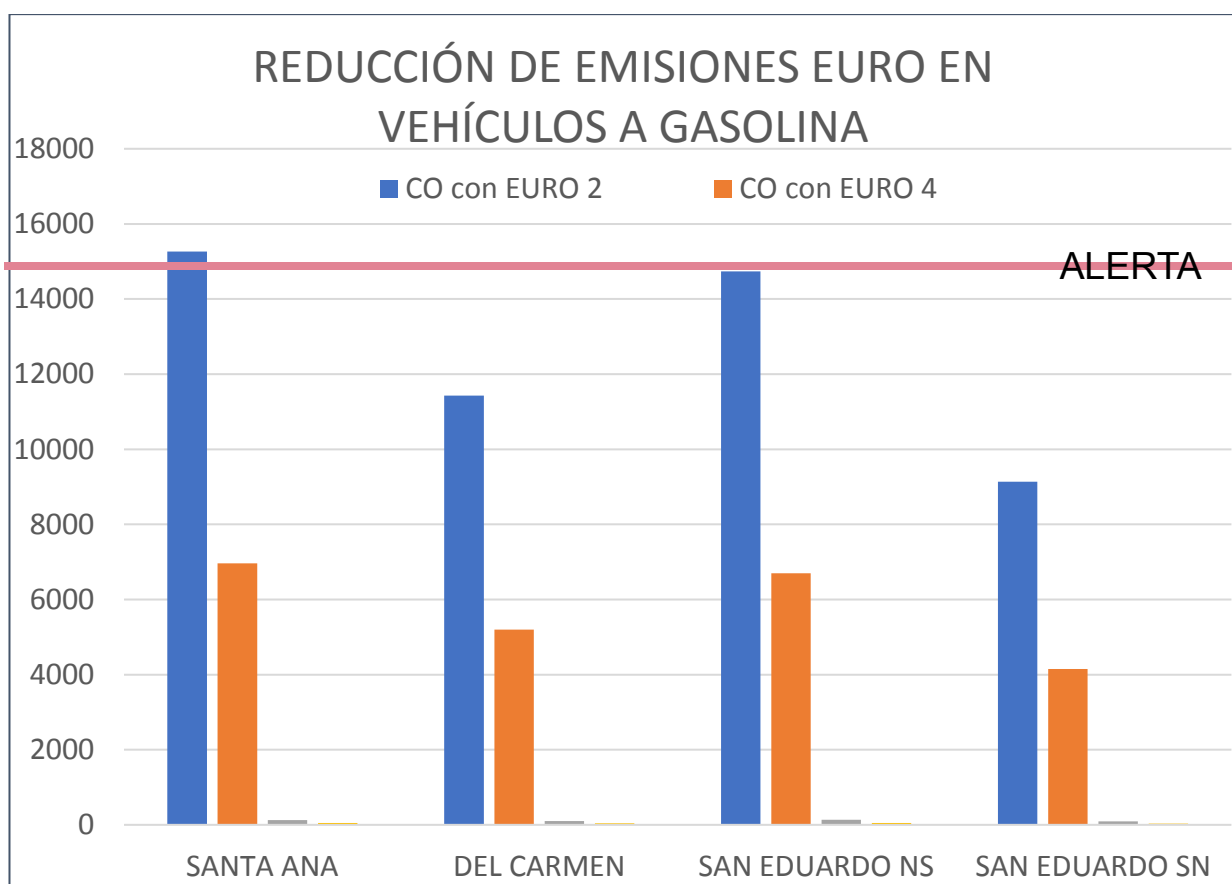
Nota. Tomada de la página web de Blog Mecánicos

(<http://www.blogmecanicos.com/>)

- En términos de monóxido de carbono CO si los vehículos migraran de combustibles EURO 2 que tiene como límite 1 gr/km a EURO 4 que tiene 0.5 gr/km para vehículos a diésel las emisiones de CO se reducen en un 50% por lo que ya no estaría en nivel de alerta.
- Para vehículos a gasolina las emisiones si los vehículos migraran de combustibles EURO 2 que tiene 2.2 gr/km a EURO 4 que tiene 1 gr/km las emisiones se reducirían en un 54,55% lo que los sacaría de niveles de alerta.
- Para los óxidos de nitrógeno NO o NO<sub>2</sub> se analiza como si los combustibles en Ecuador sean EURO 3 debido a que en EURO 2 no estaba aclarado este gas en la normativa y la comparativa es si se migrara a EURO 5, esta reducción en vehículos a diésel es del 64% de EURO 3 que tiene 0.5 gr/km a

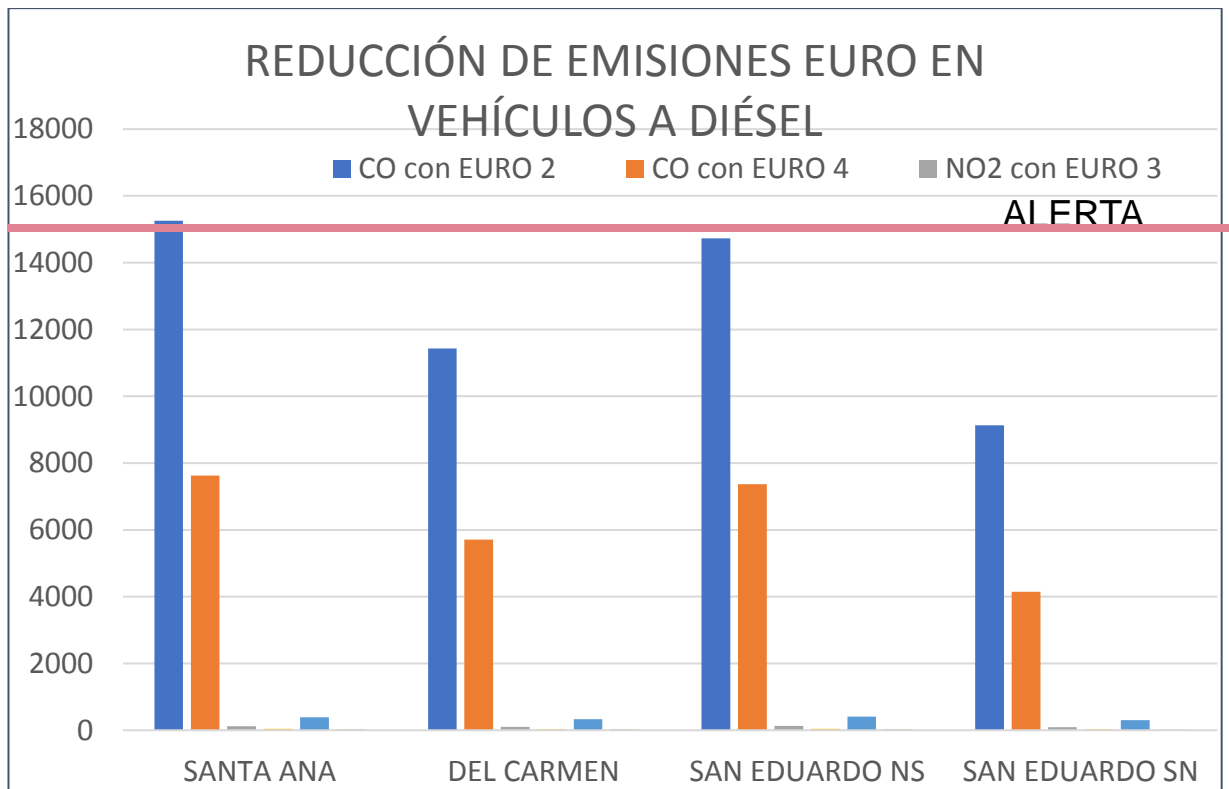
EURO 5 que tiene 0.18 gr/km respectivamente, ocasionando que prácticamente desaparezcan estas emisiones.

- Para vehículos a gasolina la reducción de EURO 3 que tiene 0.15 gr/km a EURO 5 que tiene 0.06 gr/km de NO<sub>2</sub> respectivamente es del 60%.
- Para las emisiones de material particulado en la normativa EURO si migrara de EURO 2 que tiene 0.08 gr/km a EURO 5 que tiene 0.005 gr/km en vehículos a diésel existiría una reducción del 93.75% de reducción % lo que eliminaría las emisiones de MP casi en su totalidad.



**Figura 33.** Gráfico de reducción de emisiones EURO en vehículos a gasolina.

Nota. Elaboración propia.



**Figura 34.** Gráfico de reducción de emisiones EURO en vehículos a gasolina.

Nota. Elaboración propia.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

		Túneles de Guayaquil			
		Cerro Santa Ana	Cerro del Carmen	San Eduardo NS	San Eduardo SN
	HORA PICO	17H15 a 18H15	10H15 a 11H15	18H00 a 19H00	9H15 a 10H15
	FACTOR HORA PICO (PHF)	0,92	0,85	0,95	0,87
	VELOCIDAD DE FLUJO LIBRE (FFS)	38,4 mi/h	43,1 mi/h	38,4 mi/h	38,4 mi/h
VOLUMEN DE DEMANDA Vp (veh/h/c)	Actual	1408 veh/h	1420 veh/h	828 veh/h	798 veh/h
	en 5 años	1642 veh/h	1666 veh/h	971 veh/h	934 veh/h
	en 10 años	2055 veh/h	2074 veh/h	1208 veh/h	1163 veh/h

**Tabla 33.** Resumen de resultados hora pico, PHF, FFS y volumen de demanda.

Nota. Elaboración propia.

		Túneles de Guayaquil			
		Cerro Santa Ana	Cerro del Carmen	San Eduardo NS	San Eduardo SN
CAPACIDAD	Actual	1277 veh/h/c	1191 veh/h/c	776 veh/h/c	684 veh/h/c
	en 5 años	1499 veh/h/c	1397 veh/h/c	910 veh/h/c	802 veh/h/c
	en 10 años	1865 veh/h/c	1739 veh/h/c	1133 veh/h/c	998 veh/h/c
NIVEL DE SERVICIO	Actual	F	F	D	D
	en 5 años	F	F	D	D
	en 10 años	F	F	E	E

**Tabla 34.** Resumen de resultados capacidad y niveles de servicio.

Nota. Elaboración propia.

Estándares EURO 2-3 a EURO 4-5 en vehículos a gasolina				
Túneles	CO con EURO 2	CO con EURO 4	NO2 con EURO 3	NO2 con EURO 5
Túnel Santa Ana	15260 µg/m <sup>3</sup>	6965 µg/m <sup>3</sup>	125 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>
Túnel del Carmen	11429 µg/m <sup>3</sup>	5194 µg/m <sup>3</sup>	98 µg/m <sup>3</sup>	39,2 µg/m <sup>3</sup>
San Eduardo NS	14733 µg/m <sup>3</sup>	6696 µg/m <sup>3</sup>	131 µg/m <sup>3</sup>	52,4 µg/m <sup>3</sup>
San Eduardo SN	9134 µg/m <sup>3</sup>	4151 µg/m <sup>3</sup>	90 µg/m <sup>3</sup>	36 µg/m <sup>3</sup>

**Tabla 35.** Resumen de resultados por cambio de combustibles EURO en vehículos a gasolina.

Nota. Elaboración propia.

- Si se cambiara de EURO 2 a EURO 4 en vehículos a diésel y gasolina y tomando en cuenta que de 5 a 10 años el tráfico va a subir en los todos los túneles las emisiones estarían por debajo de los niveles de alerta en todos los parámetros principalmente el monóxido de carbono CO que es el más letal.

Estándares EURO 2-3 a EURO 4-5 en vehículos a diésel						
Túneles	CO con EURO 2	CO con EURO 4	N02 con EURO 3	NO2 con EURO 5	PM con EURO 2	PM con EURO 5
Túnel Santa Ana	15260 µg/m <sup>3</sup>	7630 µg/m <sup>3</sup>	125 µg/m <sup>3</sup>	45 µg/m <sup>3</sup>	392 µg/m <sup>3</sup>	24, 5 µg/m <sup>3</sup>
Túnel del Carmen	11429 µg/m <sup>3</sup>	5714 µg/m <sup>3</sup>	98 µg/m <sup>3</sup>	35,28 µg/m <sup>3</sup>	336 µg/m <sup>3</sup>	21 µg/m <sup>3</sup>
San Eduardo NS	14733 µg/m <sup>3</sup>	7366 µg/m <sup>3</sup>	131 µg/m <sup>3</sup>	47,16 µg/m <sup>3</sup>	408 µg/m <sup>3</sup>	25,5 µg/m <sup>3</sup>
San Eduardo SN	9134 µg/m <sup>3</sup>	4567 µg/m <sup>3</sup>	90 µg/m <sup>3</sup>	32, µg/m <sup>3</sup>	304 µg/m <sup>3</sup>	19 µg/m <sup>3</sup>

**Tabla 36.** Resumen de resultados por cambio de combustibles EURO en vehículos a gasolina.

Nota. Elaboración propia.

- Para el análisis del material particulado se tomó el PM10 debido a que es el que se encuentra en niveles de alerta en todos los túneles.

## CONCLUSIONES

- Esta investigación se relaciona a un análisis de la hora pico dentro de los túneles donde los contaminantes se acumulan al ser un espacio confinado, la norma ecuatoriana para los estudios ambientales pide un promedio de las emisiones en un período determinado de tiempo (1, 8, 24 horas), proceder de esta forma reduciría las incidencias de las concentraciones que realmente se dan en la hora crítica, la letalidad del monóxido de carbono CO en períodos menores a 15 minutos es tal que no se puede jugar con la vida de las personas y se debe tomar acción para evitar el riesgo.
- El nivel de impacto ambiental generado en el túnel del Cerro Santa en lo que respecta a CO sobrepasa los límites de alerta en la hora pico, SO<sub>2</sub> nivel de alarma, PM 10 está en alerta, en el túnel San Eduardo NS el CO está llegando al nivel de alerta, PM 10 y SO<sub>2</sub> está en niveles alarmantes, en los túneles San Eduardo SN y Cerro del Carmen el nivel de CO está en cantidades considerables pero no llegan a los niveles de alerta, PM 10 y SO<sub>2</sub> están niveles de alerta y en todos los túneles el PM 2.5 y NO<sub>2</sub> se encuentran en concentraciones menores a las consideradas peligrosas.
- En todos los túneles las horas pico se repitieron los dos días de conteo, en el túnel del Cerro Santa Ana es de 17H00 a 18H00, en el Cerro del Carmen es de 10H00 a 11H00, en San Eduardo SN es de 9H00 a 10H00 y San Eduardo NS es de 18H00 a 19H00.
- El nivel de servicio en los túneles del Cerro Santa Ana y del Carmen se encuentra en F, es decir representa una situación doblemente crítica ya que hay un alto nivel de congestión vehicular y los niveles de contaminación son altos, en el caso de Santa Ana sobrepasa los límites de CO permitidos, los dos túneles del Cerro San Eduardo están en nivel de servicio D, el flujo es continuo y la capacidad para maniobrar es moderada, actualmente el túnel de NS es el más contaminado alcanzando el límite, situación que se va a mantener durante 5 años pero a los 10 años los dos túneles estarán en nivel de servicio E donde habrá más congestionamiento, la libertad de maniobra va a reducir, el tiempo de recorrido aumentará y las emisiones contaminantes van a incrementar, sobrepasando los niveles peligrosos.

- Si el país cambiara combustibles con estándares de EURO 2 a EURO 4 los niveles de contaminación en función de monóxido de carbono CO que es el parámetro más crítico disminuiría al 50% en vehículos a diésel y al 54,55% los que funcionan con gasolina logrando reducir las emisiones actuales por debajo de la alerta tomando en cuenta que dentro de 5 o 10 años el número vehículos va a aumentar, si los combustibles migraran de combustibles EURO 3 a EURO 5 el dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> se reduciría al 64% en vehículos a diésel y a 60% los de gasolina por lo que se reducen a más de la mitad las concentraciones ya registradas y el material particulado PM se reduce en un 93,75% si se cambia de EURO 2 a EURO 5 lo que prácticamente bajaría los niveles de estos contaminantes a cantidades tolerables.

## RECOMENDACIONES

- Dado que los niveles de contaminación con CO son muy altos pasando los niveles de alerta en la hora pico y que todavía no hay una manifestación del gobierno de cambiar el tipo de combustible, la recomendación inmediata al municipio es colocar un equipo de sensores en el interior de los túneles que ayuden a determinar los niveles de contaminación y de ser el caso se proceda a restringir el paso de los vehículos.
- Se recomienda al Municipio de Guayaquil no permitir que la columna de vehículos que se genera en las intersecciones de la calle Boyacá llegue al túnel, dándole prioridad a este flujo sobre los transversales para evitar la acumulación de gases en él.
- Si bien los volúmenes de tráfico máximos obtenidos en los días de conteo fueron realizados en días con volúmenes de tráfico mayores a las medias anuales en 2 y 6% sin embargo los niveles de contaminación son altos y peligrosos por lo que se debe prohibir el paso a los peatones, ciclistas y desarrollar las actividades laborales sin presencia de vehículos.
- Se debe tener un compromiso de la sociedad guayaquileña cuando se trate de disminuir las emisiones de estos contaminantes ya que es la calidad de aire que se está respirando y trabajando en conjunto se evitaría así problemas de salud y se contribuye a la mejora de la calidad de vida.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arcila, A. (2017). Análisis de aplicabilidad de ERP. *Mundo Asia Pacífico*, 1-18.
- Baldeón, G. (10 de Noviembre de 2020). *Acelerando*. Combustibles EURO en Ecuador. Obtenido de <https://acelerando.com.ec/calidad-de-los-combustibles-del-ecuador-no-superan-la-norma-euro-2/>
- CAF. (3 de Noviembre de 2008). *Banco de Desarrollo de América Latina*. Túneles San Eduardo. Obtenido de <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2008/11/en-guayaquil-ecuador-se-inauguraron-los-tuneles-san-eduardo/>
- Dallman, T. (30 de Octubre de 2020). *The Internacional Council on clean transportation*. Sensores remoto de emisiones. Obtenido de <https://theicct.org/publication/true-u-s-database-case-study-remote-sensing-of-heavy-duty-vehicle-emissions-in-the-united-states/>
- Doble Vía. (2017). *Transporte Doble Vía*. Normas de emisiones EURO. Obtenido de <https://transporte.doblevia.org/normas-de-emisiones-euro/>
- DW. (20 de Mayo de 2018). *DW*. Muerte por CO. Obtenido de <https://www.dw.com/es/cinco-muertos-en-ecuador-por-inhalar-mon%C3%B3xido-de-carbono-en-confinamiento/a-53474709>
- El Comercio. (15 de Mayo de 2010). Muerte por CO. Obtenido de <https://www.elcomercio.com/actualidad/seguridad/cuatro-personas-murieron-motel-cuenca.html>
- El Comercio. (2019). Muerte por CO. Obtenido de <https://www.elcomercio.com/actualidad/seguridad/policias-muertos-interior-patrullero-quito.html>
- El Comercio. (2021). Muerte por CO. Obtenido de <https://www.elcomercio.com/actualidad/quito/madre-hijo-mueren->

intoxicacion-monoxido-carbono-  
chillogallo.html#:~:text=2021%2014%3A21-  
,Una%20madre%20y%20su%20hijo%20murieron%20por,mon%C3%  
B3xido%20de%20carbono%20en%20Chillogallo&text=Dos%20person  
as%20falleci

El Comercio. (2021). *El Comercio*. Muerte por CO. Obtenido de <https://www.elcomercio.com/actualidad/quito/madre-hijo-mueren-intoxicacion-monoxido-carbono-chillogallo.html>

El Telégrafo. (2020). *Diario El Telégrafo*. Muerte por CO. Obtenido de <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/judicial/12/policias-muerte-monoxido-carbono>

El Universo. (2003). *Diario El Universo*. Túneles Cerro santa ana y cerro del Carmen. Obtenido de <https://www.eluniverso.com/2003/04/25/0001/18/3C90EE0FD40D40379BFAECB07450C005.html/>

EPA. (2022). *EPA*. Obtenido de <https://www.usa.gov/espanol/agencias-federales/agencia-de-proteccion-ambiental-de-estados-unidos>

Fernandez, Á. (28 de Octubre de 2009). *Consumer*. Dióxido de azufre SO<sub>2</sub>. Obtenido de <https://www.consumer.es/medio-ambiente/como-contaminan-los-gases-de-azufre.html>

Gil, C. L. (2008). *Ecologistas en Acción*. Material Particulado PM<sub>2.5</sub>. Obtenido de <https://www.ecologistasenaccion.org/17842/que-son-las-pm25-y-como-afectan-a-nuestra-salud/>

GK.CITY. (2019). *GK city*. Aire de Ecuador contaminado. Obtenido de <https://gk.city/2019/09/16/aire-contaminado-ecuador-ciudades/>

Hernández, S., Fernandez, C., & Baptista, L. (2010). *Metodología de la Investigación*. México DF: McGraw-Hill.

INEC. (2019). Obtenido de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web->

inec/Estadisticas\_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2019  
/2019\_BOLETIN\_ANET.pdf

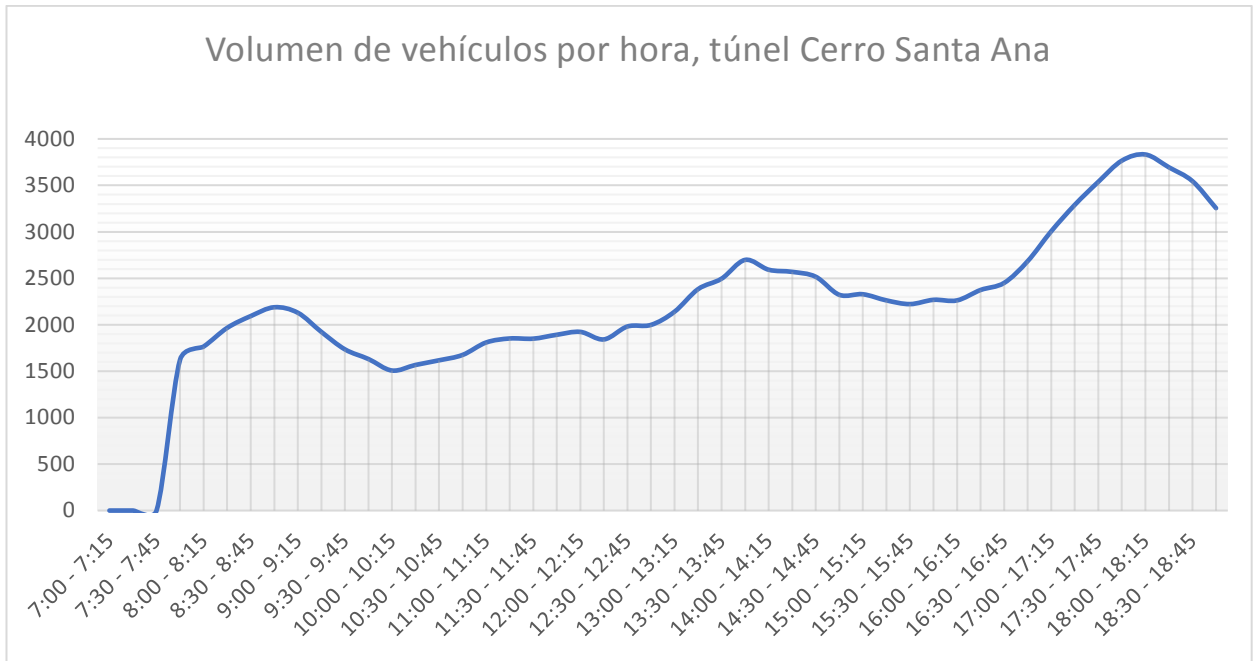
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Legislación secundaria del medio ambiente*.
- Murcia Salud. (2010). *Portal sanitario de la región de murcia* . Obtenido de <http://www.murciasalud.es/pagina.php?id=180398>
- OMS. (2021). Obtenido de [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Pérez, C. P. (2008). *Gestión de la calidad del aire*. Quito: Departamento de Ingeniería civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional.
- PRTR. (2007). *Registro Estatal de emisiones y fuentes contaminantes*. Material particulado PM10. Obtenido de <https://prtr-es.es/particulas-pm10,15673,11,2007.html>
- Structuralia. (10 de Diciembre de 2021). Túneles. Obtenido de <https://blog.structuralia.com/construccion-de-tuneles-mecanismos-de-sostenimiento-del-terreno>
- Tecnología del Automóvil. (31 de Octubre de 2018). *Tecnología del Automóvil. Normativa EURO*. Obtenido de <https://www.tecnologia-automovil.com/articulos/nuevas-tecnologias/euro-1-a-euro-6/>
- USHUAIA. (11 de Marzo de 2011). *Bomberos voluntarios de Ushuaia*. Los peligros del monóxido de carbono. Obtenido de <https://www.bomberosushuaia.org.ar/noticias/leer/1165-los-peligros-del-monoxido-carbono.html>
- von Buchwald. (2011). *Movilidad Urbana*. Obtenido de [file:///C:/Users/jired/Downloads/Movilidad%20Urbana%20de%20Guayaquil%20-%20Ultima%20version%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/jired/Downloads/Movilidad%20Urbana%20de%20Guayaquil%20-%20Ultima%20version%20(1).pdf)
- von Buchwald. (2021). *Generación de Viajes de Guayaquil*.

**Anexo 1.** Conteo de vehículos en la Av. 12 NE Malecón Simón Bolívar y que pasan por el túnel cerro Santa Ana, el miércoles 10 de noviembre de 2021, obteniendo la hora pico de 17H15 a 18H15 con un volumen de 3682 vehículos y un total de 27496 vehículos circularon de 7H00 a 19H00.

<b>CONTEO DE VEHÍCULOS</b>					
<b>LUGAR:</b>	<b>TUNEL CERRO SANTA ANA DESDE AV. 12 NE (MALECÓN SIMÓN BOLÍVAR)</b>				
	<b>HASTA JUAN JAVIER MARCOS Y AGUIRRE</b>				
<b>SENTIDO:</b>	<b>SUR - NORTE</b>				
<b>FECHA:</b>	<b>NOVIEMBRE 10 DEL 2021</b>				
<b>HORA</b>	<b>LIVIANOS</b>	<b>PESADOS</b>	<b>BUSES</b>	<b>TOTAL</b>	<b>VOL/HORA</b>
7:00 - 7:15	335	2	9	346	0
7:15 - 7:30	359	4	6	369	0
7:30 - 7:45	420	8	8	436	0
7:45 - 8:00	381	4	7	392	1543
8:00 - 8:15	540	9	5	554	1751
8:15 - 8:30	566	5	7	578	1960
8:30 - 8:45	594	4	4	602	2126
8:45 - 9:00	490	3	5	498	2232
9:00 - 9:15	430	3	5	438	2116
9:15 - 9:30	382	3	6	391	1929
9:30 - 9:45	316	6	7	329	1656
9:45 - 10:00	361	8	10	379	1537
10:00 - 10:15	301	10	7	318	1417
10:15 - 10:30	417	14	4	435	1461
10:30 - 10:45	392	8	5	405	1537
10:45 - 11:00	476	4	7	487	1645
11:00 - 11:15	468	6	5	479	1806
11:15 - 11:30	444	7	4	455	1826
11:30 - 11:45	391	7	6	404	1825
11:45 - 12:00	506	3	5	514	1852
12:00 - 12:15	489	5	4	498	1871
12:15 - 12:30	378	5	3	386	1802
12:30 - 12:45	567	6	6	579	1977
12:45 - 13:00	518	4	6	528	1991
13:00 - 13:15	628	10	3	641	2134
13:15 - 13:30	656	1	5	662	2410
13:30 - 13:45	637	3	2	642	2473
13:45 - 14:00	735	6	6	747	2692
14:00 - 14:15	525	2	2	529	2580
14:15 - 14:30	608	4	6	618	2536
14:30 - 14:45	572	7	1	580	2474
14:45 - 15:00	525	4	4	533	2260
15:00 - 15:15	561	5	4	570	2301
15:15 - 15:30	570	10	4	584	2267
15:30 - 15:45	528	9	4	541	2228
15:45 - 16:00	548	4	5	557	2252
16:00 - 16:15	565	10	5	580	2262
16:15 - 16:30	648	6	3	657	2335
16:30 - 16:45	657	4	6	667	2461
16:45 - 17:00	785	4	6	795	2699
17:00 - 17:15	871	6	2	879	2998
17:15 - 17:30	927	4	6	937	3278
17:30 - 17:45	871	3	6	880	3491
17:45 - 18:00	951	5	4	960	3656
18:00 - 18:15	895	6	4	905	<b>3682</b>
18:15 - 18:30	770	3	4	777	3522
18:30 - 18:45	717	8	5	730	3372
18:45 - 19:00	719	2	4	725	3137
				<b>27496</b>	

Nota. Elaboración propia.

**Anexo 2.** Gráfico de volumen de vehículos por hora del túnel cerro Santa Ana día 2.

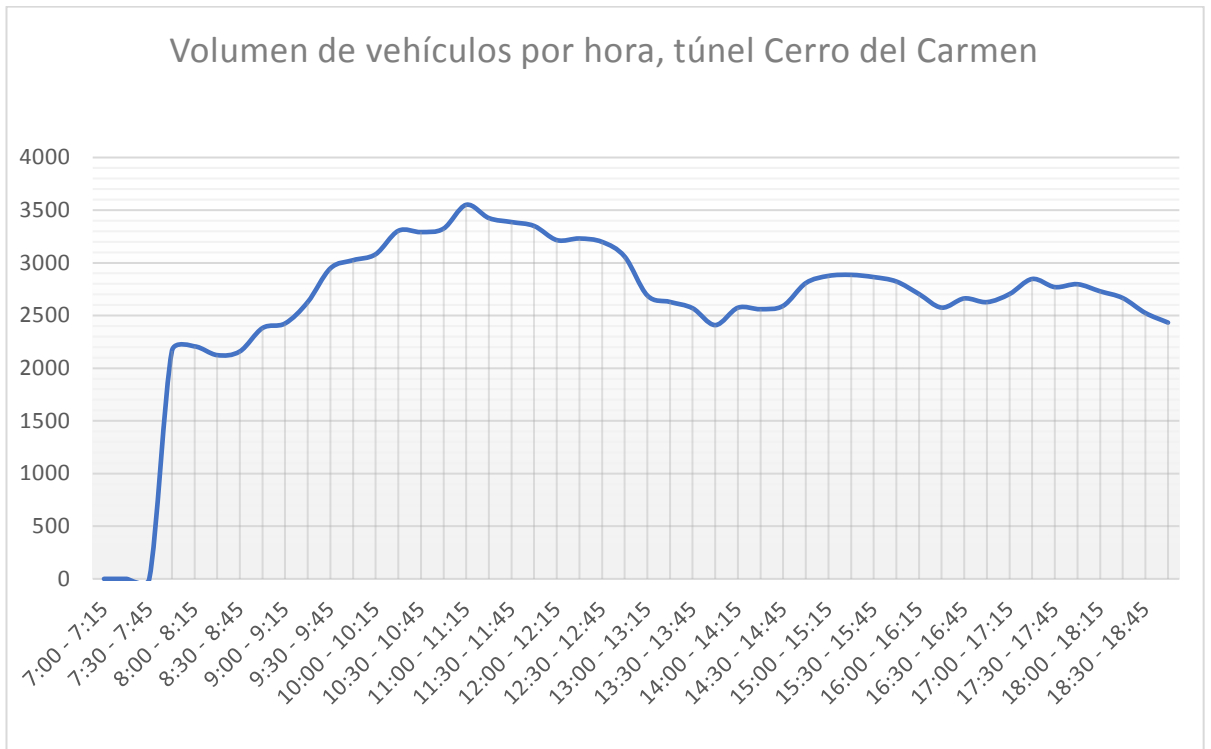


**Anexo 3.** Conteo de vehículos en la Av. 6 Boyacá y que pasan por el túnel cerro del Carmen, el viernes 19 de noviembre de 2021, obteniendo la hora pico de 10H15 a 11H15 con un volumen de 3551 vehículos y un total de 33201 vehículos circularon de 7H00 a 19H00.

<b>CONTEO DE VEHÍCULOS</b>					
<b>LUGAR:</b>	<b>TUNEL CERRO DEL CARMEN DESDE AV. 6 (BOYACÁ)</b>				
<b>SENTIDO:</b>	NORTE - SUR				
<b>FECHA:</b>	NOVIEMBRE 19 DEL 2021				
<b>HORA</b>	<b>LIVIANOS</b>	<b>PESADOS</b>	<b>BUSES</b>	<b>TOTAL</b>	<b>VOL/HORA</b>
7:00 - 7:15	645	5	4	654	0
7:15 - 7:30	533	3	6	542	0
7:30 - 7:45	451	7	8	466	0
7:45 - 8:00	489	6	7	502	2164
8:00 - 8:15	689	5	3	697	2207
8:15 - 8:30	444	7	8	459	2124
8:30 - 8:45	489	5	7	501	2159
8:45 - 9:00	711	5	8	724	2381
9:00 - 9:15	732	3	6	741	2425
9:15 - 9:30	649	6	7	662	2628
9:30 - 9:45	811	3	7	821	2948
9:45 - 10:00	786	8	7	801	3025
10:00 - 10:15	789	5	4	798	3082
10:15 - 10:30	869	7	8	884	3304
10:30 - 10:45	799	4	6	809	3292
10:45 - 11:00	822	7	5	834	3325
11:00 - 11:15	1011	6	7	1024	<b>3551</b>
11:15 - 11:30	749	3	6	758	3425
11:30 - 11:45	756	7	8	771	3387
11:45 - 12:00	787	4	6	797	3350
12:00 - 12:15	875	7	8	890	3216
12:15 - 12:30	759	11	3	773	3231
12:30 - 12:45	728	7	4	739	3199
12:45 - 13:00	645	6	6	657	3059
13:00 - 13:15	510	4	7	521	2690
13:15 - 13:30	704	3	5	712	2629
13:30 - 13:45	669	6	4	679	2569
13:45 - 14:00	489	5	3	497	2409
14:00 - 14:15	674	6	6	686	2574
14:15 - 14:30	689	5	4	698	2560
14:30 - 14:45	698	6	7	711	2592
14:45 - 15:00	697	12	4	713	2808
15:00 - 15:15	744	6	4	754	2876
15:15 - 15:30	698	4	6	708	2886
15:30 - 15:45	676	6	8	690	2865
15:45 - 16:00	658	6	7	671	2823
16:00 - 16:15	623	7	5	635	2704
16:15 - 16:30	569	4	6	579	2575
16:30 - 16:45	764	7	6	777	2662
16:45 - 17:00	624	5	7	636	2627
17:00 - 17:15	701	4	7	712	2704
17:15 - 17:30	706	8	8	722	2847
17:30 - 17:45	687	6	7	700	2770
17:45 - 18:00	651	5	7	663	2797
18:00 - 18:15	631	8	6	645	2730
18:15 - 18:30	642	9	7	658	2666
18:30 - 18:45	546	8	4	558	2524
18:45 - 19:00	563	4	5	572	2433
				<b>33201</b>	

Nota. Elaboración propia.

**Anexo 4.** Gráfico de volumen de vehículos por hora del túnel cerro del Carmen día 2.



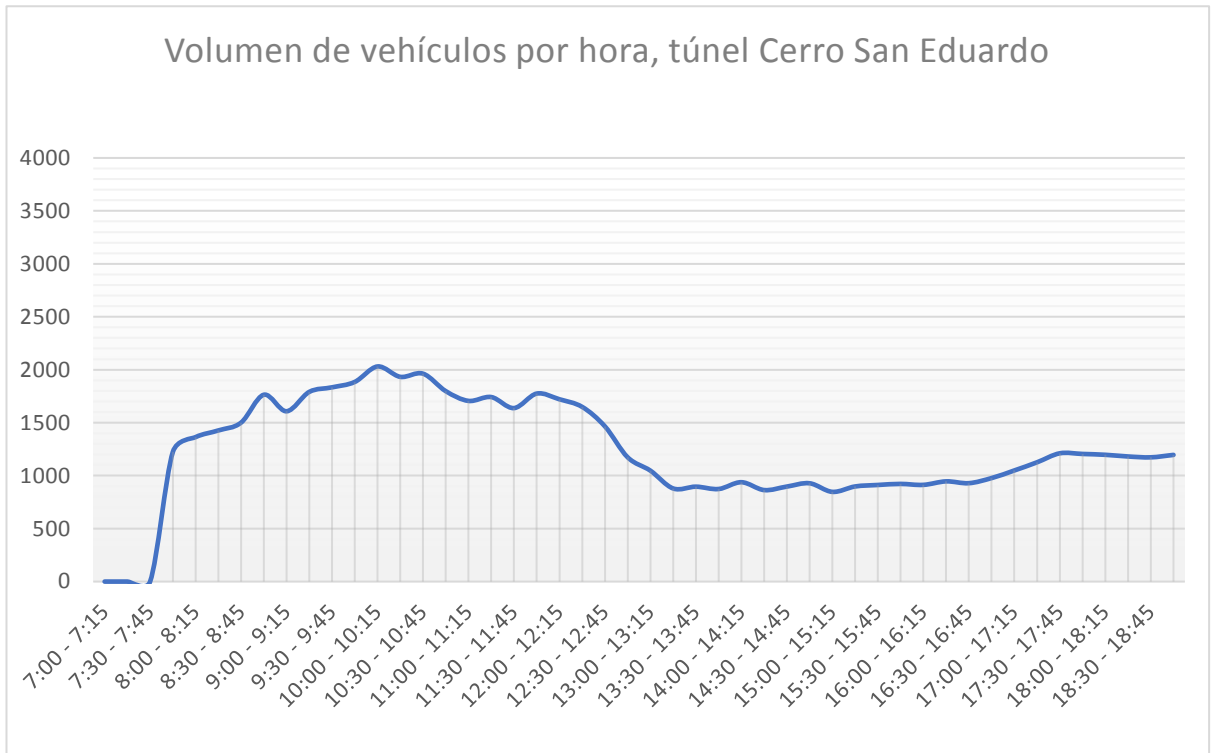
**Anexo 5.** Conteo de vehículos desde la Av. Barcelona y que pasan por el túnel cerro San Eduardo sentido sur-norte el miércoles 24 de noviembre de 2021, obteniendo la hora pico de 9H15 a 10H15 con un volumen de 2031 vehículos y un total de 15721 vehículos circularon de 7H00 a 19H00.

<b>CONTEO DE VEHÍCULOS</b>					
<b>LUGAR:</b>	<b>TUNEL CERRO SAN EDUARDO DESDE AV BARCELONA</b>				
<b>SENTIDO:</b>	<b>HASTA LA VÍA DAULE</b>				
<b>FECHA:</b>	<b>NOVIEMBRE 24 DEL 2021</b>				
<b>HORA</b>	<b>LIVIANOS</b>	<b>PESADOS</b>	<b>BUSES</b>	<b>TOTAL</b>	<b>VOL/HORA</b>
7:00 - 7:15	352	13	1	366	0
7:15 - 7:30	290	10	2	302	0
7:30 - 7:45	324	11	2	337	0
7:45 - 8:00	207	11	1	219	1224
8:00 - 8:15	500	6	0	506	1364
8:15 - 8:30	359	4	2	365	1427
8:30 - 8:45	402	8	1	411	1501
8:45 - 9:00	479	3	0	482	1764
9:00 - 9:15	343	4	3	350	1608
9:15 - 9:30	541	6	1	548	1791
9:30 - 9:45	446	6	2	454	1834
9:45 - 10:00	526	7	0	533	1885
10:00 - 10:15	487	8	1	496	<b>2031</b>
10:15 - 10:30	442	6	2	450	1933
10:30 - 10:45	475	9	0	484	1963
10:45 - 11:00	362	5	1	368	1798
11:00 - 11:15	397	7	0	404	1706
11:15 - 11:30	479	5	2	486	1742
11:30 - 11:45	373	6	1	380	1638
11:45 - 12:00	495	9	1	505	1775
12:00 - 12:15	342	8	0	350	1721
12:15 - 12:30	408	5	1	414	1649
12:30 - 12:45	187	7	2	196	1465
12:45 - 13:00	202	11	0	213	1173
13:00 - 13:15	217	6	1	224	1047
13:15 - 13:30	232	12	2	246	879
13:30 - 13:45	204	8	1	213	896
13:45 - 14:00	179	12	0	191	874
14:00 - 14:15	272	14	2	288	938
14:15 - 14:30	162	9	1	172	864
14:30 - 14:45	232	14	0	246	897
14:45 - 15:00	204	16	2	222	928
15:00 - 15:15	189	17	1	207	847
15:15 - 15:30	202	19	2	223	898
15:30 - 15:45	249	11	0	260	912
15:45 - 16:00	219	12	1	232	922
16:00 - 16:15	187	9	2	198	913
16:15 - 16:30	242	14	0	256	946
16:30 - 16:45	233	9	1	243	929
16:45 - 17:00	265	13	2	280	977
17:00 - 17:15	246	22	2	270	1049
17:15 - 17:30	304	27	2	333	1126
17:30 - 17:45	316	11	1	328	1211
17:45 - 18:00	261	11	2	274	1205
18:00 - 18:15	249	12	1	262	1197
18:15 - 18:30	301	14	2	317	1181
18:30 - 18:45	311	9	0	320	1173
18:45 - 19:00	289	7	1	297	1196
				<b>15721</b>	

Nota. Elaboración propia.



**Anexo 6.** Gráfico de volumen de vehículos por hora del túnel cerro San Eduardo sentido sur-norte día 1.



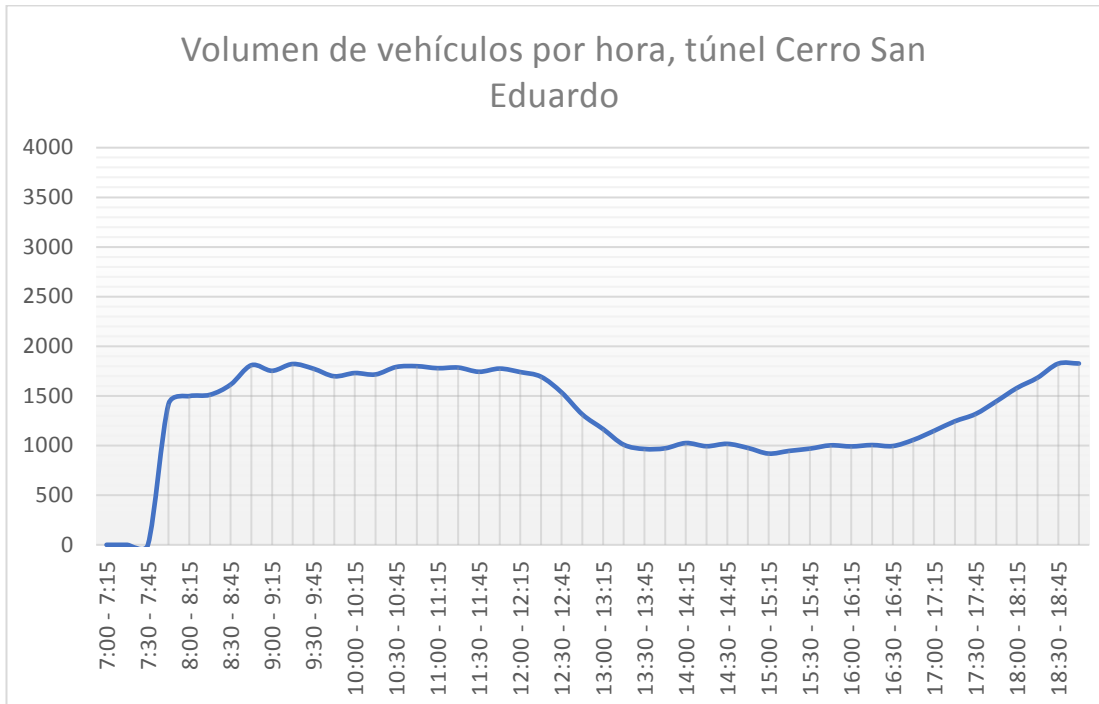
Nota. Elaboración propia.

**Anexo 7.** Conteo de vehículos desde la Av. Barcelona y que pasan por el túnel cerro San Eduardo sentido norte-sur el miércoles 1 de diciembre de 2021, obteniendo la hora pico de 18H00 a 19H00 con un volumen de 1826 vehículos y un total de 17091 vehículos circularon de 7H00 a 19H00.

<b>CONTEO DE VEHÍCULOS</b>					
<b>LUGAR:</b>	TUNEL CERRO SAN EDUARDO DESDE LA VÍA DAULE				
<b>SENTIDO:</b>	HASTA AV BARCELONA				
<b>SENTIDO:</b>	NORTE-SUR				
<b>FECHA:</b>	DICIEMBRE 1 DEL 2021				
HORA	LIVIANOS	PESADOS	BUSES	TOTAL	
7:00 - 7:15	383	11	1	395	0
7:15 - 7:30	365	11	2	378	0
7:30 - 7:45	334	12	1	347	0
7:45 - 8:00	285	13	2	300	1420
8:00 - 8:15	462	9	2	473	1498
8:15 - 8:30	386	4	1	391	1511
8:30 - 8:45	442	8	0	450	1614
8:45 - 9:00	488	5	2	495	1809
9:00 - 9:15	411	5	1	417	1753
9:15 - 9:30	452	6	1	459	1821
9:30 - 9:45	401	2	0	403	1774
9:45 - 10:00	417	1	1	419	1698
10:00 - 10:15	444	3	2	449	1730
10:15 - 10:30	435	8	2	445	1716
10:30 - 10:45	475	2	1	478	1791
10:45 - 11:00	419	6	2	427	1799
11:00 - 11:15	421	8	0	429	1779
11:15 - 11:30	441	9	1	451	1785
11:30 - 11:45	431	5	0	436	1743
11:45 - 12:00	455	2	2	459	1775
12:00 - 12:15	387	6	1	394	1740
12:15 - 12:30	398	5	1	404	1693
12:30 - 12:45	263	12	2	277	1534
12:45 - 13:00	225	11	2	238	1313
13:00 - 13:15	241	6	0	247	1166
13:15 - 13:30	236	9	1	246	1008
13:30 - 13:45	221	11	2	234	965
13:45 - 14:00	231	12	2	245	972
14:00 - 14:15	287	13	0	300	1025
14:15 - 14:30	204	9	1	214	993
14:30 - 14:45	241	15	2	258	1017
14:45 - 15:00	189	14	1	204	976
15:00 - 15:15	231	12	0	243	919
15:15 - 15:30	225	14	2	241	946
15:30 - 15:45	265	15	1	281	969
15:45 - 16:00	224	11	2	237	1002
16:00 - 16:15	223	9	0	232	991
16:15 - 16:30	246	8	1	255	1005
16:30 - 16:45	261	8	2	271	995
16:45 - 17:00	284	14	1	299	1057
17:00 - 17:15	301	22	0	323	1148
17:15 - 17:30	333	16	2	351	1244
17:30 - 17:45	324	19	1	344	1317
17:45 - 18:00	411	15	0	426	1444
18:00 - 18:15	439	17	2	458	1579
18:15 - 18:30	441	13	1	455	1683
18:30 - 18:45	475	9	2	486	1825
18:45 - 19:00	420	7	0	427	1826
				<b>17091</b>	

Nota. Elaboración propia.

**Anexo 4.** Gráfico de volumen de vehículos por hora del túnel cerro San Eduardo sentido norte-sur día 1.





## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Vallejo Robalino Daniel Eduardo**, con C.C: # **0958384133** autor/a del trabajo de titulación: **Contaminación ambiental generada en los túneles de Guayaquil (San Eduardo, Cerro Del Carmen y Cerro Santa Ana)** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 9 de marzo de 2022

f. \_\_\_\_\_

Nombre: **Vallejo Robalino Daniel Eduardo**

C.C: **0958384133**



## REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

### FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

<b>TEMA Y SUBTEMA:</b>	Contaminación ambiental generada en los túneles de Guayaquil (San Eduardo, Cerro Del Carmen y Cerro Santa Ana)		
<b>AUTOR(ES)</b>	Vallejo Robalino Daniel Eduardo		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Ing. von Buchwald de Janon Federico Guillermo		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Ingeniería		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería Civil		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero Civil		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	9 de marzo de 2022	<b>No. PÁGINAS:</b>	DE 113
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Tráfico y transporte, Ingeniería Ambiental		
<b>PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:</b>	congestión vehicular, contaminantes, hora pico, túneles, capacidad de la vía, niveles de servicio, concentración de emisiones		
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>	<p>El presente proyecto de investigación muestra el nivel de contaminación ambiental que se genera producto de las emisiones vehiculares que son contabilizadas durante la hora de mayor demanda en los túneles de Guayaquil como los del Cerro San Eduardo, Cerro del Carmen y Cerro Santa Ana. El objetivo principal y hacia dónde va orientado este trabajo es buscar formas de mitigación, reducción y control de estos contaminantes como pueden ser el uso de sensores remoto de detección de gases, el cambio en el uso de combustibles EURO o mejorando las condiciones prevalecientes de la vía para así aumentar su capacidad y que no se susciten problemas de congestión que a su vez genera problemas de contaminación. Se establecen comparaciones de las emisiones en el momento más crítico del día con los niveles de alerta, alarma y emergencia de la Norma de Calidad de Aire ambiente analizando su aplicabilidad. Estas medidas de mitigación y control están respaldadas con información detallada y cálculos reales de la situación actual de tráfico y con proyecciones a 5 y 10 años respectivamente.</p>		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI		<input type="checkbox"/> NO
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-4-0999285097	<b>E-mail:</b> danielvallejo97@gmail.com	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):</b>	<b>Nombre:</b> Clara Glas Cevallos		
	<b>Teléfono:</b> +593-4 -2206956		
	<b>E-mail:</b> clara.glas@cu.ucsg.edu.ec		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			