



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

“EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES DE
CO₂ DE UN VEHÍCULO A DIFERENTES ALTITUDES, MEDIANTE
CICLOS DE CONDUCCIÓN Y POTENCIA ESPECÍFICA DE VEHÍCULOS”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título en Ingeniería Automotriz

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTORES:

Almeida Benalcázar Luis Fernando

Coloma Heredia Ricardo Alexander

DIRECTOR:

Ing. Fredy Alexander Rosero Obando PhD.

Ibarra-Ecuador

2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD
TÉCNICA DEL NORTE**

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Almeida Benalcázar Luis Fernando

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Coloma Heredia Ricardo Alexander

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“Evaluación del consumo de combustible y emisiones de CO ₂ de un vehículo a diferentes altitudes, mediante ciclos de conducción y Potencia Específica de Vehículos”
AUTOR (ES):	Almeida Benalcázar Luis Fernando Coloma Heredia Ricardo Alexander
FECHA: DD/MM/AAAA	12/10/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	☒ PREGRADO ☐ POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO AUTOMOTRIZ
DIRECTOR /ASESOR:	Ing. Fredy Alexander Rosero Obando PhD. Ing. Fernando Renato Ramírez Paredes PhD.

2. CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

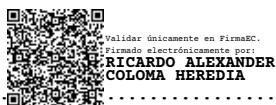
Ibarra, a los 12 días del mes de octubre de 2026

LOS AUTORES:



Firma.....

Luis Fernando Almeida Benalcázar



Firma.....

Ricardo Alexander Coloma Heredia

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 12 de octubre de 2026

MSc. Fredy Alexander Rosero Obando, PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.



Ing. Fredy Alexander Rosero Obando, PhD.
C.C.: 1002641742

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES DE CO₂ DE UN VEHÍCULO A DIFERENTES ALTITUDES, MEDIANTE CICLOS DE CONDUCCIÓN Y POTENCIA ESPECÍFICA DE VEHÍCULOS” elaborado por Almeida Benalcázar Luis Fernando y Coloma Heredia Ricardo Alexander, previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:



Ing. Fredy Alexander Rosero Obando, PhD.
Tutor C.C.: 1002641742



Ing. Fernando Renato Ramírez Paredes, PhD.
Asesor C.C.: 1709992703

DEDICATORIA

Al joven que descubrió su pasión por los motores y el aprendizaje, y a cada etapa de este camino que, pese a los desafíos, sacrificios y largas noches de estudio, encontró la fuerza para seguir adelante y hacer realidad este sueño.

A mi madre Adela y a mi padre Iván, por acompañarme en cada paso de este camino y por nunca dejar de creer en mí, incluso cuando yo mismo cuestionaba mis fuerzas para seguir adelante.

A mi hermana Silvia, por ser ejemplo de fortaleza y dedicación, y por demostrarme que la constancia siempre encuentra su recompensa. Este logro también lleva un poco de ti.

Fernando Almeida

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mi bisabuela Marina Buenaño, quien partió el 4 de diciembre de 2025, antes de que pudiera cumplir la promesa que hicimos de verla acompañarme en este momento y mostrarle el título del que tantas veces hablamos. Aunque ya no pudo estar presente físicamente, su recuerdo me acompañó durante todo este camino y espero que, dondequiera que se encuentre, se sienta orgullosa de este logro.

También dedico este trabajo a mis padres y a mis hermanos, quienes han sido el pilar fundamental de mi formación personal y profesional. Su apoyo, esfuerzo, comprensión y confianza hicieron posible que hoy pueda culminar esta etapa de mi vida.

Por último, dedico este logro a mis familiares y amigos que estuvieron presentes a lo largo de este proceso. Algunos ya no se encuentran conmigo, pero cada uno dejó una huella que, de una u otra forma, contribuyó a que hoy pudiera alcanzar esta meta.

Ricardo Coloma H.

AGRADECIMIENTO

A Dios por iluminar mi camino y acompañarme en cada paso de este proceso. Gracias por concederme sabiduría, perseverancia y fortaleza necesarias para superar cada desafío permitiéndome culminar con éxito esta etapa de mi vida.

A mis padres, quienes han sido pilar fundamental de mi formación profesional y personal, y la inspiración de cada uno de mis pequeños logros. Gracias por su amor incondicional, por los sacrificios y por enseñarme que los sueños se alcanzan con trabajo, esfuerzo y dedicación.

A mi hermana, por su cariño, apoyo y confianza a lo largo de este camino, gracias por acompañarme siempre con una palabra de aliento y por compartir conmigo la alegría de este logro.

A mi amigo y compañero Ricardo Coloma por la responsabilidad, esfuerzo y dedicación, cuando nos tocó resolver los inconvenientes que se presentaron a lo largo de este proyecto.

A mis compañeros de clase, gracias por todas las experiencias que compartimos a lo largo de esta etapa universitaria.

A mi tutor de tesis, Ingeniero Fredy Rosero, por su paciencia para aclarar nuestras dudas y por sus valiosos aportes tanto académicos como logísticos que permitieron concluir con éxito esta investigación. Gracias por compartir sus conocimientos y experiencia durante todo este proceso.

A todos los docentes de la carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Técnica del Norte, quienes contribuyeron a mi formación. Gracias por compartir sus conocimientos y experiencias, dejaron huella en mi desarrollo académico y profesional.

Finalmente, al Ingeniero Luis Tipanluisa, quien, a pesar de no pertenecer a la institución, estuvo presto para proporcionar ayuda en la realización de las campañas experimentales. Gracias por la apertura para compartir sus conocimientos y para colaborar con nosotros en este proyecto.

Fernando Almeida

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, Cecilia Heredia y Jorge Coloma, por su amor, comprensión y apoyo incondicional durante toda mi formación académica. Gracias por acompañarme en los momentos más difíciles y por brindarme siempre la motivación necesaria para seguir adelante.

A mis hermanos, Melany y Julián Coloma, por su compañía, apoyo y ayuda cuando más lo necesité. Su respaldo fue fundamental para alcanzar este objetivo.

Un reconocimiento especial a mi familia, especialmente a mis abuelos Manuel Heredia y Mercedes Robles, cuyo recuerdo continúa acompañándome y motivándome en cada paso de mi vida.

De igual manera, extendiendo mi gratitud a mi compañero de tesis y amigo, Luis Almeida, por el compromiso, la dedicación y el trabajo realizado durante el desarrollo de esta investigación. También a mis amigos Jeremy Sánchez y David Aguirre, con quienes compartí gran parte de esta etapa universitaria.

Mi gratitud también para mis amigos del colegio, Sebastián Torres, Josue Landeta, Jayro Pupiales y Milton Pabón, por su amistad y por el apoyo brindado tanto antes como durante esta etapa universitaria. De manera muy especial, agradezco a mi mejor amigo, Pablo Nastacuaz, con quien he compartido innumerables experiencias dentro y fuera de la universidad. Su amistad, confianza y apoyo constante han sido un gran impulso a lo largo de este camino.

Un especial reconocimiento a Fredy Rosero, por su orientación, paciencia y valiosos aportes como director de este trabajo de titulación. Sus conocimientos, experiencia y confianza fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Por último, agradezco a todos los docentes de la Carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Técnica del Norte, quienes compartieron sus conocimientos y contribuyeron a mi formación profesional a lo largo de estos años. También agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) y al ingeniero Luis Tipanluisa, por su apoyo con los equipos y los conocimientos necesarios para la toma de datos en la ciudad de Riobamba.

Ricardo Coloma H.

RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto de la altitud sobre el consumo de combustible y emisiones de CO₂ de un vehículo Chevrolet Aveo family. La bibliografía mostró que la altitud influye en el consumo de combustible mediante la diferencia en la presión atmosférica y densidad de aire con respecto al nivel del mar. La campaña experimental se llevó a cabo en 5 ciudades (Esmeraldas, Santo Domingo, Ibarra, Tulcán y Riobamba), con altitudes que van desde los 6 a 2980 m s.n.m., en las cuales se registró datos de operación del motor con ayuda de un dispositivo ELM327, de posición y flujo físico de combustible mediante 2 flujómetros de combustible ACAN100 en conjunto con un CANEdge2, y de emisión de CO₂ mediante un PEMS de la marca 3DATX, todo esto con frecuencia de 1 Hz. Se trató los datos con ayuda de software de código abierto, como R y Asammdf, lo que facilitó un enfoque preciso en la caracterización del funcionamiento del vehículo. Los resultados se representaron mediante histogramas de consumo de combustible y emisiones de CO₂ por bins de VSP además de una simulación de una ruta RDE realizada en la ciudad de Ibarra. Los resultados muestran que las ciudades de menor altitud registran mayores tasas de consumo de combustible (Esmeraldas 83.45 g/km y Santo Domingo 77.95 g/km) y emisiones instantáneas de CO₂ (Esmeraldas 257.66 gCO₂/km y Santo Domingo 240.69 gCO₂/km), alcanzando diferencias cercanas al 20%, comparado a las ciudades de mayor altitud (Ibarra 66.69 g/km y Tulcán 66.34 g/km) (Ibarra 205.93 gCO₂/km y Tulcán 204.83 gCO₂/km).

Palabras clave: altitud, consumo de combustible, emisiones de CO₂, Potencia Específica del Vehículo (VSP), ciclo de conducción.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the effect of altitude on fuel consumption and CO₂ emissions of a Chevrolet Aveo Family vehicle. The literature showed that altitude influences fuel consumption through differences in atmospheric pressure and air density relative to sea level. The experimental campaign was carried out in 5 cities (Esmeraldas, Santo Domingo, Ibarra, Tulcán, and Riobamba), with altitudes ranging from 6 meters to 2,980 meters. In these locations, engine operation data was recorded using an ELM327 device; position and physical fuel flow data were collected using two ACAN100 fuel flow meters combined with a CANEdge2; and CO₂ emissions were monitored with a 3DATX Portable Emissions Measurement System (PEMS), all at a frequency of 1 Hz. Data processing was conducted using open-source software, such as R and Asammdf, which facilitated a precise approach to characterizing vehicle performance. The results were represented through fuel consumption and CO₂ emissions histograms by VSP bins, as well as a simulation of an RDE route completed in the city of Ibarra. The results show that lower altitude cities register higher rates of fuel consumption (Esmeraldas 83.45 g/km and Santo Domingo 77.95 g/km) and instantaneous CO₂ emissions (Esmeraldas 257.66 gCO₂/km and Santo Domingo 240.69 gCO₂/km), reaching differences close to 20%, compared to the higher altitude cities (Ibarra 66.69 g/km and Tulcán 66.34 g/km) (Ibarra 205.93 gCO₂/km and Tulcán 204.83 gCO₂/km).

Keywords: altitude, fuel consumption, CO₂ emissions, Vehicle Specific Power (VSP), driving cycle.

LISTA DE SIGLAS

EPA. Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de EEUU)

CO. Monóxido de carbono.

NO_x. Óxidos de nitrógeno.

CO₂. Dióxido de carbono.

RDE. Real Driving Emissions (Emisiones en Conducción Real).

PM. Particulate Matter (Material particulado).

GEI. Gases de Efecto Invernadero.

PEMS. Portable Emissions Measurement System (Sistema Portátil de Medición de Emisiones).

OBD. On-Board Diagnostics (Diagnóstico a Bordo).

GPS. Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global).

BEP. Barriles Equivalentes de Petróleo.

GgCO₂eq. Giga gramos de dióxido de Carbono Equivalente.

ODS. Objetivo de Desarrollo Sostenible.

MEP. Motor de Encendido Provocado.

AEADE. Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador.

MCIA. Motor de Combustión Interna Alternativo.

PMS. Punto Muerto Superior.

PMI. Punto Muerto Inferior.

AAA. Avance a la Apertura de la Admisión.

RCA. Retraso al Cierre de la Admisión.

AE. Avance al Encendido.

AAE. Avance a la Apertura del Escape.

RCE. Retraso al cierre del Escape.

A/F. Relación aire-combustible.

MEC. Motor de Encendido por Compresión.

HC. Hidrocarburos no quemados.

CH₄. Metano.

CARB. California Air Resources Board (Junta de Recursos del Aire de California).

LEV. Low Emission Vehicle (Vehículo de Bajas Emisiones).

UNECE. United Nations Economic Commission for Europe (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa).

LCV. Light Commercial Vehicle (Vehículo Comercial Ligero).

PROCONVE. Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Programa de Control de la Contaminación del Aire por Vehículos Automotores).

INEN. Servicio Ecuatoriano de Normalización.

RTE. Reglamento Técnico Ecuatoriano.

NTE. Normas Técnicas Ecuatorianas.

RON. Research Octane Number (Número de Octano de Investigación).

H2O. Vapor de Agua.

ECU. Engine Control Unit (Unidad de control de motor).

NEDC. New European Driving Cycle.

FTP. Federal Test Procedure (Procedimiento de Prueba Federal).

EMEP/EEA. Guía de Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos.

IVE. International Vehicle Emissions (Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares).

CE-CERT. College of Engineering Center for Environmental Research and Technology (Centro de Investigación y Tecnología Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de California, Riverside).

GSSR. Global Status Report (Informe sobre la Situación Mundial de las Energías Renovables).

ISSRC. International Sustainable Systems Research Center (Centro de Investigación de Sistemas Sustentables Internacionales).

VSP. Vehicle Specific Power (Potencia Especifica del Vehículo).

RMSE. Root Mean Square Error (Raíz del Error Cuadrático Medio).

UDDS. Urban Dynamometer Driving Schedule (Programa de Conducción en Dinamómetro Urbano).

LCA. Life Cycle Assessment (Análisis de Ciclo de Vida).

ANT. Agencia Nacional de Tránsito.

IDE. Integrated Development Environment (Entorno de Desarrollo Integrado).

AVL. Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List (Instituto de Motores de Combustión Interna List).

IBM. International Business Machines (Máquinas de Negocios Internacionales).

SPSS. Statistical Package for the Social Sciences (Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales).

GNSS. Global Navigation Satellite System (Sistema Global de Navegación por Satélite).

CAN. Controller Area Network (Red de Área de Controlador).

ISO. International Organization for Standardization / Organisation internationale de normalisation (Organización Internacional de Normalización).

KWP. Keyword Protocol (Protocolo de Palabra Clave).

SAE. Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros Automotrices).

VPW. Variable Pulse Width (Ancho de Pulso Variable).

PNC. Particle Number Counter (Contador de Número de Partículas).

NDIR. Non-Dispersive Infrared (Infrarrojo No Dispersivo).

CANup. Controller Area Network Telematics Gateway (Pasarela Telemática de Red de Área de Controlador).

CAN H. Controller Area Network High (Línea Alta de la Red de Área de Controlador).

CAN L. Controller Area Network Low (Línea Baja de la Red de Área de Controlador).

GND. Ground (Tierra o Masa).

DB9. D-Subminiature size B, 9 pins (Conector D-Subminiatura de 9 pines).

RTC. Real-Time Clock (Reloj de Tiempo Real).

UTC. Coordinated Universal Time / Temps universel coordonné (Tiempo Universal Coordinado).

PID. Parameter ID (Identificador de Parámetro).

DBC. Database CAN (Base de Datos CAN).

CSV. Comma-Separated Values (Valores Separados por Comas).

MF4. Measurement Data Format version 4 (Formato de Datos de Medición Versión 4).

MOVES. Motor Vehicle Emission Simulator (Simulador de Emisiones de Vehículos de Motor).

BTE. Brake Thermal Efficiency (Eficiencia Térmica al Freno).

BSFC. Brake Specific Fuel Consumption (Consumo Específico de Combustible).

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	21
1.1 Problema de investigación.....	21
1.1.1 Antecedentes	21
1.1.2 Planteamiento del problema.....	22
1.2 Justificación	23
1.3 Objetivos.....	23
1.3.1 Objetivo General.....	23
1.3.2 Objetivos Específicos.....	23
1.4 Alcance	24
2 CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	25
2.1 Fundamento de los motores de combustión.....	25
2.1.1 Evolución del motor de combustión	25
2.1.2 Motor de ciclo Otto.....	26
2.1.3 Motor de ciclo Diesel.....	26
2.1.4 Principio de funcionamiento Motor MEP.....	27
2.1.5 Ciclo real de trabajo de un motor Ciclo Otto	28
2.1.6 Parámetros básicos de funcionamiento.....	29
2.1.7 Parámetros indicados y efectivos de un motor	31
2.1.8 Componentes.....	32
2.2 Fundamentos de combustión y formación de emisiones	35
2.2.1 Procesos de combustión de un motor MEP	35
2.2.2 Emisiones vehiculares.....	36
2.2.3 Tecnologías para reducir el consumo de combustible	38
2.2.4 Normativa de control de emisiones.....	39
2.3 Efecto de la altitud en el motor de combustión.....	41
2.3.1 Factores que afectan al desempeño del vehículo	41
2.3.2 Efecto de la altitud en la combustión.....	45
2.4 Enfoques para medir emisiones	47
2.4.1 Métodos dinámicos	47
2.4.2 Aplicación del enfoque VSP	48
2.4.3 Ciclos de Conducción	49
2.5 Programas de procesamiento de datos	51
2.5.1 Entorno de desarrollo integrado Rstudio	51
2.5.2 MATLAB y Simulink.....	52
2.5.3 Lenguaje de Programación Python.....	52
2.5.4 AVL BOOST y LabVIEW.....	53

2.5.5	Programas para Análisis Estadístico y Gestión de Datos	53
3	CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS	54
3.1	Determinación de variables de estudio	54
3.1.1	Variables cinemáticas	54
3.1.2	Estados de conducción.....	55
3.1.3	Potencia específica del vehículo	55
3.1.4	Variables de operación de motor	56
3.2	Selección de vehículo	56
3.2.1	Vehículo seleccionado	57
3.3	Selección de equipos.....	58
3.3.1	ELM327	59
3.3.2	CANEdge2.....	60
3.3.3	Flujómetros DFM ACAN 100	61
3.3.4	PEMS parSYNC FLEX-PNC	62
3.3.5	Estación de energía portátil OUKITEL P2001 Plus de 2400 W/2048 Wh.....	63
3.3.6	Cables de conexión	63
3.4	Determinación de rutas por nivel altitudinal.....	65
3.4.1	Esmeraldas	65
3.4.2	Santo Domingo	67
3.4.3	Ibarra	69
3.4.4	Tulcán	71
3.4.5	Riobamba	73
3.5	Pruebas piloto.....	75
3.5.1	Pruebas de comunicación OBDII – ELM327- Torque Pro.....	75
3.5.2	Configuración CANEdge2.....	77
3.5.3	Conexión flujómetros.....	78
3.5.4	Conexión equipo PEMS.....	80
3.5.5	Configuración final de los equipos de medición.....	80
3.6	Campañas experimentales.....	81
3.7	Procesamiento de Datos	82
3.7.1	Pre-procesamiento de datos	82
3.7.2	Procesamiento de datos.....	88
3.7.3	Post procesamiento	93
3.8	Simulación de consumo de combustible y emisiones de CO ₂ a diferente altitud	98
4	CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	100
4.1	Comparación de medidas de consumo de combustible entre equipos.....	100
4.1.1	Comparación señales de consumo combustible.....	100

4.1.2	Correlación entre señales de consumo de combustible.....	101
4.1.3	Comparación en factores de consumo y CO ₂ en términos de distancia.....	102
4.1.4	Comparación de consumo por intervalos de VSP.....	103
4.2	Cinemática y modos de operación por nivel de altitud.....	104
4.2.1	Cinemática en Esmeraldas a 15 m s.n.m.....	104
4.2.2	Cinemática en Santo Domingo a 625 m s.n.m.....	105
4.2.3	Cinemática en Ibarra a 2225 m s.n.m.	105
4.2.4	Cinemática en Tulcán a 2950 m s.n.m.	106
4.2.5	Modos de operación por nivel de altitud.....	106
4.3	Evaluación del efecto de la altitud mediante el enfoque VSP	108
4.3.1	Correlación VSP y consumo instantáneo a diferente altitud	108
4.3.2	Análisis consumo y CO ₂ por intervalo de VSP	109
4.3.3	Análisis consumo y CO ₂ mediante intervalo VSP+Velocidad	111
4.3.4	Mapas de consumo: VSP vs Velocidad	113
4.4	Comparación consumo y CO ₂ por ciudad.....	115
4.4.1	Factor consumo en términos de distancia (Sin ralentí).....	115
4.4.2	Factor de emisión de CO ₂ en términos de distancia recorrida (Sin Ralentí)	116
4.4.3	Factor emisión en términos de energía de tracción (Sin Ralentí)	117
4.4.4	Eficiencia térmica al Freno (Sin Ralentí).....	117
4.5	Distribución espacial de emisión de CO ₂ a diferente altitud	118
4.5.1	Distribución CO ₂ Esmeraldas a 15 m s.n.m.....	118
4.5.2	Distribución CO ₂ Santo Domingo a 625 m s.n.m.....	120
4.5.3	Distribución CO ₂ Ibarra a 2225 m s.n.m.....	122
4.5.4	Distribución CO ₂ Tulcán a 2950 m s.n.m.	123
4.6	Efecto de la altitud en el consumo y CO ₂ bajo un mismo ciclo de conducción	124
4.6.1	Tasa de consumo y CO ₂ bajo un mismo ciclo de conducción	124
4.6.2	Factores de consumo y CO ₂ bajo un mismo ciclo conducción	125
4.6.3	Variación en el consumo y CO ₂ bajo un mismo ciclo de conducción	126
5	CAPÍTULO V Conclusiones y recomendaciones.....	128
5.1	Conclusiones	128
5.2	Recomendaciones	129
6	Referencias Bibliográficas	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Fases de funcionamiento teórico de los motores de ciclo Otto de cuatro tiempos ...</i>	28
Tabla 2. <i>Resumen de estudios sobre el efecto de la altitud en motores gasolina</i>	46
Tabla 3. <i>Variables cinemáticas</i>	55
Tabla 4. <i>Rangos cinemáticos de los modos de operación</i>	55
Tabla 5. <i>Definiciones de los modos de funcionamiento para el consumo energético acumulado</i>	56
Tabla 6. <i>Variables de operación del motor</i>	56
Tabla 7. <i>Características técnicas Chevrolet Aveo Family 2017</i>	58
Tabla 8. <i>Descripción y uso de los equipos</i>	59
Tabla 9. <i>Características técnicas CANEdge2</i>	61
Tabla 10. <i>Descripción técnica flujómetros DFM ACAN 100</i>	62
Tabla 11. <i>Características de medición PEMS 3DATX</i>	63
Tabla 12. <i>Características de las rutas seleccionadas para las campañas experimentales</i>	82
Tabla 13. <i>Características cinemáticas Ruta Esmeraldas</i>	105
Tabla 14. <i>Características cinemáticas Ruta Santo Domingo</i>	105
Tabla 15. <i>Características Cinemáticas Ruta Ibarra</i>	106
Tabla 16. <i>Características cinemáticas ruta Tulcán</i>	106
Tabla 17. <i>Factores de emisión por distancia recorrida</i>	115
Tabla 18. <i>Factores de emisión de CO₂ y consumo de combustible simulados</i>	126
Tabla 19. <i>Variación porcentual de factores de emisión de CO₂ y consumo de combustible.</i>	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fases de un motor 4 tiempos	26
Figura 2. <i>Diagrama de trabajo ideal de un motor diésel</i>	27
Figura 3. <i>Diagrama teórico de trabajo de un motor ciclo Otto</i>	27
Figura 4. a) <i>Ciclo Otto real y b) ciclo Otto ideal</i>	29
Figura 5. <i>Parámetros básicos de operación de un motor</i>	30
Figura 6. <i>Curvas características de un motor MEP</i>	31
Figura 7. <i>Parámetros indicados y efectivos de un motor</i>	32
Figura 8. <i>Componentes de un motor de combustión interna alternativo</i>	32
Figura 9. <i>Tipos y ubicación de los segmentos</i>	34
Figura 10. <i>Combustión ideal con frente de llama</i>	35
Figura 11. <i>Tipos de emisiones vehiculares y pérdidas de energía</i>	36
Figura 12. <i>Problemas causados por los gases de efecto invernadero</i>	37
Figura 13. <i>Concentraciones de emisiones contaminantes en MEP en función del dosado relativo</i>	38
Figura 14. <i>Tecnologías para reducir el consumo de combustible y emisiones</i>	39
Figura 15. <i>Límites europeos de emisión de gases para vehículos gasolina</i>	40
Figura 16. <i>Estándares de emisiones para vehículos ligeros en Argentina</i>	40
Figura 17. <i>Estándares de emisiones de vehículos de pasajeros y comerciales ligeros con motor Otto y Diesel en Brasil</i>	41
Figura 18. <i>Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor de gasolina en Ecuador (Prueba estática)</i>	41
Figura 19. <i>Dinámica longitudinal del vehículo</i>	42
Figura 20. <i>Curvas de isoconsumo de un motor MEP sobrealimentado</i>	44
Figura 21. <i>Mapas de VSP-velocidad para estimación de emisiones según normativa</i>	49
Figura 22. <i>Ciclos de conducción representativos</i>	50
Figura 23. <i>Flujograma de actividades del proyecto de titulación</i>	54
Figura 24. <i>Número de vehículos matriculados 2008-2014</i>	57
Figura 25. <i>Vehículo usado en la campaña experimental</i>	57
Figura 26. <i>Registrador ELM327</i>	60
Figura 27. <i>Registrador CAN Edge 2</i>	60
Figura 28. <i>Medidor de flujo de combustible</i>	61
Figura 29. <i>Medidor de Emisiones Portátil</i>	62
Figura 30. <i>Estación de energía portátil</i>	63
Figura 31. <i>Cable de conexión común</i>	64
Figura 32. <i>Cable Serial RS232</i>	64
Figura 33. <i>Cable OBD II en "Y"</i>	65
Figura 34. <i>Mapa y características principales de la ciudad de Esmeraldas</i>	66
Figura 35. <i>Perfil topográfico, ciudad Esmeraldas</i>	67
Figura 36. <i>Trayecto de estudio de la ciudad de Esmeraldas</i>	67
Figura 37. <i>Mapa y características principales de la ciudad de Santo Domingo</i>	68
Figura 38. <i>Perfil topográfico, ciudad Santo Domingo</i>	69
Figura 39. <i>Trayecto de estudio de la ciudad de Santo Domingo</i>	69
Figura 40. <i>Mapa y características principales de la ciudad de Ibarra</i>	70
Figura 41. <i>Perfil topográfico, ciudad Ibarra</i>	71
Figura 42. <i>Trayecto de estudio de la ciudad de Ibarra</i>	71
Figura 43. <i>Mapa y características principales de la ciudad de Tulcán</i>	72
Figura 44. <i>Perfil topográfico, ciudad Tulcán</i>	73
Figura 45. <i>Trayecto de estudio de la ciudad de Tulcán</i>	73
Figura 46. <i>Mapa y características principales de la ciudad de Riobamba</i>	74

Figura 47. Perfil topográfico, ciudad Riobamba	74
Figura 48. Trayecto de estudio de la ciudad de Riobamba.....	75
Figura 49. Interfaz Torque PRO (Sensores disponibles para monitoreo)	76
Figura 50. Interfaz Torque PRO (Perfil del vehículo).....	76
Figura 51. Interfaz de configuración de CANEdge2.....	77
Figura 52. Sistema de coordenadas IMU vistas desde el superior	78
Figura 53. Esquema “Diferencial – De presión”	79
Figura 54. Instalación Flujómetros.....	79
Figura 55. Instalación del Equipo PEMS	80
Figura 56. Configuración final de los equipos para las campañas experimentales.....	81
Figura 57. Flujograma de procesamiento de datos	82
Figura 58. Diagrama de flujo Pre-procesamiento de datos	83
Figura 59. Interfaz para decodificación Asammdf.....	84
Figura 60. Interfaz para registro de datos FLEXstudio.....	85
Figura 61. Extracto de código: modelo matemático para transformación a flujo de gases...85	
Figura 62. Extracto de código: método de correlación Cruzada	87
Figura 63. Variación instantánea de consumo de combustible y régimen de motor	87
Figura 64. Extracto de código, de aplicación del factor de corrección al flujo de combustible registrado por flujómetros	88
Figura 65. Diagrama de flujo procesamiento de datos.....	89
Figura 66. Fragmento del código para la construcción del diagrama de barras.	90
Figura 67. Procedimiento para el cálculo y clasificación del VSP.	91
Figura 68. Extracto de código de cálculo de factores de emisión y consumo	92
Figura 69. Diagrama de flujo post procesamiento de datos.....	94
Figura 70. Extracto de código para el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson.....95	
Figura 71. Fragmento de código para la construcción del diagrama de barras comparativo de emisiones y consumo de combustible por bins VSP.	96
Figura 72. Fragmento del código para la generación de los perfiles de emisiones y tasa de combustible	97
Figura 73. Fragmento del código para la construcción de los mapas de calor.	98
Figura 74. Perfil de velocidad en función de la distancia recorrida de la Prueba 1 en la ciudad de Ibarra	99
Figura 75. Diagrama: simulación de consumo de combustible y emisiones de CO ₂	99
Figura 76. Señales de consumo de combustible: ELM327, CANEdge2, PEMS	101
Figura 77. Correlación lineal de consumo de combustible (Riobamba)	102
Figura 78. Factores de consumo de combustible y emisión de CO ₂ (Riobamba).....	103
Figura 79. Comportamiento consumo de combustible en los diferentes equipos de medición por intervalos VSP	104
Figura 80. Distribución porcentual de los modos de operación por ciudad.	107
Figura 81. Correlación entre VSP-consumo instantáneo a diferente altitud.....	108
Figura 82. Emisiones de CO ₂ y consumo instantáneo de combustible para los distintos intervalos de VSP.....	110
Figura 83. Distribución continua de la tasa de emisiones de CO ₂ y del consumo instantáneo de combustible para regímenes de velocidad.	112
Figura 84. Mapas Consumo instantáneo de combustible en función de VSP vs. Velocidad .	114
Figura 85. Factores de consumo de combustible por nivel de altitud (Sin Ralentí).....	116
Figura 86. Factores de emisión de CO ₂ por nivel de altitud (Sin Ralentí)	117
Figura 87. Factores de emisión de CO ₂ en términos de Energía de Tracción (Sin Ralentí) .	117
Figura 88. Eficiencia térmica al freno por nivel de altitud (Sin Ralentí)	118

Figura 89. Mapa de calor de las tasas de emisión de CO ₂ en los tramos urbano, suburbano y de autopista en Esmeraldas.	119
Figura 90. Mapa de calor de las tasas de emisión de CO ₂ en los tramos urbano, suburbano y de autopista en Santo Domingo.	121
Figura 91. Mapa de calor de las tasas de emisión de CO ₂ en los tramos urbano, suburbano y de autopista en Ibarra.....	122
Figura 92. Mapa de calor de las tasas de emisión de CO ₂ en los tramos urbano, suburbano y de autopista en Tulcán.	123
Figura 93. Simulación del consumo de combustible y emisiones de CO ₂ bajo condiciones cinemáticas equivalentes a diferentes altitudes, ventana de 1000 s a 2000 s	125
Figura 94. Factores consumo y CO ₂ en ciclo conducción	126

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Problema de investigación.

1.1.1 Antecedentes

El transporte es la respuesta de la sociedad a la necesidad de llegar de un lugar a otro en el menor tiempo posible (Bellott Carlos et al., 2023). Lo que ha provocado un aumento en el parque automotor ecuatoriano. En consecuencia, la generación de gases de escape como CO, NOx, y CO₂ han tenido un notable incremento (Varas Ponce et al., 2022).

Por tal motivo se han realizado estudios como el de Tan et al. (2025) que identificó la relación existente entre el VSP y las emisiones de dióxido de carbono, como un principio de corrección en la función de emisión de CO₂ medidas en laboratorio, proponiendo un factor promedio RDE. Para reducir el impacto del comportamiento de conducción y las condiciones de tráfico. Así mismo Qi et al. (2023), analizan la influencia de la altitud en las emisiones de CO, CO₂ y NOx en un vehículo gasolina y un vehículo diésel. Llegando a la conclusión que los factores de emisión de los vehículos diésel fueron mayores, atribuyendo como factor el ambiental más determinante que afecta a las emisiones de gases de escape a la presión atmosférica.

De igual forma, J. Wang et al. (2025) realizaron una investigación sobre la influencia de la altitud, la temperatura ambiente y el estilo de conducción en las emisiones y el consumo de combustible de un vehículo liviano a gasolina. Donde, se corroboró que una conducción agresiva, caracterizada por aceleraciones bruscas, incrementa significativamente el consumo de combustible y las emisiones de gases de escape, independientemente de la altitud. Finalmente, el estudio también evidenció que el arranque en frío puede aumentar entre un 4.72 % y un 225 % las emisiones de CO, y hasta un 430 % la cantidad de material particulado (PM), debido a la combustión deficiente y al retraso en el funcionamiento óptimo del sistema de postratamiento, caracterizado por el tiempo que el motor demora en alcanzar su temperatura óptima de funcionamiento.

En otro estudio realizado por Mera et al. (2022) que trata de la inclusión de los datos del motor para la evaluación de energía y gases contaminantes. Como resultado propuso el Método VSP+M en el que se añade los mapas de motor al método VSP convencional, logrando una mejor estimación de los factores de emisión de CO₂ entre un 7% y 63% y de NOx entre 2% y 15%.

Por último, Rosero Obando et al. (2024) propusieron una metodología basada en el uso del sistema de diagnóstico a bordo (OBD) como alternativa de bajo costo para la elaboración de mapas de motor y evaluación de emisiones de gases de escape en condiciones de tráfico real. Se emplearon instrumentos como el dispositivo OBD ELM327 en conjunto con la aplicación móvil Torque Pro, y un GPS GL-770 para registrar la altitud, la posición geográfica y la velocidad del vehículo.

1.1.2 Planteamiento del problema

América Latina alberga la cadena montañosa más extensa del mundo, la cordillera de los Andes. Esta cadena montañosa atraviesa Argentina, Bolivia, Chile, Ecuador, Perú, y una pequeña parte de Venezuela albergando 87 millones de personas (WWF, 2020). Sus elevadas cumbres y sus extensos valles han creado diversas condiciones climáticas que influyen en el funcionamiento de los vehículos que se desplazan por las carreteras que la atraviesan a más de 2000 metros de altura. Vehículos forman parte de los más grandes emisores de GEI (Gases de Efecto Invernadero) representando el 39% del total de emisiones de GEI en Latinoamérica y el Caribe (Merlo, 2023).

De esta manera muchos autores han buscado la forma de estimar la cantidad de combustible empleada y el factor de emisión de CO₂ de un automotor circulando durante pruebas RDE. Tal es el caso de los estudios realizados en Pekín por Tan et al. (2025) y en el Tíbet por Qi et al. (2023) que muestran la medición de emisiones de CO₂ sobre vehículos, todos estos en condiciones de tráfico real demostrando que las emisiones de gases de escape son elevadas en comparación a las que se determinan en un laboratorio con condiciones controladas y bajo las cuales se realiza el proceso de homologación.

No obstante, en Ecuador no existe la disponibilidad de recursos tecnológicos como equipos PEMS (Sistema Portátil de Medición de Emisiones) que ayudan a registrar el consumo de combustible y emisión de gases de escape en condiciones de tráfico real. Por lo que haciendo frente a esta problemática se han realizado estudios como el de (Arias Cuasapaz, 2025) y el de Rosero Obando et al. (2024) en los que se obtienen datos cinemáticos del vehículo mediante un dispositivo de conexión OBD-II en conjunto con un dispositivo de posicionamiento global GPS. Datos usados para estimar y evaluar las emisiones de CO₂ en tráfico real sin necesidad de usar un PEMS.

1.2 Justificación

Tomando en cuenta lo expuesto en el objetivo número siete del “Plan de Desarrollo para el nuevo Ecuador 2024-2025” que hace referencia a fomentar el uso responsable de los recursos naturales bajo un entorno ambiental sostenible, incrementando el ahorro de 32.6 a 41.5 millones en BEP (Barriles Equivalentes de Petróleo), optimizando la eficiencia energética en el sector de hidrocarburos (Secretaría Nacional de Planificación, 2024).

Así mismo la “Política Nacional de Movilidad Urbana Sostenible del Ecuador 2023-2030” busca disminuir el impacto de la movilidad sobre el medio ambiente, promover los modos de movilidad más eficiente y sostenible, y reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero vehicular en un 18%, de 19.844,53 a 16.272,51 GgCO₂eq (Giga gramos de dióxido de Carbono Equivalente) (Muñoz et al., 2023).

Mientras que en el contexto internacional las Naciones Unidas a través del ODS (Objetivo de Desarrollo Sostenible) número 13, plantea tomar acciones urgentes para enfrentar el cambio climático y sus consecuencias (Naciones Unidas, 2018). Por lo que esta investigación busca contribuir al entendimiento de los factores que inciden en el consumo de combustible de un vehículo y emisiones de gases de efecto invernadero CO₂. Además, servirá de apoyo para nuevos proyectos de investigación en los que se busque una alternativa de bajo costo que permita estimar de manera precisa la emisión de CO₂ y el rendimiento en general de un vehículo en condiciones de tráfico real.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ de un vehículo a diferentes altitudes mediante la aplicación de ciclos de conducción y potencia específica del vehículo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Comprender el efecto de la altitud sobre el rendimiento y las emisiones de CO₂ de un motor de combustión interna.
- Desarrollar una campaña experimental en un vehículo operando en ciudades con diferentes altitudes, con la finalidad de registrar datos de consumo de combustible y emisiones de CO₂.
- Caracterizar el consumo de combustible y emisiones de CO₂ del vehículo a diferentes alturas, mediante el enfoque de VSP (potencia específica del vehículo).

- Analizar el efecto de la altitud en los factores de emisión de CO₂ de un vehículo a diferentes altitudes mediante un ciclo de conducción.

1.4 Alcance

Para el desarrollo del presente proyecto de titulación, se realizará un análisis bibliográfico con la finalidad de comprender el efecto de la altitud sobre el funcionamiento del motor de combustión interna, el consumo de combustible, las emisiones de CO₂; mediante el enfoque de VSP, y la aplicación de un determinado ciclo de conducción.

Seguido de esto se desarrollará una campaña experimental que tiene como objetivo evaluar el desempeño de un vehículo liviano equipado con un motor de encendido provocado MEP, con un cilindraje entre 1000 y 2200 centímetros cúbicos, operando en tráfico real en cuatro diferentes ciudades del Ecuador, ciudades que deberán estar ubicadas desde 6 metros sobre el nivel del mar hasta 3000 metros aproximadamente. Dentro de esta campaña se usarán equipos que permitan registrar datos sobre la operación del motor y del vehículo en general a partir del sistema OBD II, GPS, flujómetros de combustible.

Con la campaña experimental se pretende registrar datos del vehículo como la distancia recorrida, velocidad y aceleración, y en lo que respecta al motor: régimen de giro, grado de carga y flujo de combustible; con los cuales se caracterizará el funcionamiento del vehículo mediante ventanas de potencia en las diferentes ciudades de prueba.

Más adelante, se procesará los datos (mediante el uso de un software de uso libre) donde se etiquetarán y limpiarán. Finalmente, analizará los factores de emisión de CO₂ y el consumo de combustible en las diferentes ciudades bajo un ciclo de conducción.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamento de los motores de combustión

El vehículo en la actualidad es el medio más popular tanto para transporte de pasajeros como de mercancías, satisfaciendo una necesidad real de movilidad humana. En este contexto, los motores de combustión interna son los más populares para impulsar un automotor, ya sea mediante un motor gasolina o un motor diésel. Según la AEADE en el Ecuador el primer bimestre de este 2025 se han vendido 16 577 vehículos nuevos de las diferentes marcas que se comercializan en el país, mientras que apenas se vendieron 470 vehículos eléctricos y 2 454 vehículos híbridos (AEADE, 2025). A pesar de la popularidad que están tomando los vehículos de propulsión eléctrica e híbrida, los motores de combustión se niegan a desaparecer. Su amplio rango de potencia, que puede ir desde decenas de vatios hasta decenas de megavatios, dependiendo de su tipo de construcción. Además, su versatilidad para usar combustible líquido, gaseoso e incluso sólido, si finalmente puede ser pulverizado, da apertura para que pueda usar una fuente de energía con gran poder calorífico, brindándole una autonomía superior frente a sus competidores (Payri & Desantes, 2011a).

2.1.1 Evolución del motor de combustión

El motor de combustión no empieza ni termina con el motor Otto. Los primeros antecedentes de estos motores se remontan al siglo XVIII durante la primera revolución industrial. Donde se desarrollaron las máquinas de vapor, considerados como los primeros ingenios para producir rendimientos aceptables de obtención de energía mecánica no natural (Payri & Desantes, 2011).

En 1816 Nicolaus Otto sienta las bases de lo que hoy conocemos como el Motor de Combustión Interna Alternativo MCIA, sin embargo, en 1862 el mismo Otto desarrolla el motor de cuatro tiempos según el ciclo que lleva su nombre (eficiencia del 11%), y no fue hasta 1885 cuando Karl Benz inventa el motor alimentado por carburador, y el siguiente año patenta el primer vehículo impulsado por un MCIA. No obstante, en 1892 Rudolf Diesel patenta el motor de ciclo Diesel, caracterizado por la manera en la que se auto enciende el combustible (por efecto de la presión), sin dejar de lado el desarrollo del motor gasolina que en 1925 Jonas Hesselman presenta un gran avance en la tecnología mediante el primer motor de inyección directa. Finalmente, en 1983 se implementa la inyección electrónica que controla el dosado mediante la sonda lambda, además de incluir un catalizador de 3 vías para reducir las emisiones de gases

de escape, para cumplir con las normas ambientales cada vez más estrictas (Payri & Desantes, 2011).

2.1.2 Motor de ciclo Otto

El motor de ciclo Otto es una máquina térmica que usa una mezcla aire combustible como fluido de trabajo mediante un ciclo de 4 tiempos en el que la combustión de la mezcla es inducida por una chispa que se produce entre los electrodos de la bujía (Martín Blas et al., 2025).

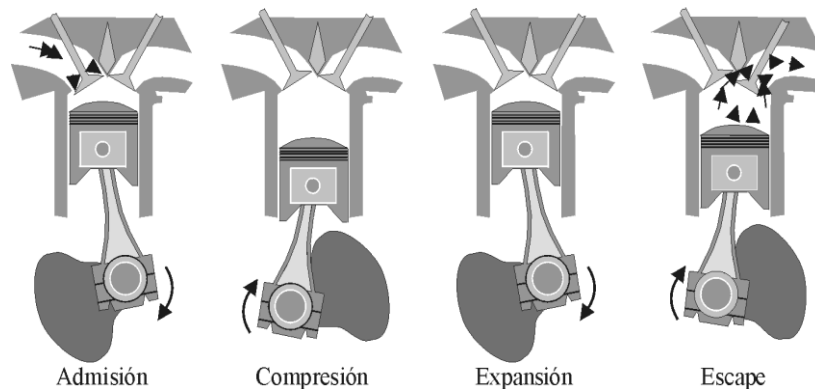


Figura 1. Fases de un motor 4 tiempos
(Heywood, 2018)

En los motores 4 tiempos el embolo realiza cuatro carreras para realizar un ciclo completo, mientras que el cigüeñal únicamente realiza dos revoluciones completas. Como se ilustra en la Figura 1. los procesos como la admisión, compresión, expansión y escape se consideran ideales para el ciclo Otto teórico, sin embargo, en la práctica existen pérdidas irreversibles que reducen la eficiencia del motor para transformar la energía química en energía mecánica útil (Jimenez Bernal & Gutierrez Torres, 2015).

2.1.3 Motor de ciclo Diesel

Los motores de ciclo Diesel son similares al ciclo Otto, sin embargo, trabajan a una tasa de compresión más alta, por lo que su tamaño es mayor. A diferencia de los motores Otto, no es necesario usar una bujía para encender la mezcla, sino que se considera un proceso a presión constante donde se admite el aire, que será comprimido y no es hasta el final de la carrera de compresión cuando se inyecta el combustible en la cámara de combustión, combustible que será encendido por la temperatura generada por la elevada presión del aire, sin la necesidad de un agente externo como una chispa (Jimenez Bernal & Gutierrez Torres, 2015).

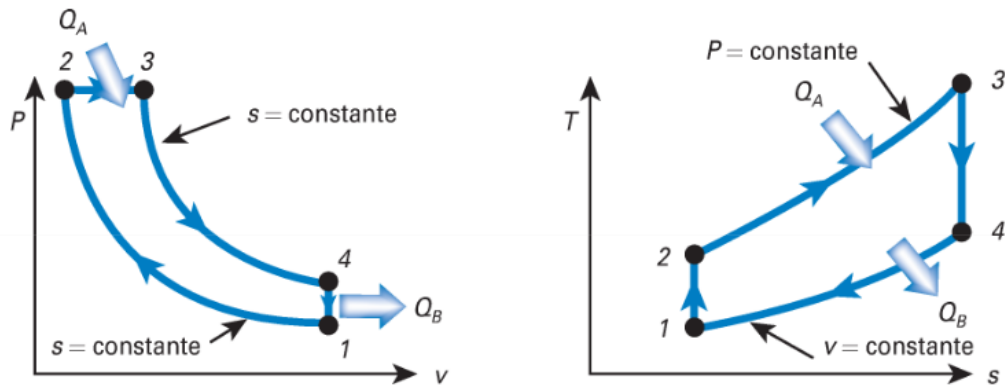


Figura 2. *Diagrama de trabajo ideal de un motor diésel*
(Jimenez Bernal & Gutierrez Torres, 2015)

2.1.4 Principio de funcionamiento Motor MEP

El funcionamiento del motor de encendido provocado MEP, por lo general se lo realiza en 4 tiempos o carreras del pistón, aunque existen excepciones con los motores que realizan el mismo trabajo con la mitad de los movimientos haciéndolos más eficientes (motores 2 tiempos), sin embargo, sus elevadas emisiones contaminantes han hecho que se deje de usar en vehículos (Villegas, 2007).

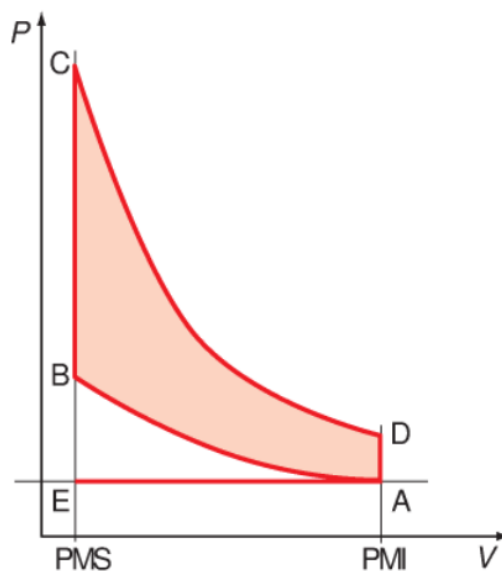


Figura 3. *Diagrama teórico de trabajo de un motor ciclo Otto*
(Escudero et al., 2024a)

La Tabla 1. muestra los ciclos de funcionamiento teóricos de un motor de ciclo Otto de cuatro tiempos, en el cual se detallan algunas características y lo que sucede durante cada una de las fases:

Tabla 1. *Fases de funcionamiento teórico de los motores de ciclo Otto de cuatro tiempos*

Fase de funcionamiento	Característica
Carrera de admisión E-A (Proceso Isobárico)	Se da cuando la válvula de admisión se encuentra totalmente abierta y la de escape cerrada, el pistón se desplaza desde el PMS (Punto Muerto Superior) al PMI (Punto Muerto Inferior) creando una pequeña depresión dentro del cilindro, obligando a introducir gases a través del ducto de admisión
Carrera de compresión A-B (Proceso Adiabático)	Se da cuando las válvulas tanto de admisión como escape se encuentran totalmente cerradas y el pistón se desplaza desde el PMI al PMS comprimiendo la mezcla aire-combustible presente en el cilindro, cabe mencionar que al final de esta carrera ocurre el salto de chispa en la bujía para iniciar la combustión de la mezcla comprimida
Carrera de explosión o trabajo C-D (Proceso Adiabático)	Se produce con las válvulas de admisión y escape completamente cerradas, en la combustión produce aumento de la presión de los gases, empujado al pistón hasta el PMI, esta es la única fase en la que se produce trabajo
Carrera de escape A-E (Proceso Isobárico)	Se produce con la válvula de admisión cerrada y la válvula de escape abierta y el pistón se desplaza hacia el PMS expulsando los gases resultantes de la combustión del cilindro que será llenado nuevamente con gases frescos desde la admisión en el siguiente ciclo de trabajo del motor

Nota. Elaboración propia a partir de: (Payri & Desantes, 2011).

2.1.5 Ciclo real de trabajo de un motor Ciclo Otto

Teóricamente las válvulas deben abrirse cuando el pistón alcanza el PMS y PMI, pero en la práctica esto no sucede, de ser así el rendimiento del motor sería bajo por lo que se debe avanzar y retrasar al movimiento de las válvulas a fin de optimizar procesos:

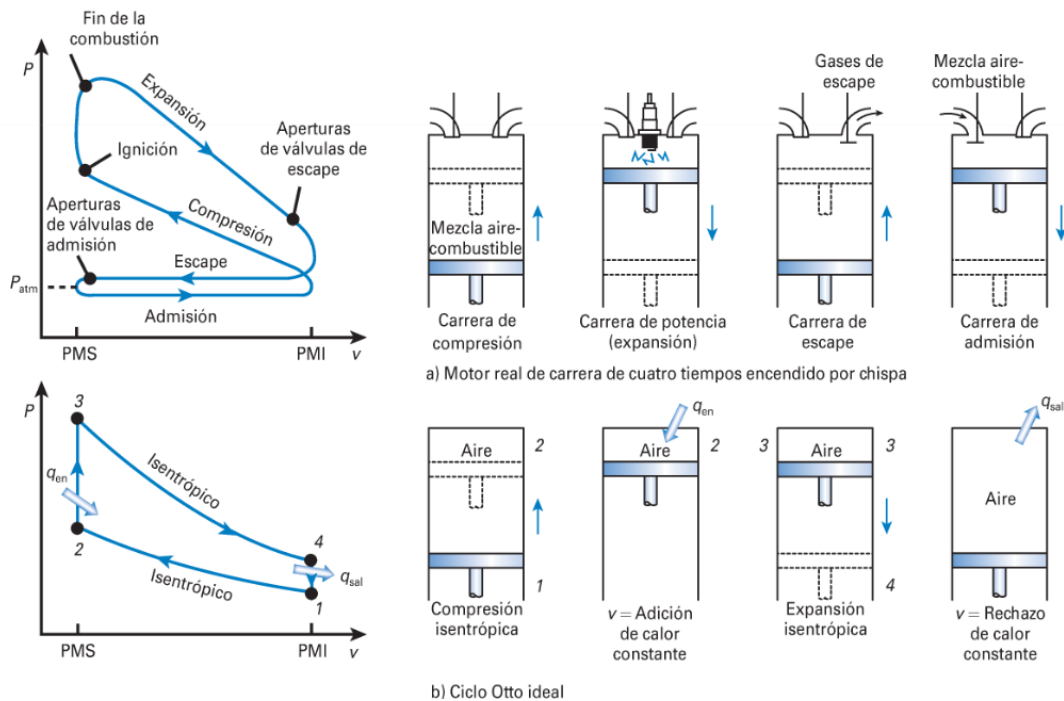


Figura 4. a) *Ciclo Otto real* y b) *ciclo Otto ideal*
(Jimenez Bernal & Gutierrez Torres, 2015)

Según (Escudero et al., 2024):

- El avance a la apertura de la Admisión (AAA) y el retraso al cierre de la Admisión (RCA) deben realizarse antes alcanzar los PMS y PMI respectivamente con el fin de conseguir un mejor llenado de del cilindro.
- El avance al encendido (AE), el salto de la chispa en los electrodos de la bujía debe realizarse ligeramente antes de PMS para conseguir una presión máxima cuando el pistón alcance este punto.
- El avance a la apertura del Escape (AAE) y el retraso al cierre del Escape (RCE) deben realizarse con la finalidad de aprovechar la presión de los gases producto de la combustión, para evacuarlos de manera más eficiente.

2.1.6 Parámetros básicos de funcionamiento

Son aquellos valores que permiten definir el estado de operación de un motor:

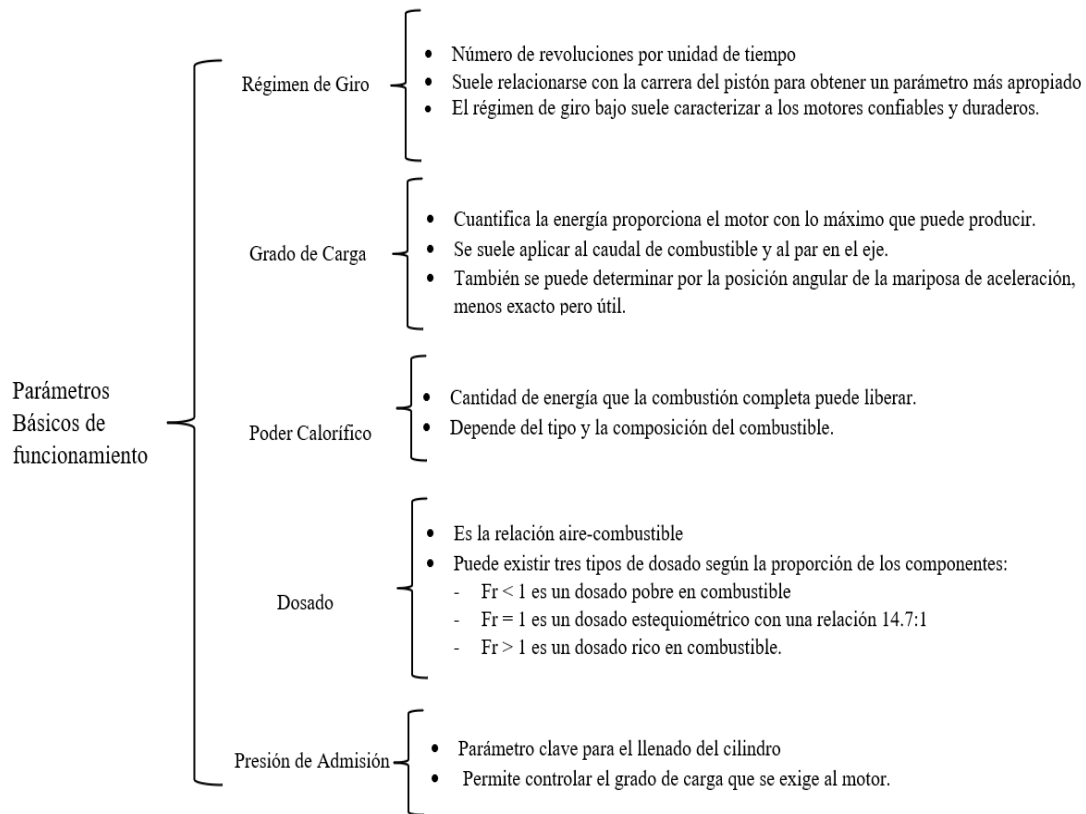


Figura 5. *Parámetros básicos de operación de un motor*

2.1.6.1 Relación aire/combustible

Normalmente en este tipo de motores se mide la cantidad de masa de aire y el caudal de combustible que relacionados definen la condiciones en la que funciona el motor.

$$Air/fuel\ ratio \left(\frac{A}{F} \right) = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \quad (1)$$

$$Fuel/air\ ratio \left(\frac{F}{A} \right) = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \quad (2)$$

La relación normal A/F para un motor en encendido provocado es entre $12 \leq A/F \leq 15$ para un funcionamiento normal la relación ideal para este tipo de motores es 14,7 partículas de aire por una de combustible (Heywood, 2018) .

2.1.6.2 Curvas características de un motor MEP

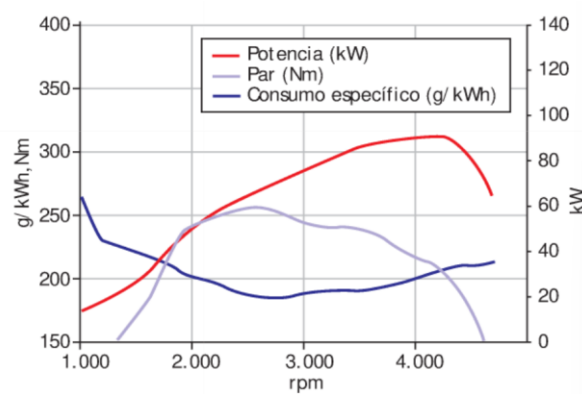


Figura 6. Curvas características de un motor MEP
(Escudero et al., 2024)

Las curvas características de un motor de encendido provocado indica como varían las magnitudes físicas como la potencia, par y consumo específico de combustible, en base al régimen de giro del motor. El par motor no es constante, ya que la fuerza transmitida hacia el cigüeñal desde el pistón varía según la presión generada en la cámara de combustión en los diferentes estados de funcionamiento del motor. La potencia es directamente proporcional al par y a las revoluciones, aumenta a medida que el par aumenta hasta llegar a la potencia máxima aproximadamente a 3500rpm y luego disminuye ligeramente. El consumo específico de combustible en cambio va disminuyendo con el aumento de las revoluciones hasta el punto de par máximo en donde toma una tendencia de crecimiento (Escudero et al., 2024).

La presión media efectiva en cambio es una relación entre la potencia y el par generado por el motor, siendo un parámetro fundamental para valorar las prestaciones de un motor.

$$P = \frac{F}{S} \quad (3)$$

Donde:

P es la presión media efectiva

F es la fuerza

S es la superficie

2.1.7 Parámetros indicados y efectivos de un motor

Los parámetros que definen la capacidad de funcionamiento de los motores se pueden clasificar en; parámetros indicados que se refiere a todo lo que sucede dentro de los cilindros, y en efectivos que se relacionan con todo lo que sucede en el eje del motor. La diferencia entre ambos radica en las pérdidas mecánicas (Payri & Desantes, 2011a).

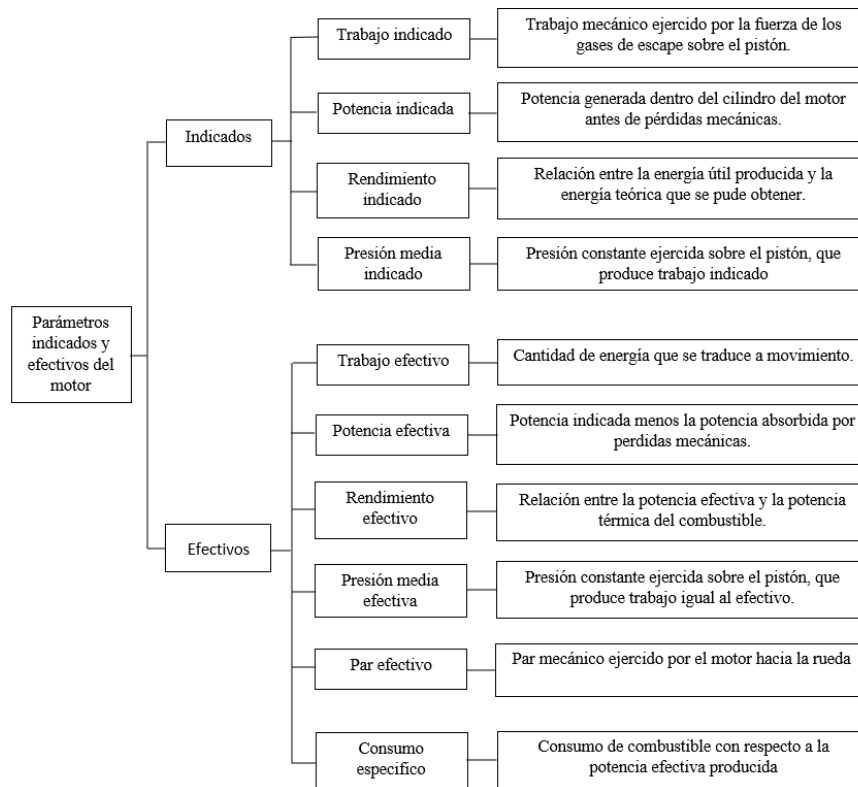


Figura 7. *Parámetros indicados y efectivos de un motor.*

2.1.8 Componentes

Un MCIA cuenta con diversas partes tanto fijas que sirven de estructura y soporte al motor como componentes móviles que se encargan de transformar la energía química almacenada en el combustible en energía mecánica transmitida hacia las ruedas a través del tren motriz, que se muestran en la Figura 8.

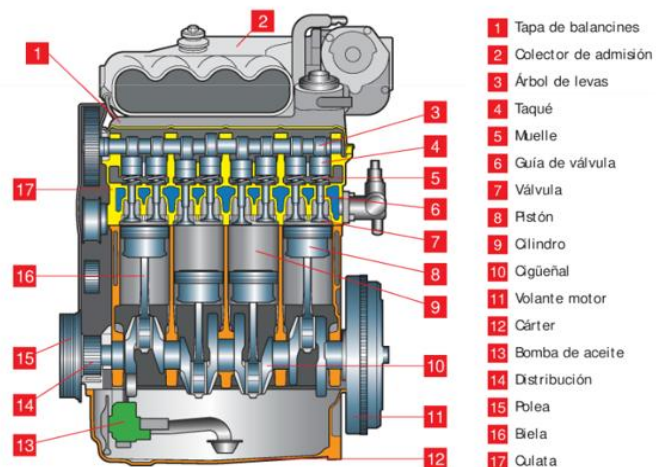


Figura 8. *Componentes de un motor de combustión interna alternativo.*
(Escudero et al., 2024)

2.1.8.1 Elementos fijos

Según Escudero et al. (2024a) son aquellos que sirven de alojamiento, soporte y guía de los elementos motrices:

- El bloque de motor mantiene una unión elástica con la carrocería mediante *Silentblocks*, que se encarga de absorber las vibraciones del motor. El bloque contiene orificios, llamados cilindros, en los que se alojan, guían y desplazan los pistones. Además, sirve para anclar los diferentes sistemas auxiliares que trabajan solidarios al motor.
- La culata en cambio es aquel componente que realiza un sello en la parte superior del bloque mediante una junta de culata. Además, son diferentes según su aplicación; en un motor gasolina la cámara de combustión suele estar ubicada sobre la misma culata, mientras que en los motores diésel la culata suele ser plana y la cámara de combustión suele estar albergada en la cabeza del pistón.
- La tapa de culata es aquel componente que debe realizar el cierre en la parte superior de la culata con la finalidad de estanqueizar y condensar el aceite y los vapores del cárter, además de proteger y permitir el acceso para mantenimiento de algunos componentes internos del motor como balancines, árboles de levas y taques.
- El cárter es el elemento que cierra el bloque, almacena el aceite para el sistema de lubricación, sellando la parte inferior del motor, además de que puede llegar a albergar sensores de temperatura y nivel de aceite.

2.1.8.2 Elementos motrices

El pistón es aquel elemento que recibe la fuerza de expansión de los gases de combustión, y que se desplaza dentro de los cilindros con movimiento alternativo, deben soportar elevadas presiones y temperaturas, por lo que deben resistir las condiciones adversas a los que se encuentran sometidos en los diversos estados de operación del motor. Los segmentos en cambio se encargan de garantizar la estanqueidad dentro del cilindro, se ubican en las ranuras en el pistón, también se encargan de transmitir el calor generado por la combustión de la mezcla hacia las paredes del cilindro. Existen tres tipos de segmentos que se ubican de acuerdo con la Figura 9. (Escudero et al., 2024a) .

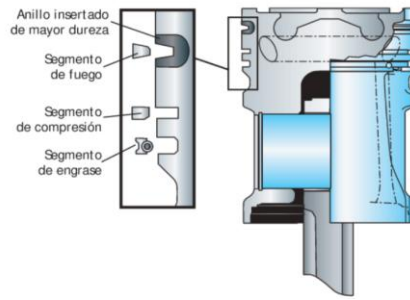


Figura 9. Tipos y ubicación de los segmentos.

(Escudero et al., 2024)

Las bielas es el componente que transmite la fuerza que recibe el pistón hacia el cigüeñal, además de ser un elemento clave en la transformación de un movimiento lineal en un movimiento circular o rotacional del cigüeñal (Antonio & Muñoz Domínguez, 2016). Este elemento está sometido a esfuerzos de tracción en el proceso de admisión, de compresión y flexión en los procesos de compresión y combustión de la mezcla, por lo que suelen ser fabricados por fundición de hierro o forjados en hierro al carbono. Finalmente, el volante motor, también conocido como volante de inercia, es un componente que almacena energía cinética durante la carrera de trabajo del motor y la libera en las fases restantes del ciclo, ayudando a mantener un giro uniforme del cigüeñal y reduciendo las variaciones de velocidad. Lleva una corona de dientes o rueda fónica que es usada para conocer la posición de los pistones dentro del cilindro y de esta manera dar el chispazo en el momento exacto para los motores MEP o inyectar el combustible en el caso de motores MEC. Además, sobre él se acopla el sistema de embrague que sirve para acoplar o desacoplar el movimiento del motor con respecto al movimiento de la caja de cambios (Escudero et al., 2024a).

2.1.8.3 Mecanismos auxiliares

El sistema de distribución es el encargado de sincronizar el movimiento de todos los elementos motrices del motor de combustión interna, consta del árbol de levas, accionado por el movimiento del cigüeñal, que abre y cierra las válvulas en el momento exacto para optimizar el proceso de combustión y por ende el funcionamiento del motor. Existen algunos tipos de este sistema; mediante correa es un método muy silencioso y requiere mantenimiento y limpieza, mediante cadena que es un método más ruidoso que el anterior, necesita menos mantenimiento y un engrase adecuado, mediante cascada de engranajes es el más fiable y ruidos, además absorbe más potencia para su funcionamiento (Escudero et al., 2024a) .

El sistema de lubricación es el encargado de llevar el líquido lubricante a todos los rincones del motor, reduce los rozamientos entre los elementos móviles disminuyendo así el aumento

de temperatura, además garantiza menores pérdidas de energía, alargando la vida útil del motor. Finalmente, el sistema de refrigeración consiste en un intercambiador de calor que se encarga de mantener la temperatura óptima de funcionamiento en el motor, de 90°C a 100°C, dependiendo de motor (Antonio & Muñoz Domínguez, 2016).

2.2 Fundamentos de combustión y formación de emisiones

La combustión depende de varios factores como la calidad de la mezcla aire combustible, la calidad de combustible, la presión atmosférica, etc. Condiciones que modifican el funcionamiento del motor y por tanto la formación de emisiones contaminantes que en un contexto ideal deberían de ser muy bajas (Martín Blas et al., 2025b).

2.2.1 Procesos de combustión de un motor MEP

En los motores de encendido provocado la combustión se inicia por acción de un agente externo en este caso el salto de una chispa eléctrica entre los electrodos de una bujía. La combustión de la mezcla en un proceso ideal es progresiva, produciéndose en capas, que inician en los alrededores de la bujía y se propagan a los puntos más alejados de la cámara de combustión, dejando a su paso gases residuales de la combustión que se expanden generando trabajo (Antonio & Muñoz Domínguez, 2016).

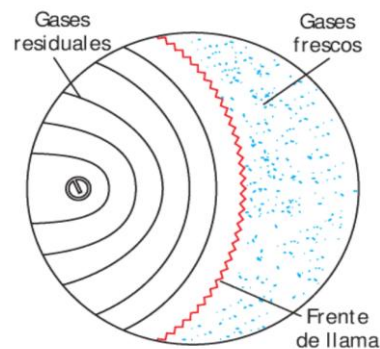


Figura 10. *Combustión ideal con frente de llama.*
(Escudero et al., 2024a)

El proceso de combustión puede dividirse en tres fases la primera donde se inicia el encendido de la mezcla, y la formación del frente de llama con la combustión de un 5 a 10% de la masa quemada. Por lo tanto, el proceso de ignición consiste en un aporte de energía a un cierto volumen de mezcla en un tiempo lo suficientemente corto (20kV). La segunda fase en cambio corresponde a la propagación del frente de llama que en la mayoría de los motores está en condiciones de régimen turbulento por lo que la velocidad de la combustión se rige por la fluidodinámica del proceso. Finalmente, la tercera fase es difícil de determinar temporalmente,

ya que consiste en la combustión de las masas de mezcla fresca rezagadas, debido al frente de llama turbulento (Antonio & Muñoz Domínguez, 2016).

2.2.2 Emisiones vehiculares

Las emisiones vehiculares pueden clasificarse en 3 grandes grupos según su naturaleza; emisiones de gases de escape, emisiones abrasivas, emisiones evaporativas. Las emisiones por abrasión son causadas el desgaste de frenos y balatas, el desgaste de neumáticos y calzada y la re-suspensión de partículas por el levantamiento de polvo a la atmosfera (Harrison et al., 2021). Las emisiones evaporativas en cambio se producen por fugas en el tanque de combustible o líneas de conexión, liberación de gases a través de válvulas del sistema Canister y por permeabilización del combustible a través de las paredes del sistema (Li et al., 2022).

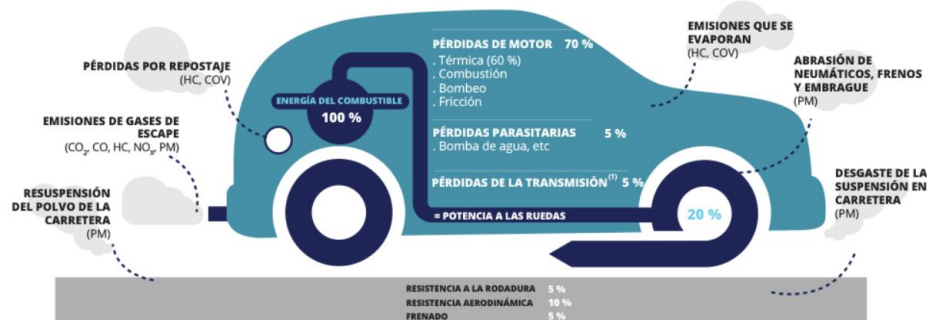


Figura 11. Tipos de emisiones vehiculares y pérdidas de energía (European Environment Agency, 2016)

Finalmente, las emisiones de gases de escape son aquellas que se producen durante la combustión, de los motores, en la quema de combustibles fósiles para obtener energía, y las conforman principalmente el CO, NOx, hidrocarburos no quemados (HC) y CO₂ (Rosero, 2021).

Las emisiones de gases de escape se pueden dividir en 2 grupos: los gases de efecto invernadero y los gases contaminantes. La formación de todos estos residuos se da por que el aire no contiene únicamente oxígeno, sino también, otros elementos como el nitrógeno, que, a elevadas temperaturas en la cámara de combustión, reaccionan y se forman compuestos diferentes (Alonso, 2005).

2.2.2.1 Gases de efecto invernadero

Los gases efecto invernadero, son los principales causantes el cambio climático, y principalmente son 3: CO₂, metano CH₄ y óxido nitroso N₂O. Si bien el efecto invernadero es algo natural, la emisión excesiva de estos compuestos, principalmente CO₂, a la atmosfera por diversas fuentes, tanto fijas como móviles ha acelerado este proceso, siendo el principal causante del cambio climático (Shah et al., 2024).

El dióxido de carbono es un gas que no afecta directamente a la salud humana. No se considera contaminante, sin embargo, su concentración en la atmósfera ha sido alterada por acción del ser humano. Las emisiones de CO₂ son directamente proporcionales al consumo de combustible de base carbono, por lo que es completamente inevitable su producción mientras se use combustibles fósiles para la obtención de energía. Finalmente es considerado el mayor contribuyente de los motores para el cambio climático debido a su mayor concentración en los gases de escape (Antonio & Muñoz Domínguez, 2016).

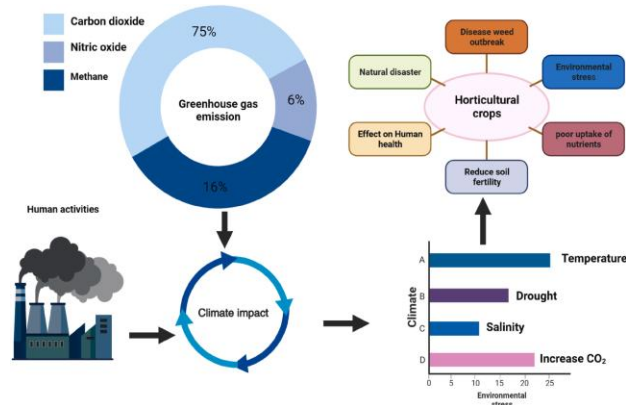


Figura 12. Problemas causados por los gases de efecto invernadero (Shah et al., 2024)

2.2.2.2 Gases contaminantes

Un gas o producto contaminante es aquel que existe en el aire atmosférico, pero no es natural o si es natural afecta sustancialmente la composición del aire. En el caso del vehículo impulsado por un motor de combustión interna de encendido provocado se caracteriza por emitir NO_x que se produce debido a las altas temperaturas del frente de llama, los HC que se deben principalmente a las porciones de mezcla no quemada y CO que por la cinética de la combustión no se terminan de oxidar para formar CO₂ (Antonio & Muñoz Domínguez, 2016).

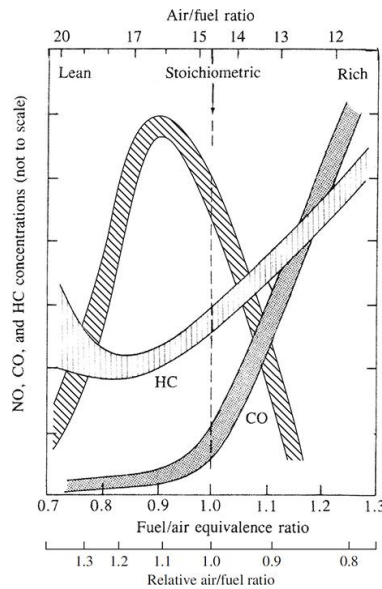


Figura 13. Concentraciones de emisiones contaminantes en MEP en función del dosado relativo

(Heywood, 2018)

Las concentraciones de los gases de escape se pueden determinar de acuerdo con el dosado relativo de las diversas condiciones de funcionamiento del motor. Las emisiones de CO crecen con la riqueza de combustible y crecen bruscamente cuando falta oxígeno, sin embargo, también se producen con exceso de este componente. Los NOx en cambio llegan a su máximo cerca del dosado estequiométrico, que es el punto en el que crece también la temperatura de combustión. Finalmente, los HC crece con la riqueza en combustible de la mezcla, debido a que con la mayor presencia de combustible existirá mayor cantidad de partículas no quemadas. (Antonio & Muñoz Domínguez, 2016).

2.2.3 Tecnologías para reducir el consumo de combustible

Ante la eventual forma de creación de gases de escape y la inexistente forma de erradicar estas emisiones mientras se siga usando combustibles fósiles como fuente de energía para la movilidad. Se ha dispuesto formas para mitigar la emisión de gases de escape; la primera estrategia activa sobre medidas de diseño y operación del motor afectando directamente sobre su funcionamiento y las estrategias pasivas que actúan sobre los gases de escape ya sean estos catalizadores como el de oxidación que se emplea para reducir CO, el de reducción que se encarga de reducir óxidos de nitrógeno o el más conocido catalizador de tres vías que actúa sobre CO, HC, NOx. Por lo que cada una de las soluciones tienen su propio campo de investigación, y reencuentran resumidas en la Figura 14.

Actuación sobre combustibles	Actuación sobre el motor	Actuación sobre los gases de escape
Mejora en los combustibles actuales	Control de emisiones del cárter	Aporte de aire mediante válvula Pulsair
Uso de combustible alternativos	Regulación de dosado mediante sonda lambda	Recirculación de gases de escape (Válvula EGR)
Uso de aditivos anticontaminantes	Reducción de cilindrada e implementación de turbos (Downsizing)	Uso de Catalizadores de dos y tres vías
Control de emisiones evaporativas	Implementación de inyección directa	Uso de filtro de partículas

Figura 14. *Tecnologías para reducir el consumo de combustible y emisiones*

2.2.4 Normativa de control de emisiones

Las emisiones de motores de encendido provocado están estrictamente reguladas por normativas impuestas en cada país. Ello implica que una gran parte de los desarrolladores destinan presupuestos de desarrollo para alcanzar las potencias necesarias, reduciendo al máximo la emisión de gases de escape (Payri & Desantes, 2011), estas normativas presentan más o menos restricciones según la región o país.

2.2.4.1 Normativas americanas

Las normativas americanas son establecidas por el CARB para California y por la EPA para el resto del país:

Normativas federales dispuestas por la EPA y establecen los límites nacionales para los contaminantes de vehículos tanto ligeros como pesados, la evolución de estas regulaciones se ha realizado en varias fases conocidas como TIER que tiene como objetivo reducir los contaminantes atmosféricos mediante este conjunto de normas para vehículos ligeros (DieselNet, 2025):

- **TIER 1:** Se publicaron como regla final el 5 de junio de 1991 y se implementaron progresivamente entre 1994 y 1997.
- **TIER 2:** Se adoptaron el 21 de diciembre de 1999, con un cronograma de implementación gradual desde 2004 hasta 2009.
- **TIER 3:** Se finalizaron el 3 de marzo de 2014 y se implementaron gradualmente entre 2017 y 2025.
- **TIER 4:** Se adoptaron el 20 de marzo de 2024, con un cronograma de implementación gradual desde 2027 hasta 2033.

Las normativas de California, pioneros en el control de emisiones, ha establecido sus propias normas de emisiones conocidas como Normas para Vehículos de Bajas Emisiones (LEV), que han servido como base para establecer las normativas federales descritas anteriormente, incluyendo una evolución desde LEV I hasta LEV IV, cada vez más estrictas. Según lo

expuesto en la Sección 177 de la Ley de Aire Limpio, cada estado puede optar por seguir las regulaciones federales o las dispuestas por la Junta de Recursos del Aire de California (DieselNet, 2025).

2.2.4.2 Normativas europeas

En los países pertenecientes a la Unión Europea, los límites de emisiones dependen de los estándares de la UNECE. Los reglamentos que establecen límites para la homologación de vehículos, que para este caso es aplicable el reglamento 83/2015 y el 64/2016 catalogados dentro de la normativa euro 6. Establecen factores de emisiones para; monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC), óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado (PM) (UNECE, 2013, 2024).

Stage	Date	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM	PN†
		g/km					#/km
Positive Ignition (Gasoline)							
Euro 1‡	1992.07	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	-	-
Euro 2	1996.01	2.2	-	0.5	-	-	-
Euro 3	2000.01	2.30	0.20	-	0.15	-	-
Euro 4	2005.01	1.0	0.10	-	0.08	-	-
Euro 5	2009.09 ^b	1.0	0.10 ^d	-	0.06	0.005 ^{e,f}	-
Euro 6	2014.09	1.0	0.10 ^d	-	0.06	0.005 ^{e,f}	6.0×10 ¹¹ e,g
Euro 7	2026.11.29	1.0	0.10 ^d	-	0.06	0.0045	6.0×10 ¹¹ e,g

Figura 15. *Limites europeos de emisión de gases para vehículos gasolina (DieselNet, 2025).*

2.2.4.3 Normativas argentinas

Según la normativa argentina entre los años 1994 y 2003 los vehículos podían someterse al proceso de homologación del motor del vehículo según los estándares de Vehículos Comerciales Ligeros LCV, sin embargo, a partir del 2004 las normas argentinas se basan en la normativa europea según la Figura 16. (DieselNet, 2025).

Estándar	Año		Comentarios
	Nuevos modelos	Todos los modelos	
Euro 2	2004	2004	
Euro 3	2007	2009	Resolución 731/2005 [2766] , Directiva 1998/69/CE [2765]
Euro 4	2009	2011	Resolución 731/2005 [2766]
Euro 5a	2015 ^a 2016 ^b	2017 ^a 2018 ^b	Resolución 35/2009 [2770] , 1434/2011 [2769] , 1800/2011 [2768] , 1448/2012 [2767] , 1464/2014 [3201] , 78/2019 [4656] , CE 692/2008 [2764]
^a Vehículos de categoría M1 con PMA ≤ 2500 kg			
^b Vehículos de categoría M1 con PMA > 2500 kg y vehículos de categoría N1			

Figura 16. *Estándares de emisiones para vehículos ligeros en Argentina (DieselNet, 2025)*

2.2.4.4 Normativas Brasileñas

Las regulaciones brasileñas para vehículos livianos han sido adoptadas de manera sucesiva y se conocen como PROCONVE, se basan ligeramente en las regulaciones tanto europeas como americanas, pero sin ser equivalentes a ninguna de ellas. Por ejemplo, la PROCONVE L-7 que establece los límites de emisiones para vehículos de pasajeros y comerciales ligeros de encendido por chispa y que entró en vigor a partir del 2022 (DieselNet, 2025).

Vehicle Category	NMOG+NOx	PM ^a	CO	HCO ^b	NH ₃ ^c
	mg/km				ppm
Passenger vehicles	80	6	1000	15	Report
LCVs with Otto engines	140	6			
LCVs with Diesel engines	320	20			
^a Applicable to vehicles with diesel engines or direct injection SI engines					
^b Aldehydes (HCO) limits apply to vehicles with SI engines only					
^c Applicable to vehicles with diesel engines with aftertreatment systems using a liquid reducing agent					

Figura 17. *Estándares de emisiones de vehículos de pasajeros y comerciales ligeros con motor Otto y Diesel en Brasil.*
(DieselNet, 2025)

2.2.4.5 Normativas Ecuatorianas

En el Ecuador el organismo encargado de imponer las normativas de control de emisiones es el INEN a través del RTE INEN 017/2008. El que establece que los vehículos con motor de encendido provocado deben cumplir con los estándares expuestos por el NTE INEN 2204 (INEN, 2008), que establece los límites de concentración de CO y HC durante una prueba estática. Es importante mencionar que no existe normativa para regular emisiones de CO₂ en tráfico real (INEN, 2017).

Año modelo	% CO ^a		ppm HC ^a	
	0 - 1500 ^b	1500 - 3000 ^b	0 - 1500 ^b	1500 - 3000 ^b
2000 y posteriores	1,0	1,0	200	200
1990 a 1999	3,5	4,5	650	750
1989 y anteriores	5,5	6,5	1000	1200
^a Volumen				
^b Altitud = metros sobre el nivel del mar (msnm).				

Figura 18. *Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor de gasolina en Ecuador (Prueba estática)*
(INEN, 2017)

2.3 Efecto de la altitud en el motor de combustión

2.3.1 Factores que afectan al desempeño del vehículo

El correcto funcionamiento de un vehículo puede depender de múltiples factores, tanto internos como externos, los cuales influyen en la entrega de energía durante su uso. Dentro de los

factores externos, los ambientales tienen un impacto directo con el motor, ya que estos afectan variables como la temperatura, cantidad de oxígeno y densidad del aire. Los factores externos han mostrado ser un desafío para los fabricantes de vehículos, quienes buscan un gran desempeño independientemente de las condiciones del entorno, tales como las carreteras o el uso que se le dé al vehículo. Entre los factores externos que influyen en el comportamiento dinámico del vehículo se encuentran: la tracción, el frenado, la direccionalidad, la estabilidad y la maniobrabilidad (Aguirre Ospina, 2023).

2.3.1.1 Dinámica vehicular

El comportamiento de un vehículo en movimiento es estudiado a través de las fuerzas que actúan sobre este y los efectos que generan. En la Figura 19, se aprecia la fuerza de resistencia aerodinámica (F_{aire}), resistencia a la rodadura delantera y trasera respectivamente (R_{rdav} y R_{rdar}), fuerzas de reacción de las ruedas delanteras y traseras, perpendiculares al suelo e iguales al peso soportado (F_{zdav} y F_{zdar}) y fuerza de resistencia a la pendiente (F_{pt}). Esta última, siendo muy importante ya que, al subir pendientes, este genera un componente adicional en dirección del movimiento, proporcional al ángulo de inclinación (α) (Rodríguez García & Villar Paúl, 2024).

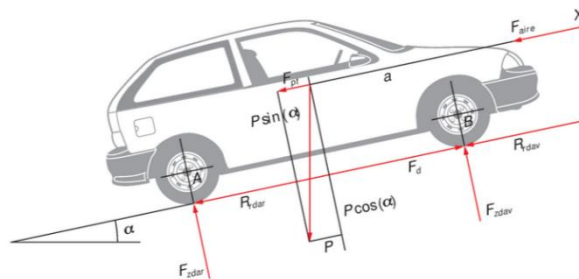


Figura 19. Dinámica longitudinal del vehículo
(Rodríguez García & Villar Paúl, 2024)

De igual manera, Panesso Riveros (2012), plantea la siguiente Ecuación 4, en donde la sumatoria de las fuerzas antes mencionadas da como resultado la fuerza longitudinal en pendiente.

$$F_{longitudinal} = f_r * W + \frac{1}{2} \rho * v^2 * C_D * A + W \sin(\theta) \quad (4)$$

Donde:

- f_r es la fricción,
- W el peso del vehículo,
- ρ la densidad del aire,
- v la velocidad del vehículo,

- C_D coeficiente de arrastre aerodinámico,
- A el área efectiva y
- θ el ángulo de inclinación.

Es evidente que el cálculo de estas fuerzas es realizado con modelos físicos simplificados. Sin embargo, la fuerza aerodinámica es la única que varía significativamente con la velocidad del vehículo. Esta se define como la fuerza que resulta de una corriente de aire que fluye sobre y por debajo del perfil de un vehículo (Ramírez Morales, 2017). Por esto, los factores inherentes que afectan el avance del vehículo se encuentran en su carrocería y sus componentes, pudiendo incidir en el consumo de combustible, al incrementar la carga que este debe vencer para sobrepasar la resistencia aerodinámica de avance (Fraija B, 2006).

2.3.1.2 Fuerza de fricción

El rendimiento de un vehículo no depende únicamente de las condiciones operativas del motor, sino también de las características de la superficie por la que circula. Los neumáticos constituyen el único punto de contacto entre el vehículo y el suelo, por lo que el coeficiente de fricción está determinado por el tipo de neumático, el área de contacto y las condiciones del terreno. En este contexto, la fuerza de tracción y la capacidad de frenado están condicionadas por la fricción disponible: si esta se supera, el vehículo experimenta deslizamiento. Del mismo modo, al exceder el límite de adherencia durante una maniobra de frenado, se produce un deslizamiento que impide detener el vehículo de manera efectiva (Rodríguez García & Villar Paúl, 2024).

Además, las pérdidas por resistencia a la rodadura en los neumáticos representan una fuente significativa de consumo adicional de combustible y emisiones. Alcázar Vargas et al. (2021) señalan que esta resistencia puede representar hasta un 20 % de la energía total consumida por un automóvil, y que más del 90 % del impacto medioambiental asociado a los neumáticos se debe a estas pérdidas. Por ello, el uso de neumáticos de baja resistencia a la rodadura, diseñados específicamente para minimizar estas pérdidas, permite mejorar la eficiencia energética del vehículo y reducir considerablemente sus emisiones contaminantes.

2.3.1.3 Factores internos que afectan el desempeño del vehículo

Existen diversos parámetros cuantitativos para evaluar el desempeño de un motor térmico. En este tipo de análisis no se consideran generalmente factores como el desgaste de componentes o aspectos constructivos, sino variables operativas medibles como la relación aire-combustible, el régimen de giro, el avance de encendido, la carga del motor y la relación de compresión,

debido a que estas inciden directamente en la eficiencia y el rendimiento del motor (Keller, 2014).

Las variables experimentales permiten definir el estado operativo del motor mediante parámetros de funcionamiento. Comúnmente, el grado de carga y régimen del motor son entradas en los mapas de motor, así como combustible y flujo de aire definen la posición en la que se dará la combustión. En la Figura 20. se aprecia un mapa motor que relaciona la presión en el colector de admisión -indicativo de la carga del motor- con respecto al régimen de giro. En este caso es de un motor sobrealimentado, donde se evidencia como la carga es un factor importante a la hora de analizar el rendimiento de un motor (Armas Vergel et al., 2011).

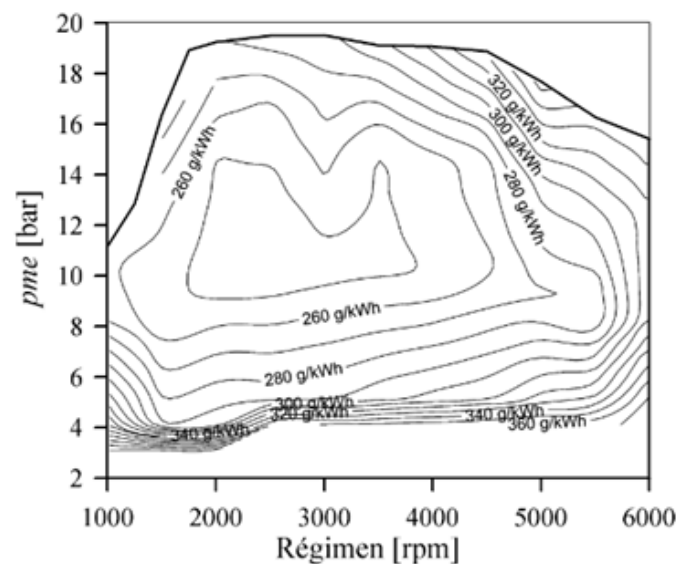


Figura 20. Curvas de isoconsumo de un motor MEP sobrealimentado (Armas Vergel et al., 2011)

Por otro lado, el avance al encendido es otro factor fundamental, ya que determina la energía liberada por los gases comprimidos durante su ciclo de trabajo. De este modo, el trabajo depende de la presión ejercida en el cilindro, ya que, si esta se retrasa o adelante, la presión máxima disminuirá al igual que el trabajo (Arias Cuasapaz, 2025).

Finalmente, la cantidad de combustible quemado determina la potencia térmica disponible para convertir en potencia mecánica. Debido a esto, el índice de octano (RON), se debe tomar en cuenta ya que determina el número de octanos utilizados para medir la capacidad detonante del combustible. Un combustible con RON bajo presenta una menor resistencia al golpeteo a bajas temperatura y alta presión, lo que provoca autoignición de la mezcla, lo cual afecta el frente de llama del cilindro y reduce la eficiencia de combustión (Andia-Vargas et al., 2023). Además, la relación de compresión real también influye en este proceso, ya que, al contrario de la

relación geométrica, varía con el tiempo de apertura de las válvulas y la dinámica de los gases. Este cambio afecta directamente la eficiencia del ciclo y la magnitud del par motor entregado (Escudero et al., 2024) .

2.3.2 Efecto de la altitud en la combustión

La mezcla de aire y combustible es importante para el funcionamiento de los motores térmicos. El aire aporta el oxígeno necesario para que ocurra la combustión. En condiciones atmosféricas normales, el aire está conformado por 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 1% de otros gases. El oxígeno es un elemento clave ya que reacciona con los hidrocarburos presentes en el combustible, como el octano, produciendo CO_2 y vapor de agua (H_2O). En condiciones ideales el nitrógeno no participa en la reacción. Sin embargo, en la práctica estas condiciones no son ideales, ya que los motores pueden producir gases contaminantes como CO y HC, dependiendo principalmente de la presencia de oxígeno disponible y las condiciones del motor (Barbosa Saldana & Gutierrez Torres, 2016).

Al aumentar la altura respecto al nivel del mar, la presión atmosférica disminuye junto con la densidad del aire. En países como Ecuador, donde la cordillera de los Andes tiene presencia en sus territorios, los motores suelen operar en estas condiciones desfavorables, experimentando una reducción de rendimiento. Esto se debe a que, a mayor altitud, la presión dentro del cilindro durante el ciclo de admisión también disminuye, afectando negativamente la combustión y aumentando las emisiones contaminantes (Lapuerta et al., 2006). Por ende, la altitud juega un papel importante con respecto a la combustión y las emisiones de gases contaminantes.

Además, de acuerdo con un estudio realizado por Tipanluisa et al. (2024), analizó la potencia específica de un vehículo en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo. Este estudio demostró que la altitud también puede influir en el consumo de combustible del vehículo, ya que al ser manejado en una zona rural con diferentes alturas presenta unas variaciones del 80% al comprar trayectos de zona rural de diferentes elevaciones con zonas llanas. Sin embargo, el mismo estudio menciona que la altitud podría ser un factor, pero también depende del estilo de conducción, configuración de la ECU (Unidad de Control Electrónico) o el diseño del catalizador (Tipanluisa et al., 2024).

De este modo, diversas investigaciones se han centrado en evaluar el comportamiento de motores térmicos bajo diferentes parámetros, como la comparación entre motores atmosféricos y sobrealimentados, así como el ajuste electrónico del tiempo de inyección y del encendido. La

Tabla 2. resume varios estudios relevantes que profundizan en estos aspectos y complementan el análisis de este apartado.

Tabla 2. *Resumen de estudios sobre el efecto de la altitud en motores gasolina*

Autor (año)	Tema	Conclusión relevante
(Y. Wang et al., 2020)	Impact of altitude on the real driving emission (RDE) results calculated in accordance to moving averaging window (MAW) method	En un vehículo con motor atmosférico, existe una correlación significativa entre la altitud y la emisión de CO ₂ : cuanto mayor es la altitud, la emisión de CO ₂ disminuye cerca de un 4,45 % en la fase de baja velocidad y en la fase de velocidad media; un 5,31 % en la fase de alta velocidad y un 6,62 % en la fase de velocidad extra alta.
(Montúfar et al., 2023)	Analysis of the role of altitude and temperature on the performance of the ignition internal combustion engine used for light vehicle propulsion.	Otro factor que influye en el consumo de combustible es la temperatura ambiente: las bajas temperaturas mantienen el consumo en valores de 4 litros/100 km 100 km, mientras que cuando la temperatura aumenta (en condiciones similares de potencia suministrada) el consumo también aumenta hasta valores de 6,5 litros/100 km.
(Motahari & Chitsaz, 2019)	Effects of Altitude and Temperature on the Performance and Efficiency of Turbocharged Direct Injection Gasoline Engine	Mediante simulaciones y pruebas experimentales, se evaluó cómo la temperatura y presión del aire de admisión afectan el rendimiento de un motor turboalimentado en condiciones ambientales de Irán. Se analizó el tiempo de encendido, el consumo específico de combustible y el par motor bajo plena carga.
(Zervas, 2011)	Impact of altitude on fuel consumption of a gasoline passenger car	El estudio analizó el efecto de la altitud en el consumo de combustible de un motor gasolina bajo tres ciclos de conducción. Se encontró que el impacto varía según el ciclo: en el NEDC y FTP hay ligeras mejoras, pero en conducción en autopista el consumo aumenta un 6,2 % a 2 200 m.

Nota. Elaboración propia a partir de diversas investigaciones.

Por lo tanto, la altitud es un factor ambiental importante para tomar en cuenta, ya que presenta un desafío al funcionamiento de los motores térmicos y sus emisiones, especialmente en regiones con topografías montañosas. De esta forma, es importante considerar variables como la densidad del aire, la presión atmosférica y la gestión electrónica por parte de la ECU en zonas de gran altitud, donde las condiciones atmosféricas ameriten ajustes específicos para mantener la eficiencia y no afectar el medio ambiente.

2.4 Enfoques para medir emisiones

Varias investigaciones sobre emisiones tienen como objetivo comprender el problema que puede generar la contaminación y así iniciar nuevos proyectos para encontrar soluciones. Los métodos de medición buscan obtener resultados relevantes, que abarquen todos los territorios y tengan validez referencial (Schölzel Urchueguía & Oliver-Villanueva, 2024). La obtención de datos puede darse en condiciones controladas, como en laboratorios de emisiones, o en sistemas dinámicos bajo ciertas condiciones de manejo. En el siguiente apartado se describe algunos de estos métodos que han sido usados en diferentes estudios.

2.4.1 Métodos dinámicos

Los sistemas de medición dinámicos en vehículos permiten la toma de datos en tiempo real. Este tipo de estudios sigue condiciones de manejo específicas, para una continua toma de datos. En Lima, Prieto-Mostacero et al. (2023) tomaron datos de 853 670 unidades de vehículos en horarios de 6:00 a 18:00 horas, a una velocidad promedio de 55 km/h. En conjunto con el software VENSIM PLE (v. 8.2.1), se realizó una estimación de resultados tomando fórmulas y la metodología de nivel 1, descrita en la guía de inventario de emisiones EMEP/EEA 2019. Esta guía contiene una metodología de cuantificación de datos basado en los recursos que tenga el investigador. Se divide en tres niveles (*tier*), donde el número tres es el más preciso y toma una mayor cantidad de recursos (U.S. Environmental Protection Agency, 2019).

Estas metodologías son de fácil aplicación en situaciones donde la ubicación geográfica es algo limitada. Por esto, una metodología a pequeña escala también denominada *bottom up*, construye un inventario de emisiones a partir de la información de la flota vehicular en estudio (Builes-Jaramillo et al., 2015). Empero, existe otro modelo de medición a mayor escala denominado IVE.

El modelo Internacional de Emisiones de Vehículos (IVE) fue creado con la finalidad de estimar emisiones en países en vías de desarrollo. Fue diseñado gracias al esfuerzo conjunto del Centro para la Investigación y Tecnología Ambiental (CE-CERT) de la Escuela de

Ingeniería de la Universidad de California en Riverside (UCR), el grupo de Investigación de Sistemas Sustentables Globales (GSSR) y el Centro de Investigación de Sistemas Sustentables Internacionales (ISSRC). Este modelo predice gases contaminantes para la atmósfera y gases de efecto invernadero (International Sustainable Systems Research Center, 2008).

El modelo IVE requiere el uso de Java por lo que es importante instalar Java Virtual Machine de Sun Microsystems en el computador que se le dará su uso. La metodología es similar a la antes mencionada, solo que en esta se procura tomar datos en zonas que se permita una conducción constante. Adicionalmente, se puede tomar datos de ruta mediante el uso de GPS y unidades VOCE (monitor de partida) para conocer cuántas veces el motor es encendido o apagado, ya que mientras más fría sea la partida mayor será la cantidad de emisiones (Lovera et al., 2004).

2.4.2 Aplicación del enfoque VSP

La potencia específica del vehículo (VSP), refiere a la potencia inmediata del motor por unidad de masa. Compuesto por el producto de la aceleración con la velocidad, incorporando los efectos de la pendiente de la carretera y resistencia a la rodadura, en adición la resistencia aerodinámica. De la misma manera, es un parámetro operativo de carácter exhaustivo encargado de analizar resultados obtenidos por telemetría por efecto de la velocidad (Miño Enríquez & Villafuerte Noboa, 2023).

La potencia específica del vehículo se calcula mediante la ecuación 5:

$$VSP = v * (a(1 + \varepsilon_i) + g * \alpha + g * C_R) + \frac{1}{2} \rho_a * v^3 \left(\frac{C_D * A}{m} \right) \quad (5)$$

Dónde:

- m corresponde a la masa del vehículo (kg),
- v es la velocidad del vehículo (m s^{-1}),
- A es la aceleración (m s^{-2})
- ε_i es el factor de masa para las masas rotacionales,
- $g = 9,81$ (m s^{-2}) es la aceleración debida a la gravedad,
- α es el grado de la carretera,
- C_R es el coeficiente de resistencia a la rodadura (sin dimensiones),
- C_D es el coeficiente de arrastre (sin dimensión),
- ρ_a es la densidad del aire (1.207 kg/m^3 a 20°C),
- y A es la zona transversal (m^2).

Para mejorar la eficacia de sus resultados, varios investigadores han optado por mejorar que aprovechen al máximo sus resultados, tal es el caso de Mera et al. (2022), al combinar mapas de motor régimen-carga de carga con los 14 modos VSP. Este novedoso método optimiza los

parámetros del modelo para el dimensionamiento de mapas de motor mediante fronteras de Pareto para resolver el equilibrio entre factor de emisión y RMSE (desviación estándar de los valores residuales) en viajes totales RDE y secciones urbanas. Consiguientemente, al compararlo con el método VSP convencional, se mejoró el factor de emisión de CO₂ en un 7-63% y la R² en un 5-32%.

Este estudio se llevó a cabo con el uso de un dispositivo PEMS, que permitió la recolección de datos en rutas específicas por la metrópolis de Lisboa. Este equipo es utilizado para la medición de emisiones ya que está conformado por un analizador de gases y un flujómetro. Sumado a esto, este comunicado con el OBD II para conocer el rendimiento del motor y un GPS para el posicionamiento de este. En la Figura 21, se puede observar un ejemplo de aplicación de VSP en la elaboración de mapas VPS-velocidad para estimar emisiones de acuerdo con diferentes normativas.

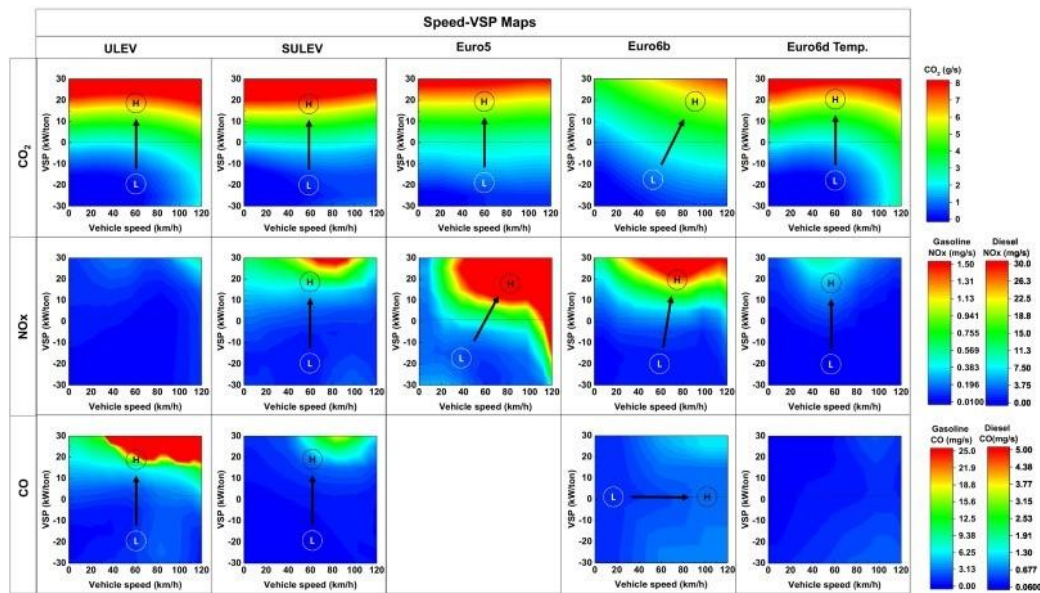


Figura 21. Mapas de VSP-velocidad para estimación de emisiones según normativa (Park et al., 2023)

Pero el costo de estos dispositivos puede llegar a ser relativamente alto, por eso Rosero Obando et al. (2024) presentaron un trabajo de emisiones contaminantes con el uso de un dispositivo ELM327 conectado al puerto OBD II. Estos son relativamente más económicos comparado con otros dispositivos de diagnosis. Se pueden complementar con aplicaciones móviles como Torque Pro (en su versión lite más limitada) o en computador con ScanMaster.

2.4.3 Ciclos de Conducción

Los ciclos de conducción son perfiles de velocidad en función del tiempo que representan los patrones típicos de conducción de un vehículo en condiciones reales. Estos ciclos se utilizan

principalmente para evaluar el consumo de combustible y las emisiones contaminantes en motores de combustión interna (Brady & O'Mahony, 2016). Algunos ciclos incluyen fases de altas velocidades y aceleraciones, lo que refleja condiciones de conducción en vías rápidas o zonas con baja congestión vehicular (Salazar Sabas & Betanzo Quezada, 2023).

Estos ciclos no sólo son esenciales para pruebas en laboratorio, sino que también permiten desarrollar y optimizar estrategias de gestión de energía, tanto en vehículos de combustión como en vehículos eléctricos. Por ejemplo, Zhao et al. (2020) diseñaron un ciclo de conducción representativo para la ciudad de Xi'an, China, con el fin de evaluar con mayor precisión el comportamiento energético de vehículos eléctricos en condiciones reales de operación. El ciclo propuesto obtuvo un margen de error del 2,44 % al 3,89 %, demostrando su confianza respecto al comportamiento dinámico real de los vehículos.

Cabe señalar que, si bien es común desarrollar ciclos específicos según las condiciones locales, también se recurre a ciclos estandarizados para facilitar la comparación entre estudios ambientales. De acuerdo con la Figura 22, se seleccionaron cuatro patrones de conducción reales (UDDS, Surrey City, New York y Highway) con el objetivo de evaluar su impacto sobre el análisis de ciclo de vida (LCA) de vehículos propulsados por pila de combustible de hidrógeno. Estos ciclos representan diferentes condiciones de operación vehicular en entornos urbanos y de autopista, permitiendo una comparación efectiva del rendimiento energético y emisiones asociadas. La selección de estos perfiles de velocidad se fundamenta en su uso representativo dentro de estudios anteriores, sin que se modifiquen o sinteticen, asegurando así condiciones de prueba estandarizadas y comparables.

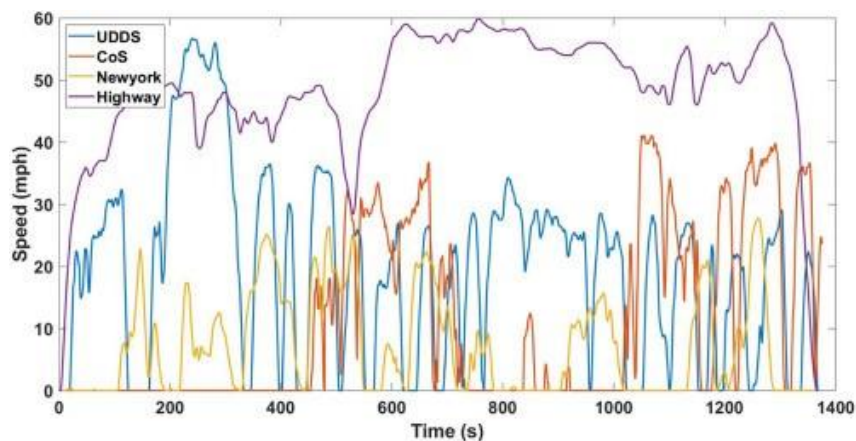


Figura 22. Ciclos de conducción representativos
(Ahmadi et al., 2020)

Por esta razón, en Ecuador, la Agencia Nacional de Tránsito (ANT) y el INEN exigen que las marcas homologuen sus vehículos utilizando ciclos de conducción reconocidos internacionalmente. Las normativas NTE INEN 2204 y NTE INEN 2207, que regulan las emisiones de motores a gasolina y diésel, respectivamente, establecen el uso de ciclos como el FTP 75 (Estados Unidos) y el ECE EUDC 15 (Europa) (Lucero Durán & Vintimilla León, 2024). Adicionalmente, el ciclo 10-15 Mode de Japón se emplea para evaluar el consumo de combustible y las emisiones en vehículos ligeros. De esta manera, se evidencia que los requisitos regulatorios ecuatorianos se alinean con estándares internacionales provenientes de Europa, Estados Unidos y Japón (Cazorla Espinoza, 2022).

Por último, por su utilidad en gestión energética, los ciclos de conducción son esenciales para la estimación y regulación de contaminantes. Las variaciones en la velocidad y carga del motor durante un ciclo influyen directamente en la cantidad de gases emanados, por lo que estos perfiles son utilizados tanto en laboratorios como en simulaciones para evaluar el impacto ambiental de los vehículos en condiciones reales de operación.

2.5 Programas de procesamiento de datos

Existen numerosos paquetes de software adecuados para el procesamiento de datos, cuya elección depende de su aplicación específica. La selección de esta herramienta resulta importante porque de ella depende el ordenamiento, análisis y procesamiento de datos obtenidos durante la fase de experimentación. Por este motivo es importante la evaluación de cada una de estas aplicaciones con respecto a su entorno virtual, cálculos y lenguaje de programación, que resulta útiles en la interpretación de la información. A continuación, se recopilo diferentes programas que pueden resultar útiles en este tipo de tareas.

2.5.1 Entorno de desarrollo integrado Rstudio

RStudio, desarrollado por la empresa Posit, constituye un entorno de desarrollo integrado (IDE) diseñado para el lenguaje de programación R, ampliamente utilizado en análisis estadístico, ciencia de datos y visualización de información. Su interfaz facilita la organización y ejecución de tareas mediante herramientas que integran edición de código con resaltado de sintaxis, depuración, ejecución de scripts y administración de objetos, paquetes y resultados dentro de un mismo espacio de trabajo.

Además, permite la elaboración de documentos dinámicos en los que se combinan código, texto y representaciones gráficas, favoreciendo la reproducibilidad de los análisis y la

generación de informes técnicos. Entre sus funcionalidades destacan la gestión independiente de proyectos, la compatibilidad con entornos locales y en la nube, así como la integración con sistemas de control de versiones para el seguimiento y administración de cambios. Asimismo, las actualizaciones recientes han fortalecido su interoperabilidad con Python, ampliando las posibilidades de desarrollo y análisis en entornos multidisciplinarios. Su distribución bajo una licencia de código abierto también facilita la adaptación, modificación y difusión de sus herramientas por parte de la comunidad de usuarios y desarrolladores.

2.5.2 MATLAB y Simulink

MATLAB es una plataforma de programación y cálculo numérico ampliamente utilizada en los ámbitos científico y de ingeniería para el procesamiento de datos, la formulación de modelos matemáticos y el desarrollo de algoritmos de análisis. Su entorno de trabajo permite ejecutar y evaluar procedimientos computacionales de manera interactiva, facilitando la validación de resultados, el ajuste de parámetros y la optimización de metodologías antes de su implementación definitiva. Esta capacidad favorece la automatización de tareas repetitivas y la reproducción sistemática de los procesos desarrollados.

Como parte de sus herramientas integradas, MATLAB incorpora Simulink, un entorno gráfico orientado al modelado y simulación de sistemas dinámicos. Mediante diagramas de bloques interconectados, esta aplicación permite representar el comportamiento de sistemas físicos y procesos de ingeniería con diferentes niveles de complejidad, facilitando su análisis bajo diversas condiciones de operación. La integración entre MATLAB y Simulink posibilita el uso conjunto de modelos matemáticos, algoritmos y datos experimentales dentro de un mismo entorno de trabajo, contribuyendo a optimizar las etapas de diseño, evaluación y validación de sistemas antes de su implementación o experimentación física.

2.5.3 Lenguaje de Programación Python

Python es un lenguaje de programación de código abierto y propósito general que puede ejecutarse en distintos sistemas operativos. Su uso se ha extendido en el desarrollo de software, aplicaciones web, análisis de datos y aprendizaje automático debido a la variedad de herramientas disponibles y a la facilidad con la que permite desarrollar y mantener programas. En aplicaciones relacionadas con la ingeniería, destaca por la amplia cantidad de bibliotecas destinadas al cálculo numérico, el procesamiento de datos y la computación científica. Entre las más utilizadas se encuentran NumPy, empleada para el manejo de arreglos multidimensionales y operaciones matemáticas; Pandas, utilizada para organizar, filtrar y

analizar datos tabulares; y Matplotlib, orientada a la elaboración de gráficos y representaciones visuales de información estadística.

2.5.4 AVL BOOST y LabVIEW

AVL BOOST es un software utilizado para la simulación y análisis de motores de combustión interna. Su uso permite estudiar el comportamiento de motores de encendido por chispa y de encendido por compresión mediante modelos matemáticos que representan distintos fenómenos presentes durante su funcionamiento. Entre las tareas que pueden realizarse con esta herramienta se encuentran la evaluación del rendimiento del motor, el análisis acústico y la estimación de las emisiones generadas durante la combustión. El software también puede trabajar junto con otras aplicaciones desarrolladas por AVL, lo que amplía las posibilidades de estudio en sistemas de propulsión convencionales e híbridos.

LabVIEW es un entorno de programación gráfica empleado en sistemas de medición, control y adquisición de datos. Su interfaz basada en diagramas de bloques permite desarrollar aplicaciones destinadas al monitoreo de variables y al procesamiento de señales en tiempo real. También dispone de mecanismos para intercambiar información con lenguajes de programación como Python y C, lo que facilita su integración con otros programas utilizados en investigación y aplicaciones de ingeniería.

2.5.5 Programas para Análisis Estadístico y Gestión de Datos

Diversos programas permiten realizar análisis estadísticos y procesar información mediante interfaces gráficas, reduciendo la necesidad de desarrollar código para tareas habituales. Entre ellos se encuentra IBM SPSS, un software empleado en estudios académicos y aplicaciones profesionales para el análisis de datos, la elaboración de modelos estadísticos y la exploración de relaciones entre variables. Sus módulos complementarios incorporan técnicas de aprendizaje automático y herramientas para la construcción de modelos predictivos, con la posibilidad de trabajar junto con lenguajes como Python y R.

Por su parte, Microsoft Excel continúa siendo una de las aplicaciones más empleadas para organizar información en formato tabular, realizar cálculos y generar gráficos. Aunque originalmente fue concebido como una hoja de cálculo, sus versiones más recientes incorporan funciones orientadas al análisis de datos, incluyendo herramientas basadas en inteligencia artificial y la ejecución de scripts de Python para el procesamiento de información.

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se describen las actividades que se llevarán a cabo en el proyecto de titulación. Además, se detallan los equipos y programas que se utilizarán, así como el procedimiento para la toma de datos mediante pruebas de laboratorio y ensayos RDE, concluyendo con el procesamiento de la información recopilada. La Figura 23 muestra la estructura general del capítulo y las actividades previstas.

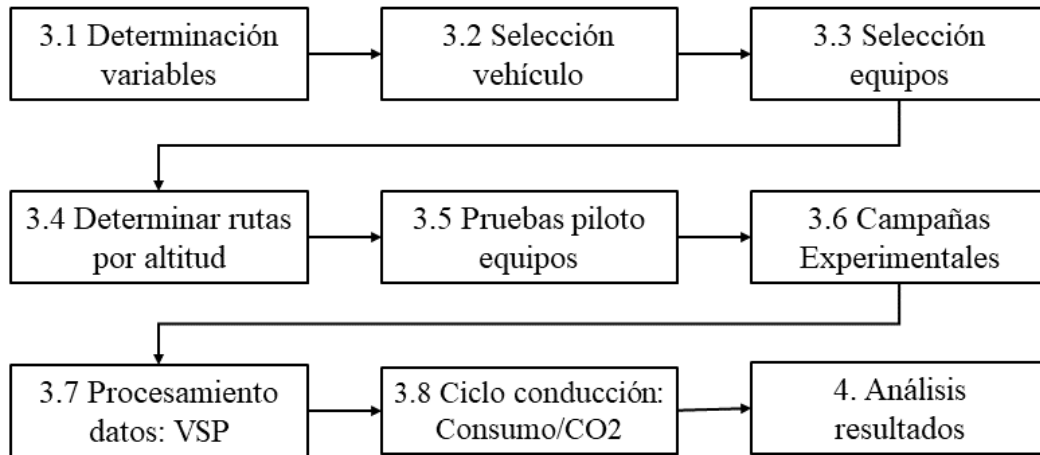


Figura 23. *Flujograma de actividades del proyecto de titulación*

3.1 Determinación de variables de estudio

Todos los datos se seleccionaron para cumplir con los requerimientos de las fórmulas de potencia específica del vehículo, así como con los factores de emisiones y el consumo de combustible. Con el objetivo de mantener un orden metodológico, se decidió dividir las variables en los siguientes grupos:

3.1.1 Variables cinemáticas

Estas variables se definen como los parámetros que describen el movimiento del vehículo en el espacio y el tiempo, sin considerar las fuerzas que lo producen. En este estudio, su importancia radica en la determinación de la posición, velocidad y tiempo de desplazamiento de la unidad. En la Tabla 3. se detallan las variables seleccionadas junto con sus respectivas unidades de medida. Asimismo, se requiere que la frecuencia de muestreo sea de al menos 1 Hz, con el fin de asegurar que todas las variaciones cinemáticas instantáneas queden registradas debidamente.

Tabla 3. Variables cinemáticas

Variable		Unidad
Distancia recorrida	m	Medido
Tiempo	s	Medido
Velocidad instantánea	m/s	Medido
Aceleración instantánea	m/s ²	Estimado
Altitud	m	Medido
Longitud	°	Medido
Latitud	°	Medido
Pendiente	%	Estimado

3.1.2 Estados de conducción

La determinación de los estados de conducción permite clasificar el modo de operación del vehículo durante una campaña de recolección de datos RDE, utilizando la velocidad y la aceleración como criterios principales de segmentación. Con base en la metodología establecida por (Tu et al., 2022), se definen cuatro modos de operación fundamentales, los cuales se describen en la Tabla 4. junto con sus respectivos rangos cinemáticos.

Tabla 4. Rangos cinemáticos de los modos de operación

Modos de operación	Rangos cinemáticos
Ralentí	$(v \leq 2 \text{ km/h}) \ \& \ (a = 0 \text{ m/s}^2)$
Crucero	$(v > 2 \text{ km/h}) \ \& \ (-0.1 < a < 0.1 \text{ m/s}^2)$
Aceleración	$(v > 2 \text{ km/h}) \ \& \ (a \geq 0.1 \text{ m/s}^2)$
Aceleración negativa (desaceleración)	$(v > 2 \text{ km/h}) \ \& \ (a \leq -0.1 \text{ m/s}^2)$

Nota. Tomado de y adaptado por los autores de (Tu et al., 2022).

3.1.3 Potencia específica del vehículo

La potencia específica del vehículo (VSP) se define como la potencia instantánea del automóvil por unidad de masa, expresada en kW/t. Su importancia radica en que permite analizar cómo el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ se relacionan directamente con las diferentes actividades dinámicas que realiza el vehículo durante su operación (Frey et al., 2008).

Para el procesamiento de los resultados derivados del cálculo de VSP, se utiliza la metodología establecida por la EPA en el modelo MOVES. Este método categoriza la actividad total del vehículo para identificar el comportamiento de las emisiones y el consumo bajo distintas condiciones de funcionamiento. Dicha clasificación se compone de 13 categorías, las cuales abarcan los estados de frenado, ralentí y 11 subdivisiones correspondientes a la marcha y aceleración, todas ellas definidas mediante los valores de VSP y la velocidad instantánea como se puede evidenciar en la Tabla 5.

Tabla 5. Definiciones de los modos de funcionamiento para el consumo energético acumulado

Descripción		Velocidad del vehículo (km/h)		
VSP Rango (kW/t)		$v < 1.6$	$1.6 \leq v < 40$	$40 \leq v \leq 80$
$VSP < -4$	Bin 0	Bin 1	Bin 101	Bin 201
$-4 \leq VSP < -2$	Desaceleración o freno	Ralentí	Bin 102	Bin 202
$-2 \leq VSP < -1$			Bin 103	Bin 203
$-1 \leq VSP < 0$			Bin 104	Bin 204
$0 \leq VSP < 1$			Bin 105	Bin 205
$1 \leq VSP < 2$			Bin 106	Bin 206
$2 \leq VSP < 4$			Bin 107	Bin 207
$4 \leq VSP < 6$			Bin 108	Bin 208
$6 \leq VSP < 8$			Bin 109	Bin 209
$8 \leq VSP < 10$			Bin 110	Bin 210
$10 \leq VSP < 12$			Bin 111	Bin 211
$12 \leq VSP < 14$			Bin 112	Bin 212
$VSP \geq 14$			Bin 113	Bin 213

Nota. Adaptado y traducido por los autores de (Rosero et al., 2024).

3.1.4 Variables de operación de motor

En este apartado se describen los parámetros de entrada registrados durante la operación del motor. Se detalla el consumo de combustible, variable fundamental para la investigación, junto con el desempeño mecánico de la planta motriz durante los ensayos; específicamente: el régimen de giro, la potencia efectiva, el par motor y el porcentaje de apertura de la mariposa. En la Tabla 6. se presentan los datos recolectados que sirven como base para los cálculos posteriores dentro del estudio.

Tabla 6. Variables de operación del motor

Variable	Unidad	
Régimen de giro del motor	rev/min	Medido
Flujo instantáneo de combustible	l/h	Medido
Potencia efectiva	kW	Estimado
Par motor	Nm	Estimado
Apertura de la mariposa	%	Medido
Carga de motor	%	Estimado
Temperatura de aire de admisión	°C	Medido
Presión de aire de admisión	kPa	Medido

3.2 Selección de vehículo

Durante los últimos 30 años, Chevrolet se ha consolidado como una de las marcas con mayor participación en el mercado ecuatoriano, manteniendo una hegemonía en ventas entre los años 1994 hasta el 2022, año en el que vendió 24 525 unidades consolidando una participación del 18% del total de vehículos vendidos en el país (AEADE, 2018). De la misma manera la mayoría de los vehículos matriculados en el Ecuador son automóviles impulsados por motores a

gasolina (INEC, 2015). Por ello el vehículo seleccionado fue un automóvil sedan de marca Chevrolet, que funciona con gasolina de bajo octanaje, la misma que es expendida en las gasolineras del Ecuador.

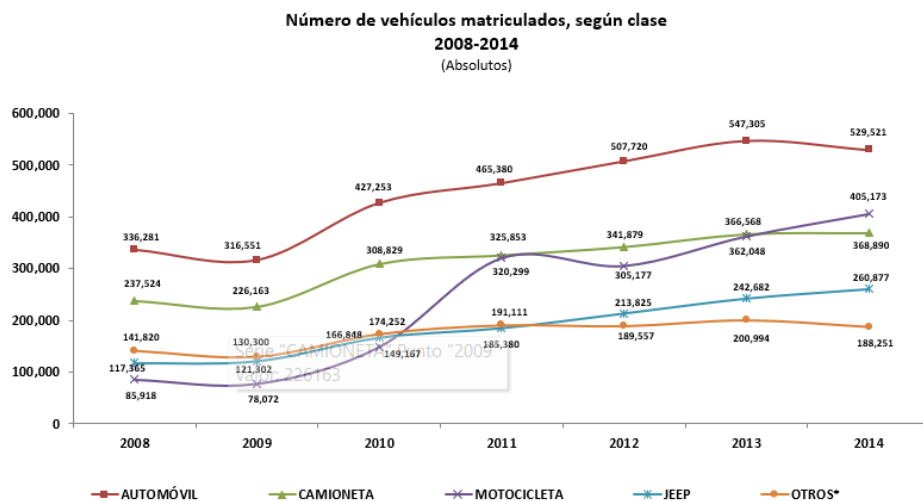


Figura 24. Número de vehículos matriculador 2008-2014
(INEC, 2015)

3.2.1 Vehículo seleccionado

El vehículo seleccionado para el presente estudio es un Chevrolet Aveo Family, con una cilindrada de 1500cm³, impulsado por un motor de 4 cilindros en línea acoplado a una caja manual de 5 velocidades y tracción delantera.



Figura 25. Vehículo usado en la campaña experimental

En la Tabla 7. se presentan las características técnicas de dicho automotor, incluyendo datos de potencia, torque, dimensiones, etc. Datos relevantes para calibrar los equipos de medición. Cabe recalcar que se realizó una puesta a punto al vehículo previa a las pruebas piloto, con el

fin de garantizar las óptimas condiciones del automotor y que los registros de datos sean válidos.

Tabla 7. *Características técnicas Chevrolet Aveo Family 2017*

Parámetro	Descripción
Marca	Chevrolet
Modelo	Aveo Family
Año de fabricación	2017
Tipo de carrocería	Sedán
Peso bruto vehicular	1365 kg
Largo/Ancho/Alto	4235mm/1670mm/1495mm
Distancia entre ejes	2480mm
Motor	1.5 L SOHC
Tipo de combustible	Gasolina
Tipo de inyección de combustible	Inyección multipunto
Relación de compresión	9.5:1
Transmisión	Manual 5 velocidades
Cilindrada	1498 cm ³
Potencia máxima	83 HP @ 5600 rpm
Par máximo	128 Nm @ 3000 rpm
Consumo de combustible	7-8.9 l/100km

(Chevrolet, 2019)

3.3 Selección de equipos

La selección de equipos se realiza con la finalidad de garantizar el registro de las variables de operación de motor, así mismo deberían permitir la medición física del consumo de combustible para validar los resultados de esta investigación. Todos los equipos y sensores deben registrar todas las variables establecidas con una frecuencia de muestreo de 1 Hz, y operar con los 12V provenientes de la batería del vehículo a través del puerto OBD-II.

Considerando los criterios expuestos, se determinó el uso de dos registradores de datos, un ELM327 y un CANEdge2, además de 2 flujómetros de combustible DFM ACAN 100 y una antena GNSS conectados al CANEdge2. Además de un ensayo extra, usando un PEMS parSYNC FLEX-PNC, en la ciudad de Riobamba.

Por otro lado, la conexión en paralelo de los registradores y la integración de los sensores a la red CAN proporcionado por el CANEdge2 requirió el uso de un cable serial RS232 y un cable en Y para obtener la alimentación del puerto OBD para los dos registradores.

Tabla 8. Descripción y uso de los equipos

Tipo de variable	Variables Registradas	Equipo	Método
Variables de operación de motor	-Régimen de giro -Flujo instantáneo de combustible -Apertura de la mariposa -Temperatura del aire de admisión -Presión del aire de admisión	ELM327 + Torque Pro	OBD II- A través del sistema OBD en conjunto con la aplicación Torque Pro.
Variables cinemáticas	-Distancia Recorrida -Tiempo -Velocidad -Altitud	CAN Edge 2 + GNSS	RED CAN Sistema de posicionamiento global
Variables de operación (medición física)	-Flujo de suministro de combustible -Flujo de retorno de combustible -Diferencial de flujo de combustible -Concentración de CO ₂ en los gases de Escape -Temperatura Ambiente -Presión atmosférica	DFM ACAN 100 + CAN Edge 2 PEMS 3DATX	RED CAN -Medición de gases y nanopartículas mediante un sistema de cartuchos -Estación meteorológica

3.3.1 ELM327

El ELM327 es un dispositivo de diagnóstico automotriz de bajo costo que se acopla al puerto OBD II del vehículo y permite leer y borrar códigos de error, además de visualizar en tiempo real datos de funcionamiento del motor como; régimen de giro, temperatura del motor, y demás lecturas de sensores. Dicho dispositivo fue usado en conjunto con la aplicación Torque Pro que permite registrar las variables que el dispositivo lee directamente de la ECU del motor. Dicho dispositivo puede usar la mayoría de los protocolos de comunicación tales como: ISO 9141-2, ISO 14230-4 KWP, SAE J1850 PWM, SAE J1850 VPW y SAE J1939.



Figura 26. Registrador ELM327
(Robotics, 2026)

3.3.2 CANEdge2

Este registrador permitió grabar datos de red CAN proporcionados por los sensores de flujo de combustible y posicionamiento global, se trata de un dispositivo compatible con software libre y que puede operarse con bases de datos también de libre acceso que permiten la decodificación de los datos que son grabados en una memoria externa extraíble. Su diseño compacto y capacidad de grabación con una resolución de 50us permitió su aplicación en esta investigación sin pérdidas de información.



Figura 27. Registrador CAN Edge 2
(CSS Electronics, 2026)

Este nuevo diseño del CANEdge2 permite el registro de la posición del vehículo, accediendo al sistema de posicionamiento global sin la necesidad de un dispositivo extra, también permite el registro de datos inerciales, gracias al giroscopio y acelerómetro integrado.

Tabla 9. *Características técnicas CANEdge2*

Característica	Descripción
Canales de conexión	2 canales CAN, con soporte CAN FD
Identificadores	Cumple con las especificaciones CAN 2.0A (ID de 11 bits) y 2.0B (ID de 29 bits).
Tarjeta SD	Micro SD industrial (SDHC) clase 10 de 8GB, con una velocidad de lectura de 80MB/s
Reloj interno	Registra fotogramas CAN con una resolución de 50 microsegundos
Modulo GPS	Sensor u-blox NEO-M9V de calidad profesional, con giroscopio y acelerómetro incorporado.
GNSS	Admite comunicación los satélites: GPS (EE. UU.), Galileo (Europa), BeiDou (China) y GLONASS (Rusia)
Suministro de energía	De 7V 32V a través del conector DB9 del canal 1
Consumo de energía	Bajo consumo (1W), sin riesgo de Agotamiento de batería
Señales	Posición GNSS (5Hz) Hora GNSS (5Hz) Velocidad GNSS (5Hz) Altitud GNSS (5Hz) Odómetro (5Hz)

Nota: adaptado de (CSS Electronics, 2026)

3.3.3 Flujómetros DFM ACAN 100

Los medidores de combustible DFM se usaron con la finalidad de tener una medición física sobre el consumo de combustible en las rutas de estudio, dicho sensor puede ser usado con distintos hidrocarburos como Diesel o aceite caliente, siempre que tengan una viscosidad cinemática de $1.5 \text{ mm}^2/\text{s}$ a $6 \text{ mm}^2/\text{s}$.



Figura 28. *Medidor de flujo de combustible*
(TECHNOTON, 2026)

De la misma manera, el dispositivo está diseñado para realizar un registro telemático de datos de flujo, sin embargo, en esta investigación usamos una función distinta que consiste en una

conexión de forma autónoma a una red de transmisión de datos, lo que también permite monitorear el registro de datos.

Tabla 10. Descripción técnica flujómetros DFM ACAN 100

Característica	Descripción
Presión nominal	2 bares
Presión máxima	25 bares
Flujo mínimo	0.5 l/h
Flujo máximo	100 l/h
Tensión de funcionamiento	10 a 45 V
Consumo de corriente (24V/12V)	25mA/50mA
Viscosidad cinámica del líquido medido	1.5 a 6.0 mm ² /s
Protocolos de transmisión de datos	J1939 y NMEA 2000
Velocidad de intercambio de datos	(100, 125, 250, 500, 1000) Kbit/s
Error relativo de medición	No más del 1%

(TECHNOTON, 2026)

3.3.4 PEMS parSYNC FLEX-PNC

Durante la campaña experimental se añadió un ensayo en el PEMS que proporciona la medición de partículas mediante un sensor de concentración numérica de partículas (PNC). Además, el dispositivo permite el registro de ubicación GPS y meteorología ambiental y obtener datos de operación de funcionamiento de motor directamente de la ECU.



Figura 29. Medidor de Emisiones Portátil
(3DATX, 2026)

El software presenta las mediciones que son visualizadas y registradas desde un computador portátil, lo que lo vuelve adaptable para cualquier desafío. En la Tabla 11. se presentan las características más importantes del equipo.

Tabla 11. *Características de medición PEMS 3DATX*

Gases		Infrarrojo no dispersivo (NDIR)			Celdas electroquímicas individuales		
		CO ₂	CO	HC	NO	NO ₂	O ₂
Rango		0-20%	0-15%	0-4000 ppm	0-5000 ppm	0-300 ppm	0-100%
T0-90 Tiempo (s)		<3.5	<3.5	<3.5	<5	<35	<6
Resolución		0.01%	0.01%	1 ppm	1-2 ppm	0.1ppm	0.01%
Precisión	Abs	±0.3%	±0.02%	±8ppm	±15ppm	±5ppm	±0.1%
	Rel	±3%	±3%	±3%	±2%	±2%	±2%
Repetibilidad	Abs	±0.1%	±0.02%	±6ppm	±5ppm	±5ppm	±0.1%
	Rel	±2%	±2%	±2%	±2%	±2%	±2%

(3DATX, 2026)

3.3.5 Estación de energía portátil OUKITEL P2001 Plus de 2400 W/2048 Wh

Para completar la ruta RDE monitoreada con el PEMS, fue necesario usar una estación de energía portátil que garantice la disponibilidad de energía durante toda la ruta tanto para el equipo de medición como para el computador en el que se almacenan los datos.

**Figura 30.** *Estación de energía portátil*
(Wellbots, 2025)

3.3.6 Cables de conexión

3.3.6.1 Cable para comunicación Flujómetros DFM ACAN 100

El cable de conexión de la Figura 31. creado por (Arias Cuasapaz, 2025), con el que se comunican entre sí los dos flujómetros, se alimenta con 12V a ambos medidores, cuenta con un cable de conexión a una computadora mediante K – Line, conexión a red CAN y conexión a CANUp mediante sistema S6.

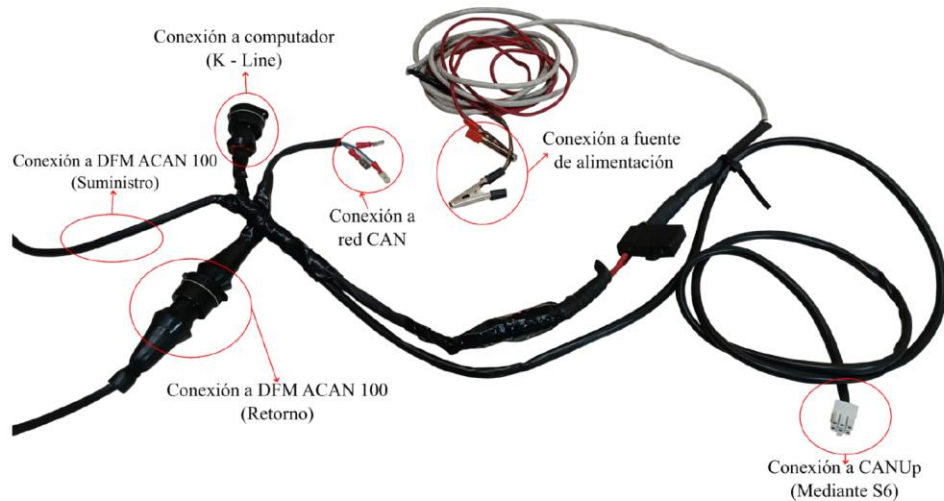


Figura 31. *Cable de conexión común*
(Arias Cuasapaz, 2025)

3.3.6.2 Cable Serial RS232

El cable serial es usado para comunicar los flujómetros con el registrador CAN Edge 2 y obtener los databytes de flujo de combustible presentes en la red CAN. Cuenta con 3 cables correspondientes a CAN H, CAN L, y GND conectados a un cabezal de terminal DB9 compatible con el Canal 2 del CANEdge2.



Figura 32. *Cable Serial RS232*
(Arias Cuasapaz, 2025)

3.3.6.3 Conector OBD II en “Y”

El conector en “Y” para puerto OBD II, ilustrado en la Figura 33. sirve para la conexión en simultaneo de los equipos registradores, alimentando el ELM327 y el CANEdge2 con 12V provenientes de la batería del vehículo. Este tipo de cables permiten a los registradores conectarse con la ECU del vehículo sin tener que realizar conexiones invasivas.



Figura 33. *Cable OBD II en “Y”*

3.4 Determinación de rutas por nivel altitudinal

El criterio fundamental para la selección de las rutas fue la variabilidad de la altitud sobre el nivel del mar, factor determinante en la eficiencia volumétrica y emisiones de los motores de combustión interna. Bajo esta premisa, se seleccionaron centros urbanos en las regiones Sierra (Riobamba, Ibarra, Tulcán) y Costa (Santo Domingo, Esmeraldas), permitiendo un análisis comparativo en un rango amplio de presión atmosférica.

3.4.1 Esmeraldas

La ciudad de Esmeraldas constituye el punto de referencia a nivel del mar para este estudio, situándose a una altitud promedio de 15 m.s.n.m. Esta ubicación en el litoral norte del país es fundamental, ya que permite evaluar el desempeño del vehículo y sus emisiones bajo la máxima presión atmosférica y temperatura ambiente del experimento. En la Figura 34, se presentan las características ambientales y la ubicación geográfica de esta localidad.

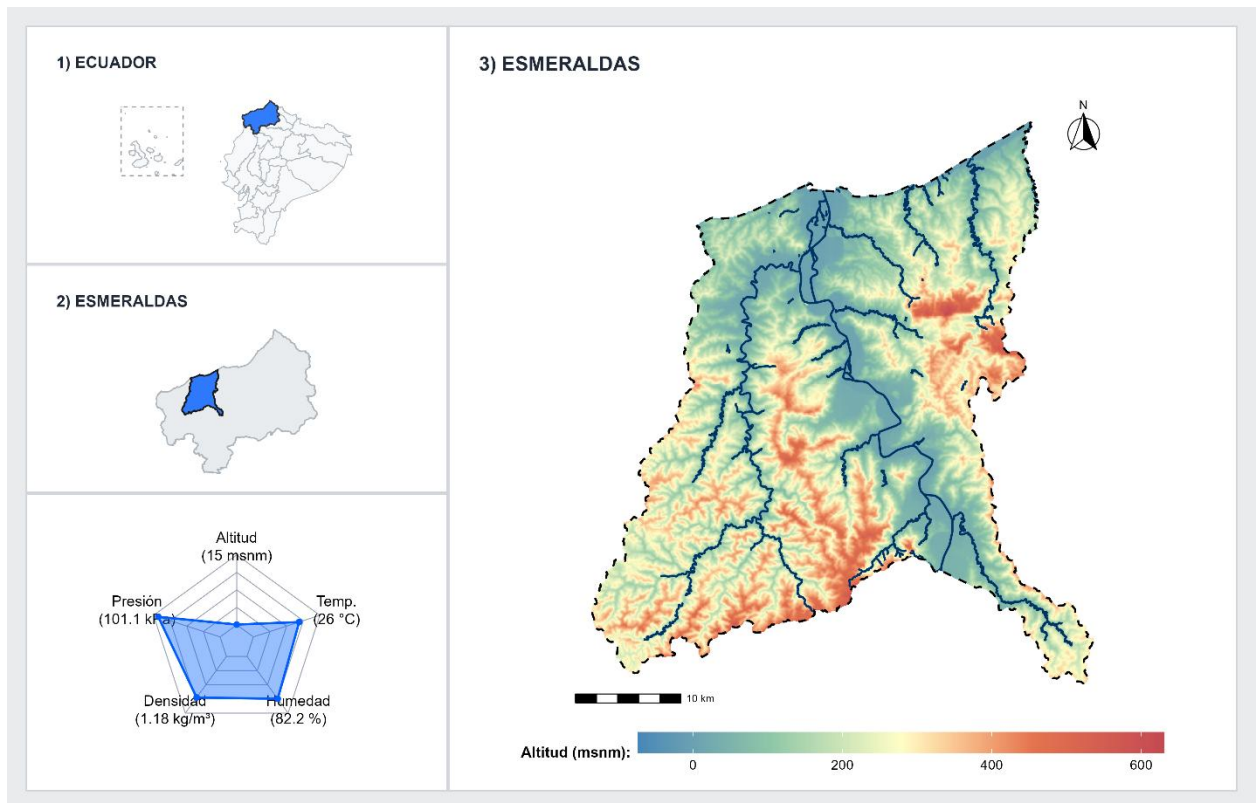


Figura 34. *Mapa y características principales de la ciudad de Esmeraldas*
(CONALI & SNI, 2023)

Al no existir una ruta RDE predefinida para esta ciudad, se procedió al diseño original de un trayecto que replicara la estructura y exigencias de las rutas empleadas en las ciudades de la Sierra y el subtrópico. Este diseño propio garantiza la homogeneidad del estudio al mantener la proporción de conducción urbana, suburbana y autopista. En la Figura 35, se exhibe el perfil topográfico del recorrido, el cual muestra una tendencia prácticamente plana, mientras que en la Figura 36, se detalla la cartografía de la ruta completa.

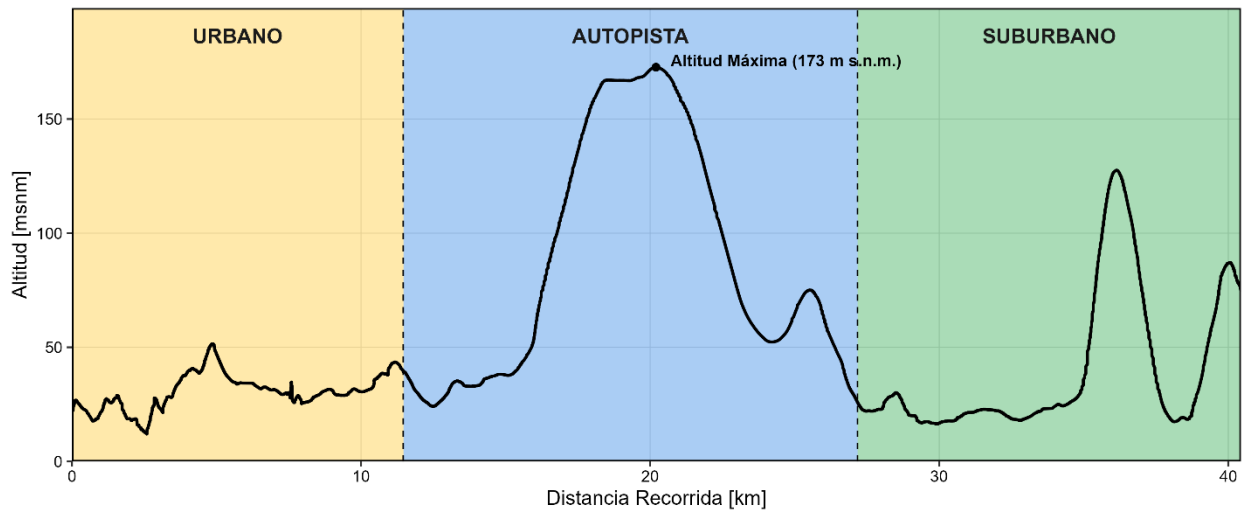


Figura 35. Perfil topográfico, ciudad Esmeraldas



Figura 36. Trayecto de estudio de la ciudad de Esmeraldas

3.4.2 Santo Domingo

Santo Domingo, capital de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, constituye la segunda localidad del litoral ecuatoriano analizada en este estudio. Ubicada en una zona de transición a una altitud aproximada de 625 m.s.n.m., su clima cálido-húmedo y su presión atmosférica superior a las ciudades de la Sierra aportan datos cruciales para contrastar el comportamiento del motor en condiciones de mayor densidad de aire. En la Figura 37, se detallan los parámetros geográficos y climáticos representativos de esta región.

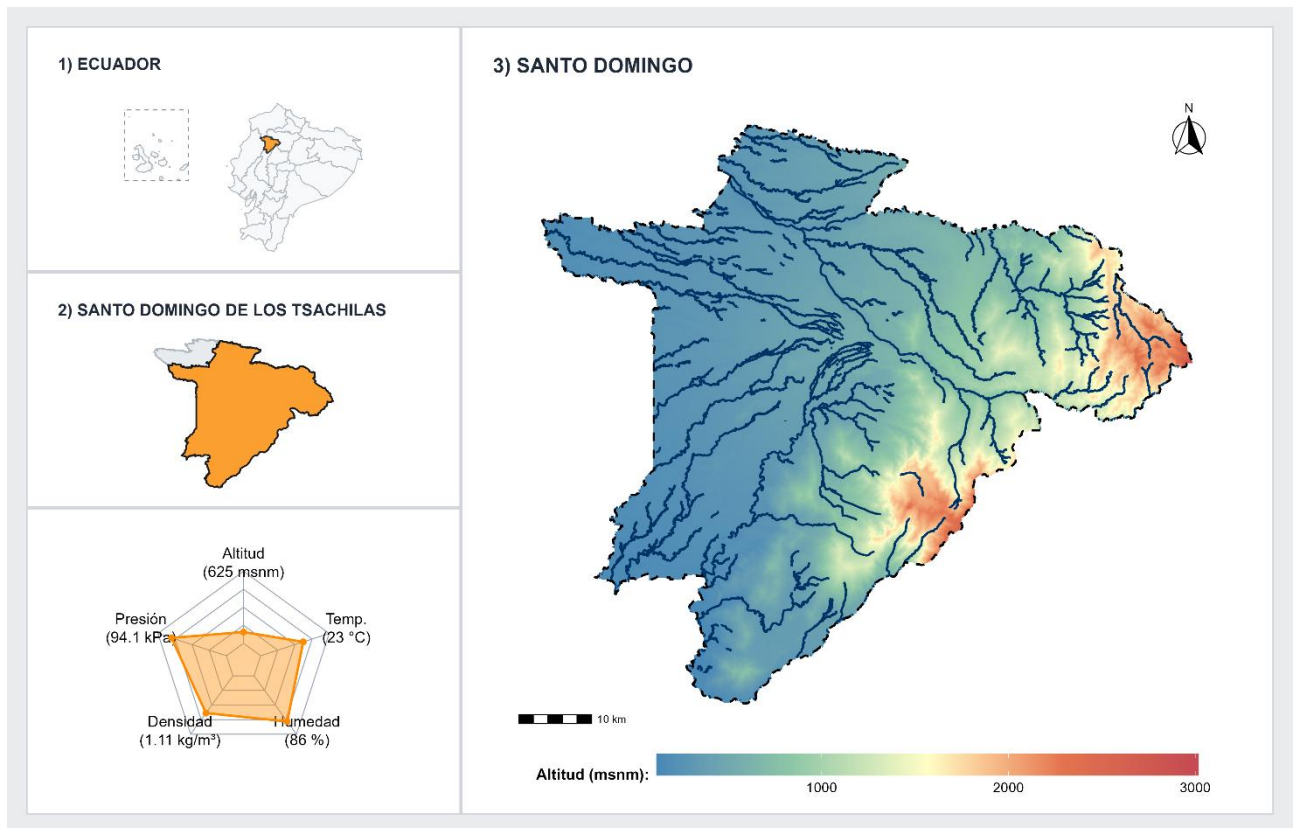


Figura 37. Mapa y características principales de la ciudad de Santo Domingo
(CONALI & SNI, 2023)

Debido a la inexistencia de una ruta RDE previamente validada para esta ciudad, se replicaron los criterios técnicos aplicados en Tulcán por el mismo autor de referencia. Sin embargo, se realizó una extensión controlada del trayecto original para asegurar que la recolección de datos superara los 60 minutos de operación efectiva, garantizando la estabilidad de las muestras. En la Figura 38, se evidencia la topografía del recorrido, caracterizada por una pendiente más constante, mientras que en la Figura 39. se ilustra la cartografía de la ruta completa.

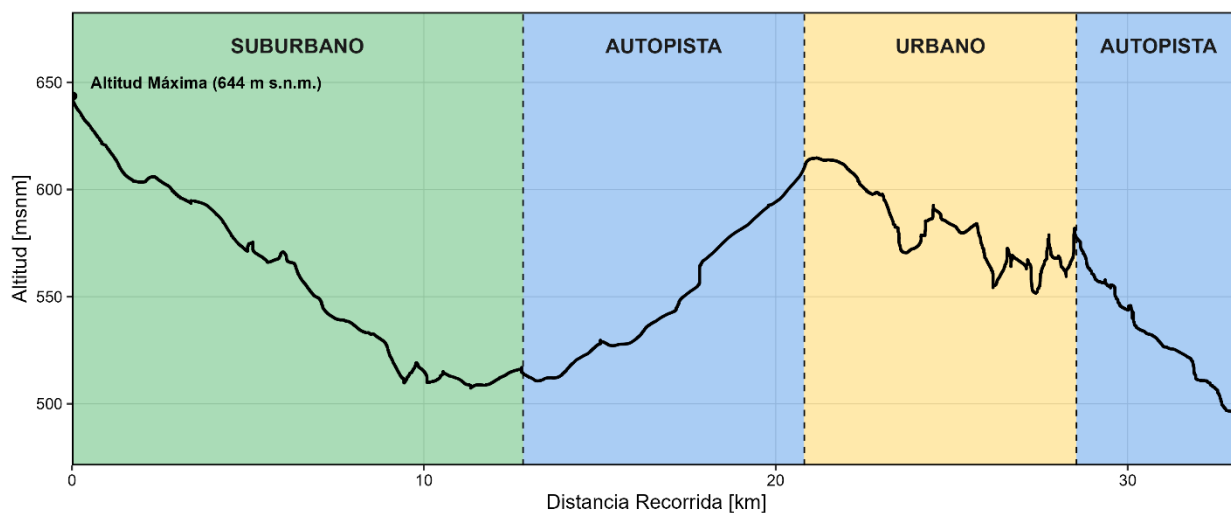


Figura 38. Perfil topográfico, ciudad Santo Domingo

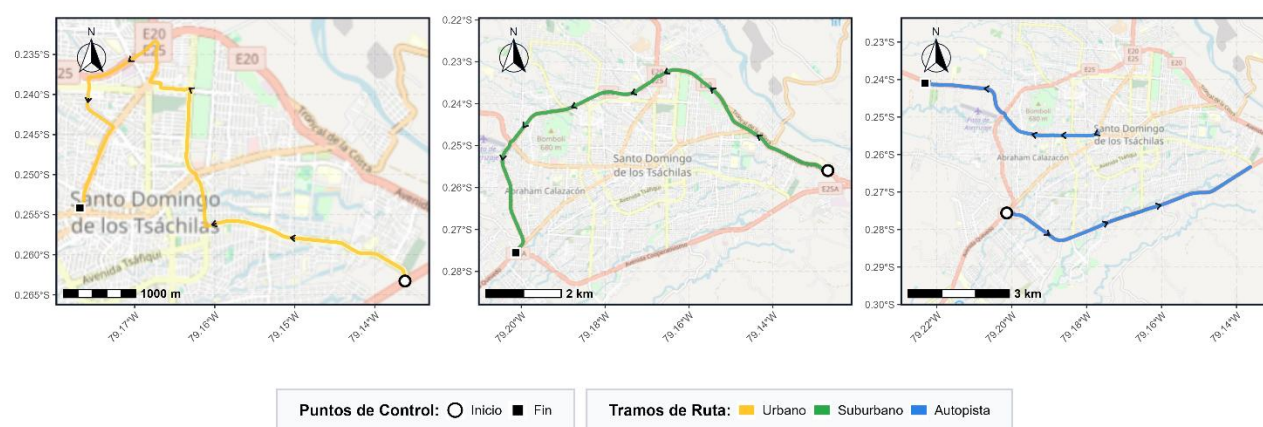


Figura 39. Trayecto de estudio de la ciudad de Santo Domingo

3.4.3 Ibarra

La ciudad de Ibarra, situada en la provincia de Imbabura, presenta un piso climático templado que actúa como un punto de transición térmica y barométrica en el estudio. Para esta localidad, se implementó la ruta RDE diseñada por Narváez Espinosa & Narváez Sosa (2023), la cual garantiza una recolección de datos normalizada al integrar tramos urbanos de alta densidad, sectores suburbanos y segmentos de autopista sobre la vía Panamericana (E35). Las características generales de la zona de estudio se resumen en la Figura 40.

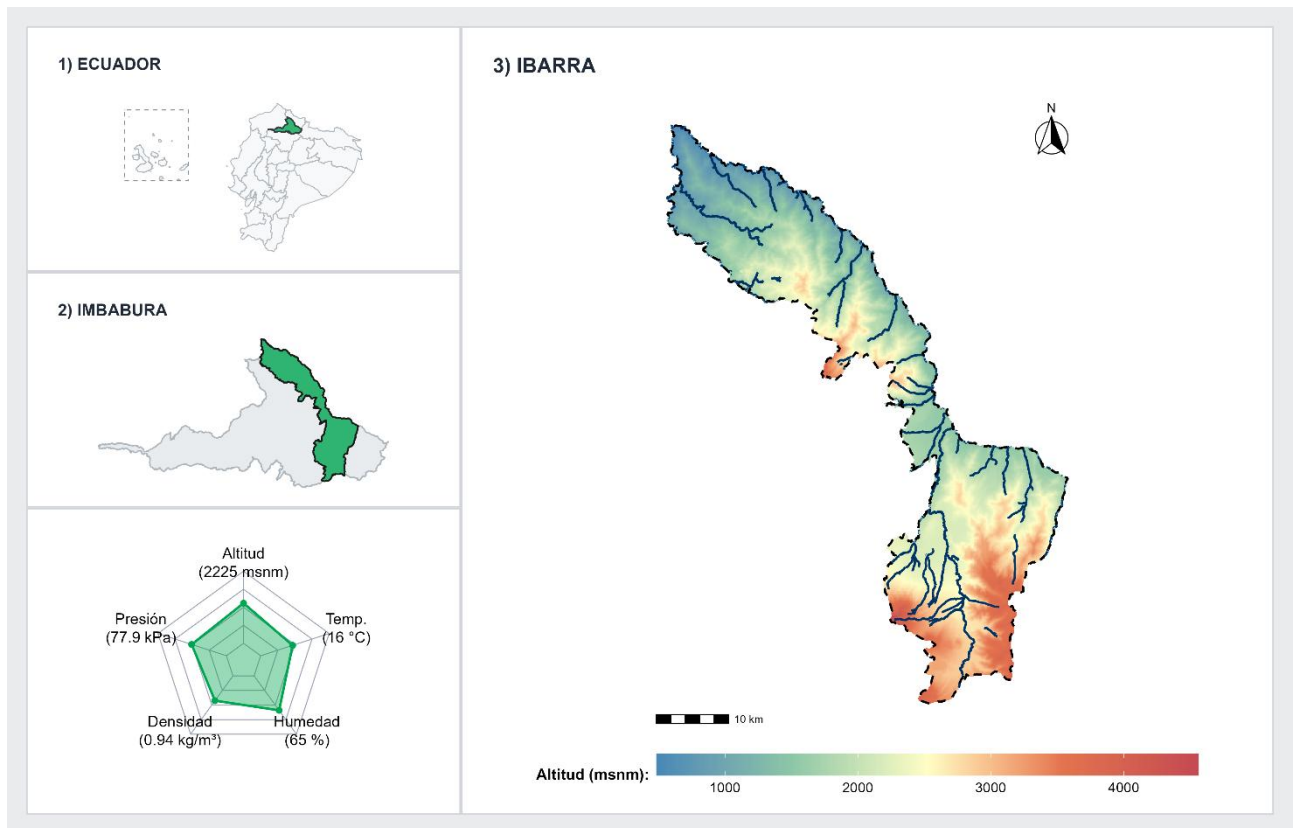


Figura 40. Mapa y características principales de la ciudad de Ibarra
(CONALI & SNI, 2023)

En la Figura 41, se presenta el perfil geográfico obtenido mediante el sistema de adquisición de datos. Aunque la ciudad muestra una gradiente topográfica más moderada en comparación con Riobamba o Tulcán, el perfil evidencia una variabilidad suficiente para validar la distribución de carga del motor en condiciones de conducción real. Finalmente, en la Figura 42. se detalla la cartografía completa del recorrido, verificando el cumplimiento de la segmentación requerida por la metodología.

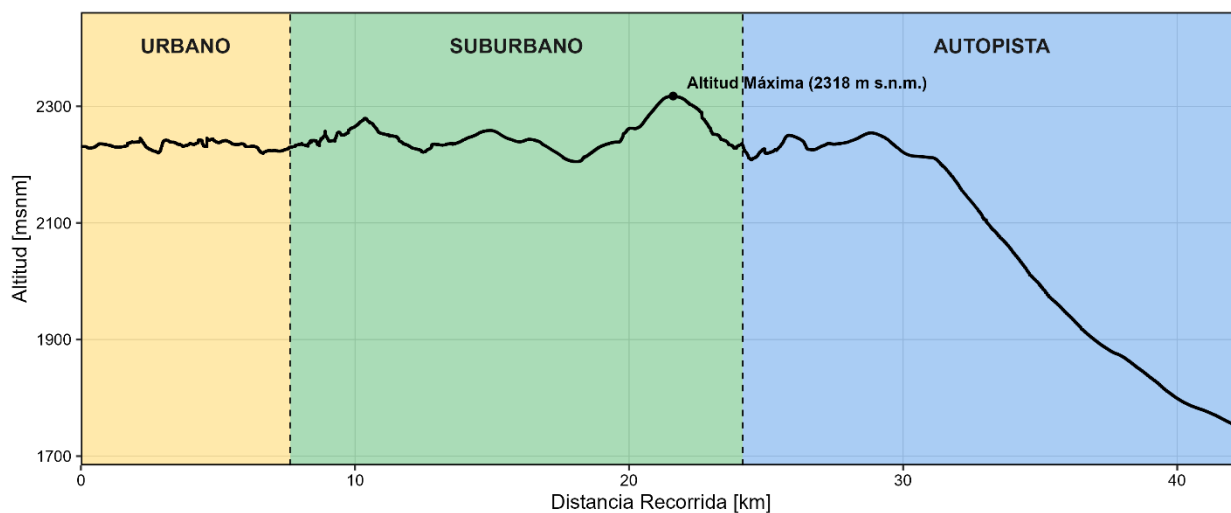


Figura 41. Perfil topográfico, ciudad Ibarra

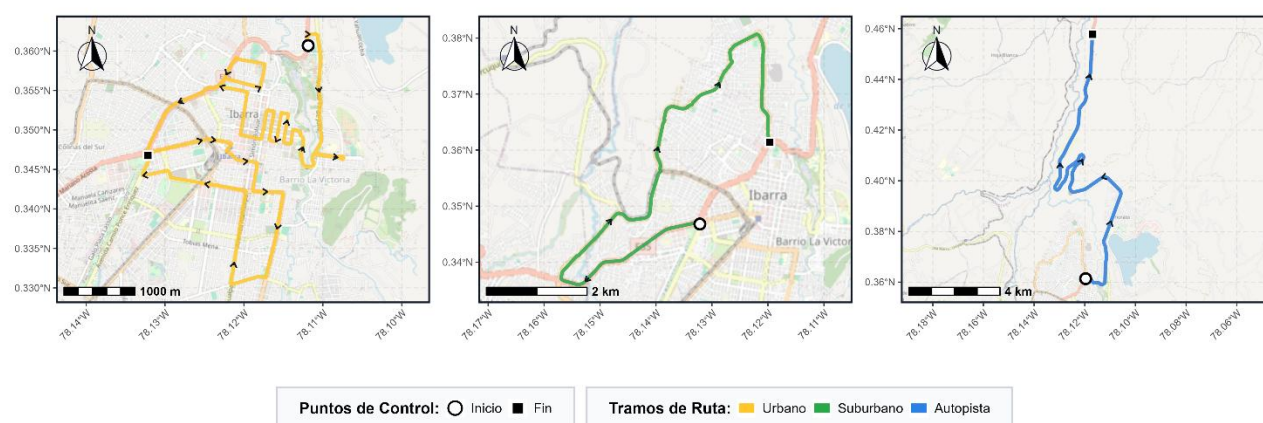


Figura 42. Trayecto de estudio de la ciudad de Ibarra

3.4.4 Tulcán

Tulcán, capital de la provincia del Carchi, se sitúa como la ciudad de mayor altitud en este estudio (2980 m.s.n.m. aproximadamente). Su ubicación geográfica y sus condiciones climáticas de baja temperatura son variables de gran relevancia, ya que influyen directamente en la densidad del aire y, por ende, en la formación de contaminantes. En la Figura 43, se detallan las características geográficas y la ubicación estratégica de esta localidad.

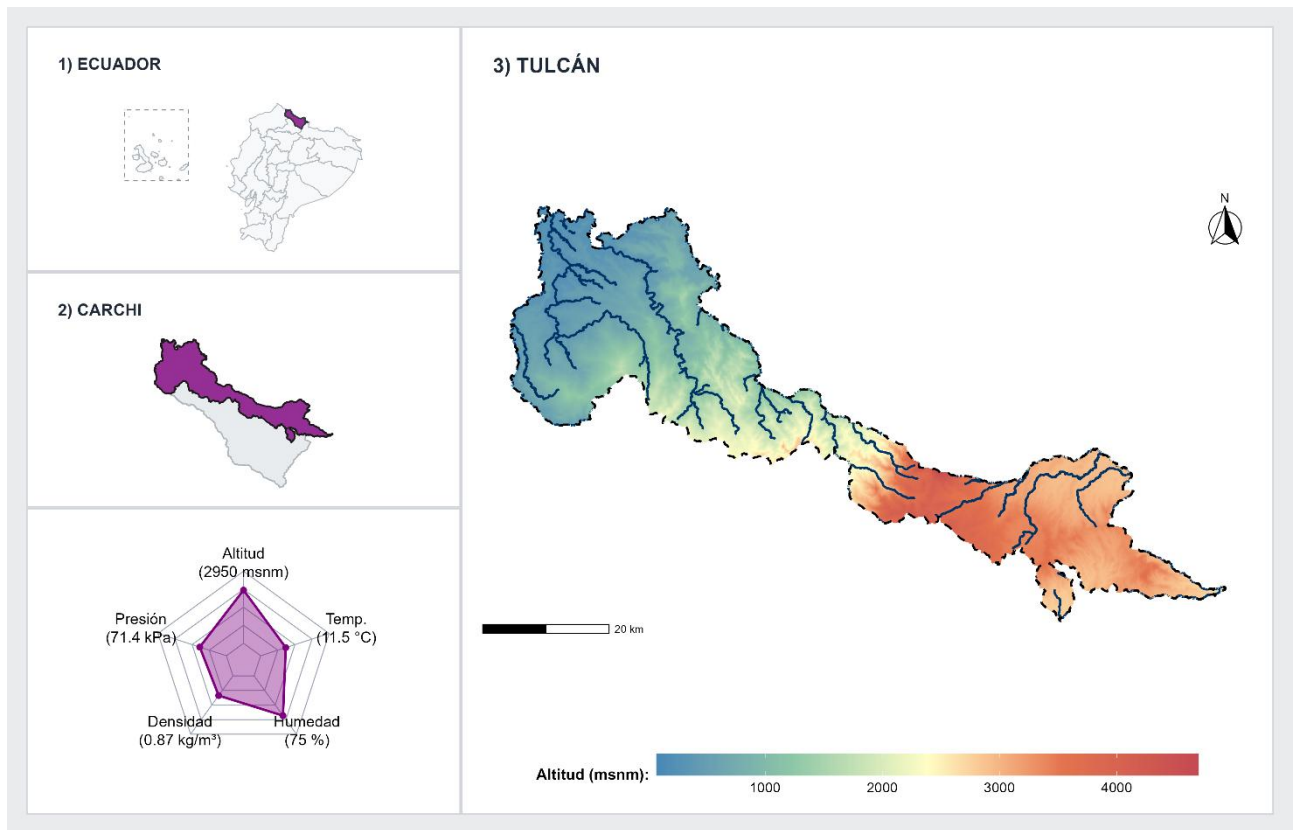


Figura 43. Mapa y características principales de la ciudad de Tulcán
(CONALI & SNI, 2023)

Debido a la ausencia de una ruta RDE oficial para esta ciudad, se replicaron los criterios y trayectorias del estudio previo desarrollado por (Arias Cuasapaz, 2025) . La ruta seleccionada aprovecha la topografía local, integrando pendientes pronunciadas y tramos de alta velocidad en autopista, lo que permite evaluar el comportamiento del motor bajo condiciones de alta carga y baja presión parcial de oxígeno. En la Figura 44, se presenta el perfil de elevación, mientras que la Figura 45. ilustra la cartografía completa del recorrido segmentado.

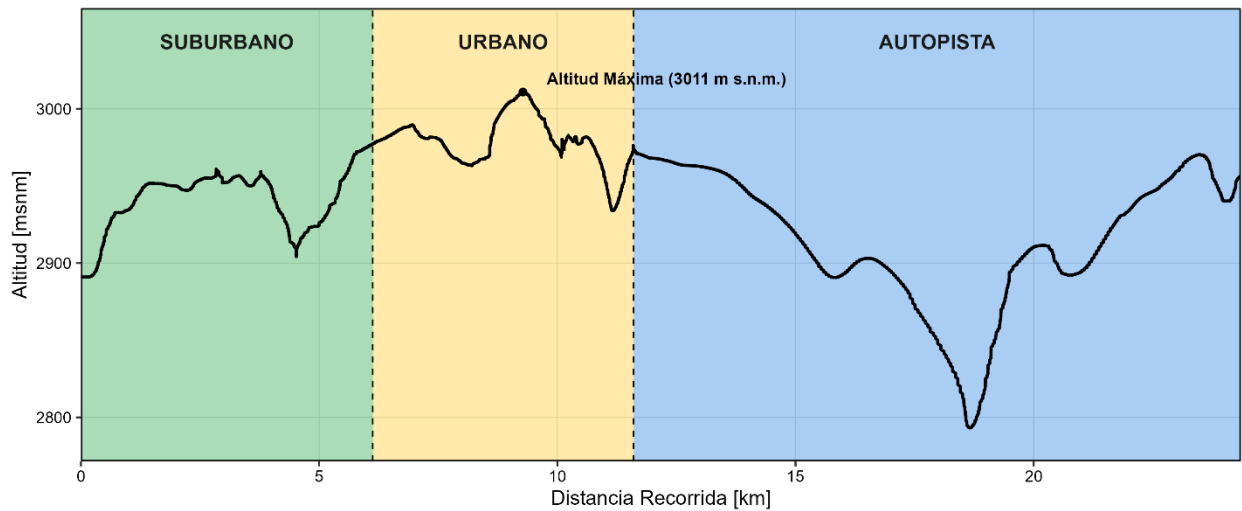


Figura 44. Perfil topográfico, ciudad Tulcán

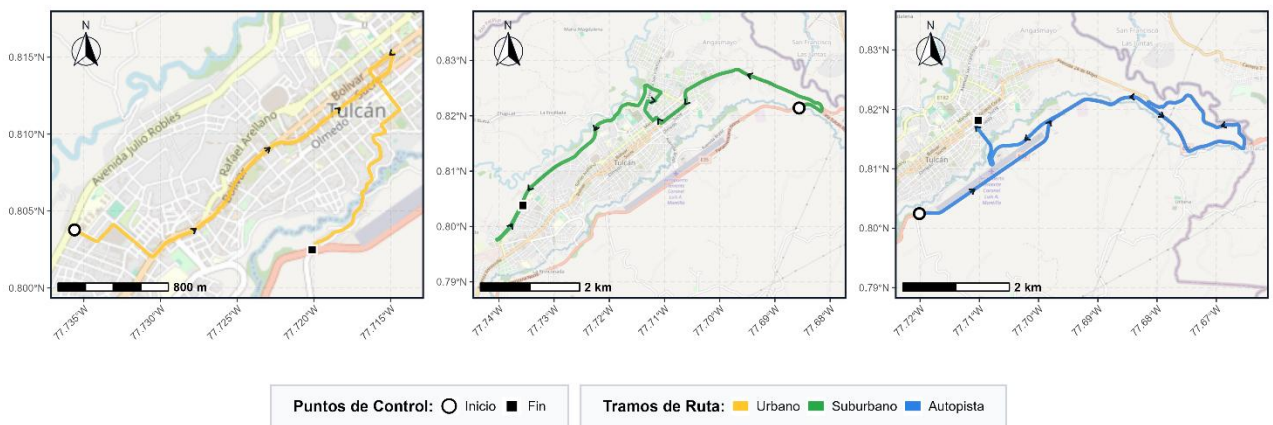


Figura 45. Trayecto de estudio de la ciudad de Tulcán

3.4.5 Riobamba

Riobamba, ubicada en la provincia de Chimborazo, representa una altitud de 2850 m.s.n.m. aproximadamente. Se caracteriza por una topografía irregular con variaciones constantes de pendiente, lo que somete al motor a diferentes estados de carga, factor crítico para el análisis de emisiones. En la Figura 46, se detallan los parámetros geográficos y ambientales predominantes de la zona.

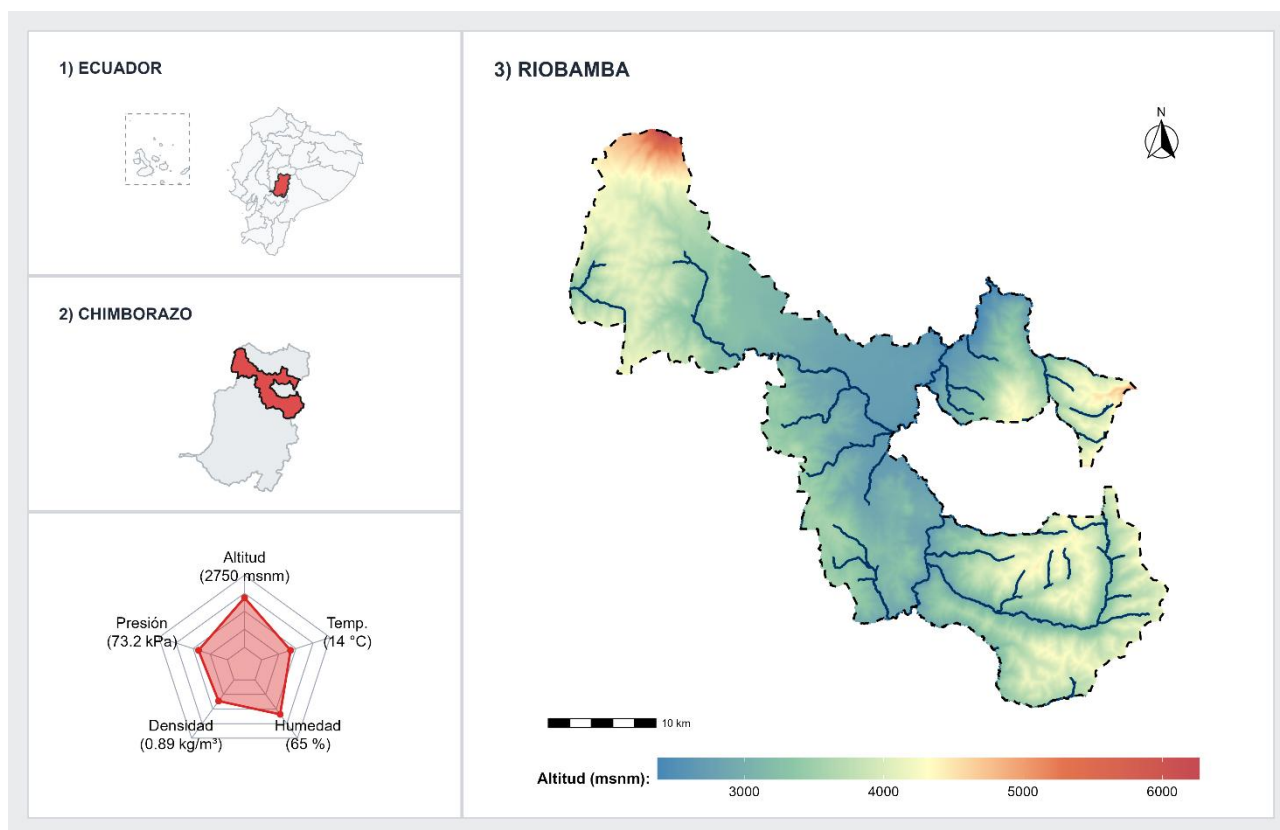


Figura 46. Mapa y características principales de la ciudad de Riobamba (CONALI & SNI, 2023)

En esta ciudad se llevó a cabo una campaña de recolección de datos utilizando equipo de medición de emisiones a bordo (PEMS). Los resultados obtenidos en esta localidad sirven como referencia técnica para las campañas experimentales posteriores. En la Figura 47, se presenta el perfil topográfico del recorrido, mientras que en la Figura 48, se ilustra la trayectoria completa, segmentada rigurosamente en tramos urbanos, suburbanos y de autopista, cumpliendo con la distribución de conducción real requerida.

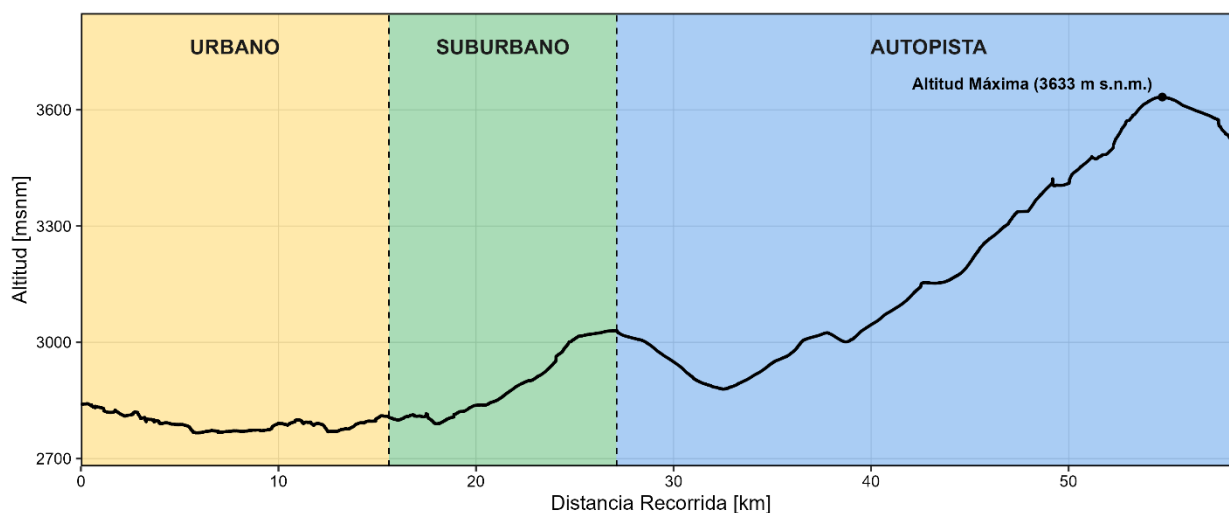


Figura 47. Perfil topográfico, ciudad Riobamba

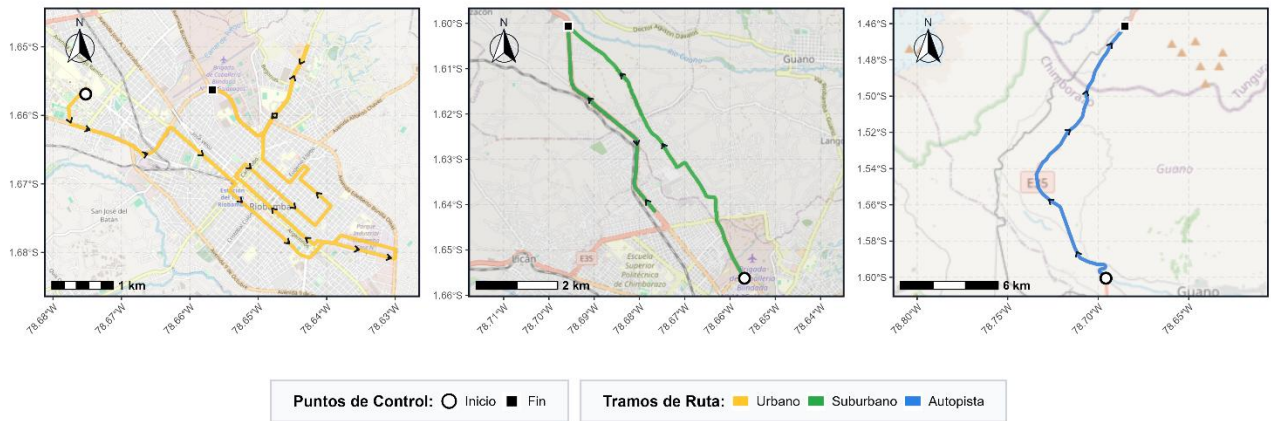


Figura 48. Trayecto de estudio de la ciudad de Riobamba

3.5 Pruebas piloto

Previo a la ejecución de la campaña experimental, se requiere realizar una prueba piloto con el fin de verificar la operatividad y sincronización de los equipos de medición. Asimismo, este procedimiento permite validar la viabilidad de las calles seleccionadas en cada ruta urbana. Posteriormente, se detallan las características geográficas y climáticas de cada ciudad elegida.

3.5.1 Pruebas de comunicación OBDII – ELM327- Torque Pro

Para comenzar, analizamos todas las variables de operación del motor que puede extraerse a través del ELM327 en conjunto con la aplicación Android Torque Pro (Figura 49). Con este procedimiento se configuró adecuadamente la aplicación para el registro de datos que se validaron después de pruebas de ruta.

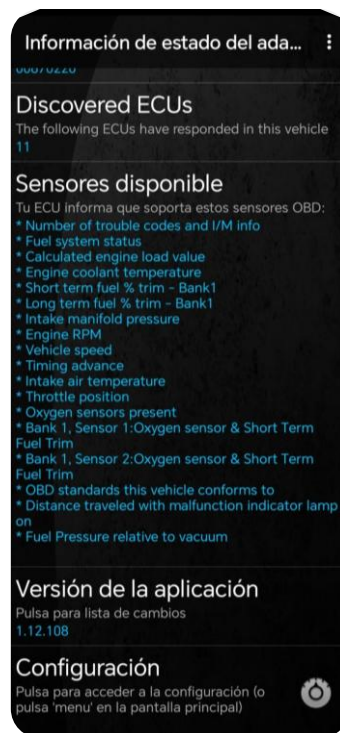


Figura 49. *Interfaz Torque PRO (Sensores disponibles para monitoreo)*

3.5.1.1 Configuración Torque Pro

Se trata de una aplicación diseñada para dispositivos Android que facilitó la recolección de datos de operación del motor, se conecta mediante Bluetooth a la interfaz del ELM327. Se usó la versión de pago que permite un monitoreo continuo y el registro de todas las variables posibles. Así mismo, se configuró el perfil del vehículo con las características del auto usado en las campañas experimentales.



Figura 50. *Interfaz Torque PRO (Perfil del vehículo)*

Así mismo, se incluyeron los PID estándar para el protocolo OBD II, lo que permite el monitoreo de datos de operación de motor, fijando una frecuencia de muestreo de 1 Hz unificando las unidades de medida en el sistema internacional.

3.5.2 Configuración CANEdge2

Se trata de un dispositivo de registro de datos del proveedor CSS electronics el cual presenta un sencillo interfaz que permite la configuración del dispositivo (Figura 51). Se tomó como base un archivo de configuración provisto por el fabricante en el cual se configuró el Canal 1 para servir como medio de alimentación con el voltaje proveniente del puerto OBD II, el Canal 2 para que pueda establecer comunicación con los flujómetros de combustible, así mismo, al tratarse de un dispositivo con un módulo GPS integrado permite su configuración para el registro de ubicación, altura y demás datos inerciales del vehículo.

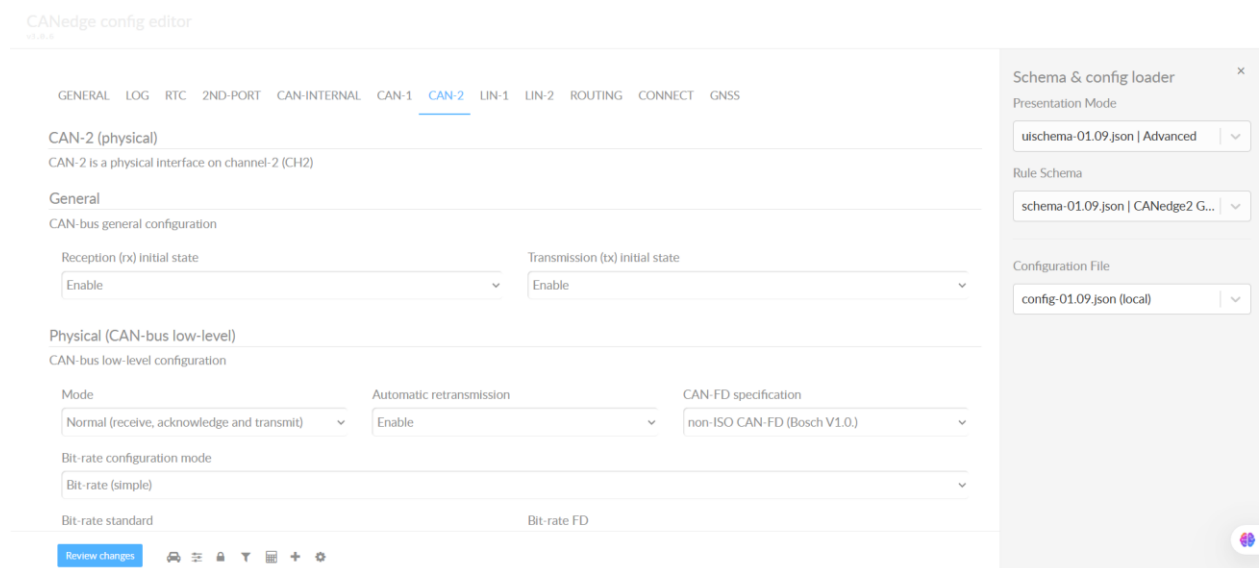


Figura 51. Interfaz de configuración de CANEdge2

En la pestaña *LOG*, se mantuvieron los parámetros de fábrica, con un tamaño máximo de archivo de registro máximo de 50MB, con el ciclado habilitado. Mientras que en la pestaña *RTC* se configuro la zona horaria en UTC -5 correspondiente a Ecuador y el ajuste fino de mantuvo en un valor de 0 segundos. En el apartado Chanel de esta pestaña se suele seleccionar el canal dos, sin embargo, este será utilizado para recibir las señales de los flujómetros, por lo tanto, hay que seleccionar el Canal 1. El resto de las configuraciones se dejó con los valores que aparecen por defecto.

El Canal 2 fue configurado con el modo Normal (permite recibir, confirmar y transmitir señales CAN) y una tasa de bits de 250K misma velocidad a la que transmiten datos los flujómetros,

siendo este el puerto de registro usado para las mediciones físicas de flujo de combustible. Mientras que en el Canal 1 se mantuvieron los parámetros por defecto y en el apartado *Transmit messages* no se agregó ningún PID debido a que CANEdge2 no transmite ni recibe información cuando el protocolo de comunicación OBD II es distinto al protocolo SAE J15765-4 CAN. En el caso del vehículo usando en la campaña experimental, funciona bajo el protocolo ISO14230-4 KWP fast.

En el apartado GNSS se seleccionó a los Satélites de navegación GPS + GLONASS y se descartan las señales no válidas. En los ángulos de alineación se mantuvo la configuración por defecto de 0 grados en todos los ejes debido a que el CANEdge2 se ubicó en el lugar indicado por el manual de usuario (Figura 52.). Finalmente se configuro el modelo de plataforma dinámica como automotor.

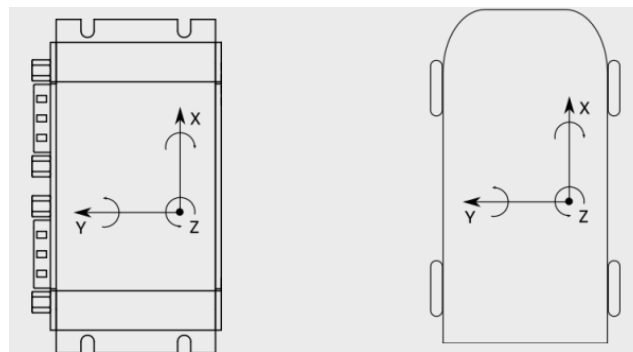
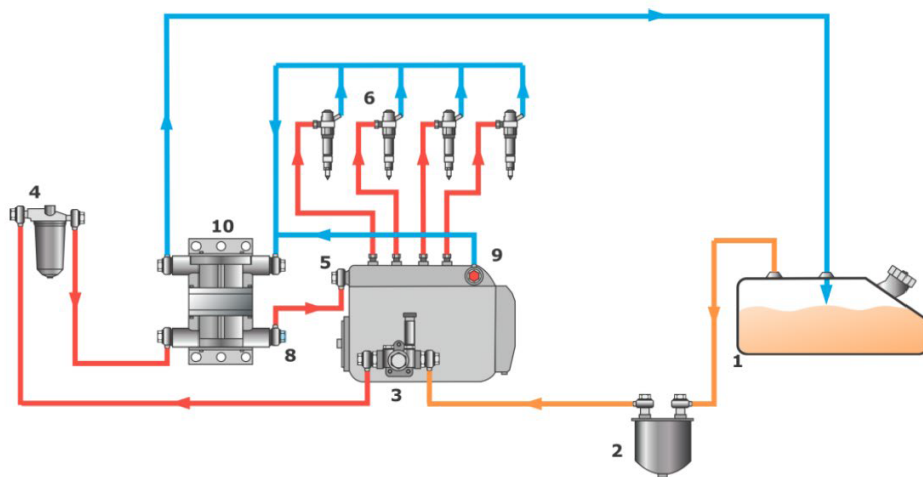


Figura 52. Sistema de coordenadas IMU vistas desde el superior
(CSS Electronics, 2026)

Las pestañas LIN-1, LIN-2, ROUTING, CONNECT; no fueron utilizadas en el presente estudio.

3.5.3 Conexión flujómetros

Los flujómetros se instalaron en el vehículo según el esquema “Diferencial-De Presión” Mostrado en el manual de funcionamiento de Technoton (Figura 53.). Para este estudio se usaron dos flujómetros conectados en paralelo en la línea de suministro y retorno de combustible, además, se incluyó, filtros de combustible que permiten alargar la vida útil del equipo de medición evitando el ingreso de partículas que no fueron retenidas por los filtros propios del vehículo. El primer flujómetro se instaló después de la bomba de combustible de baja presión, y el segundo se instaló entre el riel, y la entrada del retorno al tanque.



1 – el tanque de combustible; 2 – el filtro de depuración basta; 3 – la bomba de presión baja; 4 – el filtro de depuración fina; 5 – la bomba de presión alta; 6 – los inyectores; 7 – el filtro fino adicional; 8 – la valvula de retorno; 9 – la valvula de paso; 10 – el DFM.

Figura 53. Esquema “Diferencial – De presión”
(TECHNOTON, 2026)

Los dos flujómetros se instalaron a la salida de la bomba eléctrica, ubicada debajo del asiento de los pasajeros tal y como se muestra en la Figura 54, así mismo, fueron fijadas a la carrocería con ayuda de amarras plásticas, esta instalación permitió el acceso a las líneas de combustible sin la necesidad de realizar configuración invasiva que afecte el funcionamiento del vehículo.

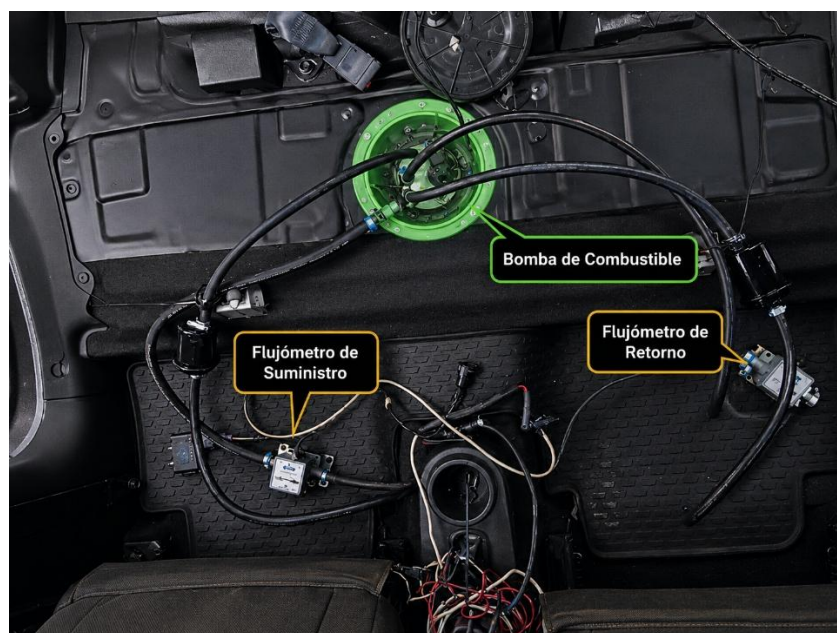


Figura 54. Instalación Flujómetros

3.5.4 Conexión equipo PEMS

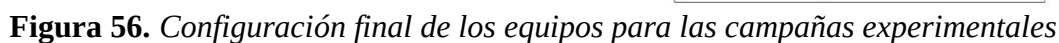
El equipo PEMS se instaló en la cajuela del vehículo tal como se muestra en la Figura 55, asegurado de tal manera que los movimientos propios de la conducción no afecten su integridad física ni la toma de datos. Además, el equipo cuenta con una sonda que fue instalada en el tubo de escape del vehículo, con ayuda de una abrazadera metálica para evitar que se desconecte durante la prueba, el equipo fue alimentado con la estación de carga portátil, además de contar con dos baterías de respaldo para evitar cualquier contratiempo causado por el suministro de energía.



Figura 55. *Instalación del Equipo PEMS*

3.5.5 Configuración final de los equipos de medición

La Figura 56. muestra la disposición final de los equipos tanto para las pruebas de ruta realizadas en Riobamba como las pruebas realizadas en las otras cuatro ciudades de ruta, además muestra las conexiones necesarias para la adquisición correcta de los datos, tomando en cuenta las configuraciones mencionadas anteriormente.



El levantamiento de datos se llevó a cabo entre el mes de marzo y abril del 2026 en las diferentes ciudades sujetas a estudio. En primer lugar, se realizó el levantamiento de datos en la ciudad de Riobamba en donde se pudo contar con un PEMS de la marca 3DATX para registrar datos de concentración volumétrica de CO₂ a lo largo de toda la ruta, en conjunto con los dispositivos descritos en el apartado 3.3. y finalmente se realizó el levantamiento de datos en las ciudades de Esmeraldas, Santo Domingo, Ibarra y Tulcán mediante el uso de un equipo ELM327 y un CANEdge2 en conjunto con dos flujómetros de combustible

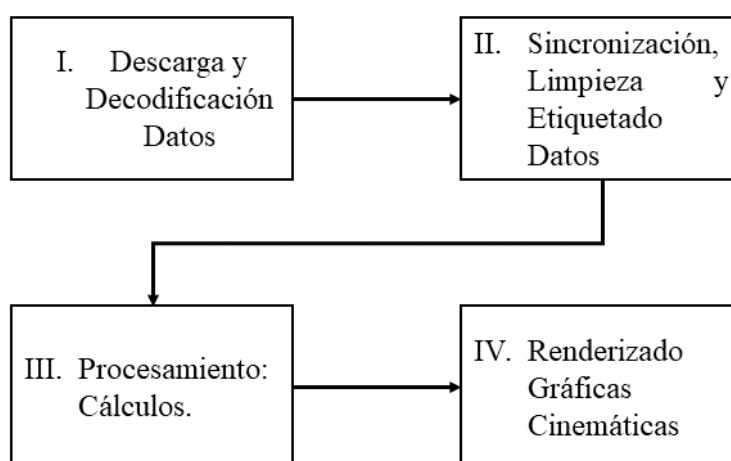
81

Tabla 12. *Características de las rutas seleccionadas para las campañas experimentales*

Ciudad	Altura (m s.n.m)	Velocidad promedio (km/h)	Distancia de la ruta (km)
Esmeraldas	15	41.13	40.12
Santo Domingo	625	27.77	28.75
Ibarra	2225	26.99	34.91
Riobamba	2750	27.96	33.79
Tulcán	2950	17.83	23.93

3.7 Procesamiento de Datos

El procesamiento de datos consta de cuatro procesos principales, que se muestran en la Figura 57, La descarga y decodificación de datos para su posterior sincronización, limpieza y etiquetado. La tercera fase, procesamiento de datos, la cual contempla el cálculo para obtener factores de consumo, emisión y la caracterización del vehículo mediante VSP. Finalmente, un postprocesamiento de datos, que tiene como objetivo plasmar en graficas los resultados obtenidos en las otras fases.

**Figura 57.** *Flujograma de procesamiento de datos*

3.7.1 Pre-procesamiento de datos

La Figura 58 describe el flujo inicial de adquisición y tratamiento de datos. El proceso comienza con la descarga de registros desde dos fuentes principales: el CANedge2 (datos de flujómetros y red CAN J1939) y el dispositivo ELM327 (datos OBDII). Se detalla la etapa de decodificación mediante archivos DBCs y la posterior sincronización en el entorno R. Este flujo incluye una metodología de validación visual y estadística para corregir el error

sistemático entre los flujómetros y los datos del OBD, asegurando que ambas series temporales estén perfectamente alineadas antes del análisis cinemático.

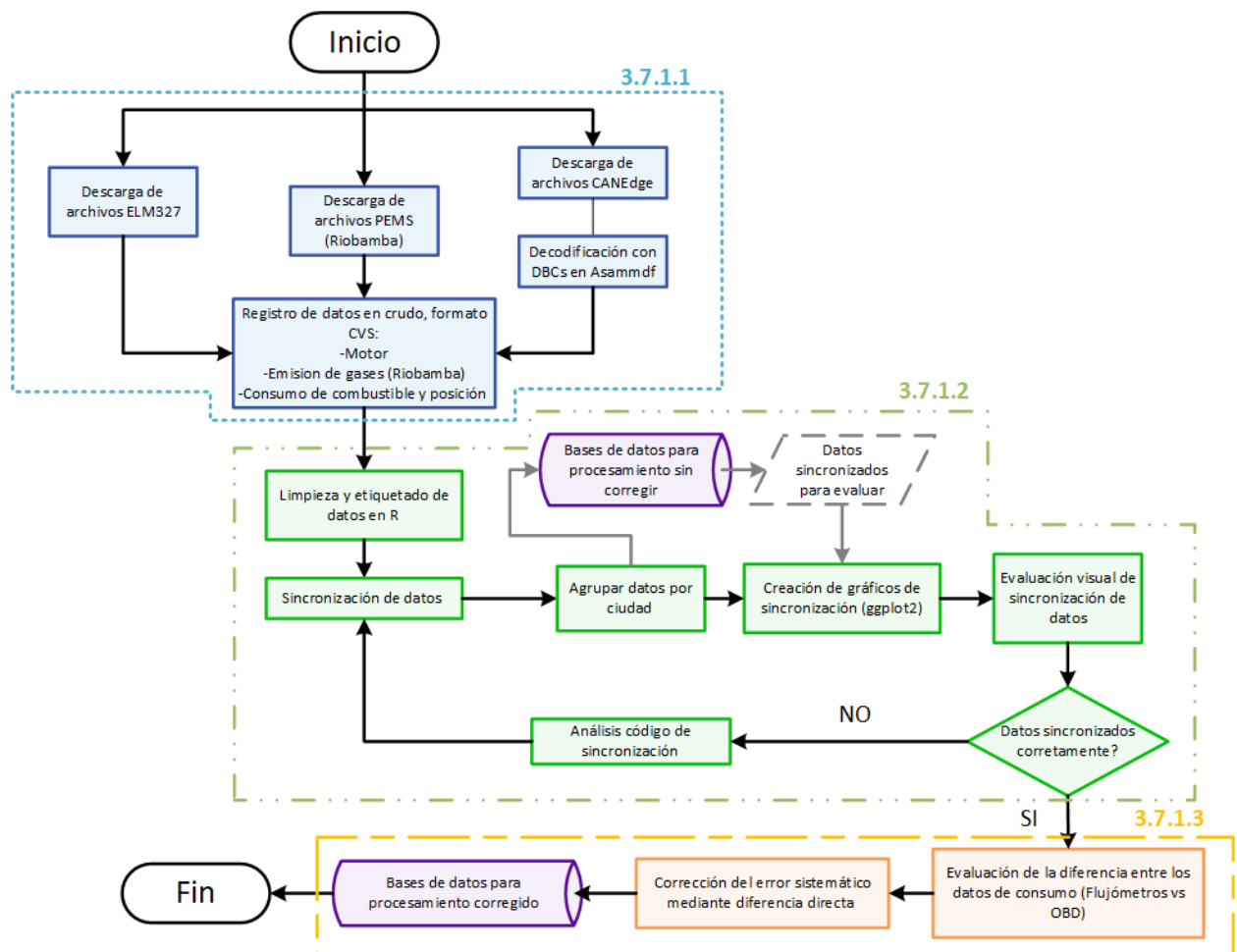


Figura 58. Diagrama de flujo Pre-procesamiento de datos

3.7.1.1 Descarga y Decodificación de datos

3.7.1.1.1 CAN Edge y ELM327

En primer lugar, se descargaron los datos de funcionamiento del motor almacenados en el celular por la aplicación Torque Pro en conjunto con el Registrador ELM327, un archivo formato CVS, que son automáticamente decodificados por la aplicación Android. Por otro lado, el registrador CANEdge2 que se encarga de entregar datos de la cinemática del vehículo y de la medición física de flujo de combustible, genera un archivo MF4, que debe ser decodificada mediante el uso de una base de datos CAN (DBC).

Para la decodificación de las señales se usó un DBC creado por (Arias Cuasapaz, 2025) que permite procesar los datos medidos por los flujómetros DFM ACAN 100, dicho decodificador está basado en el protocolo J1939 propio de los medidores de flujo.

Este DBC junto con otro proporcionado por CSS Electronics que se encarga de decodificar datos cinemáticos, fueron cargados en el software Asammdf junto con el archivo MF4 extraído del CANEdge2. El interfaz de la aplicación permite cargar los DBC mediante la pestaña *Bus Logging*, lo que convierte los datos hexadecimales del archivo en valores físicos correspondientes a las variables registradas, que pueden ser exportadas en formato CVS.

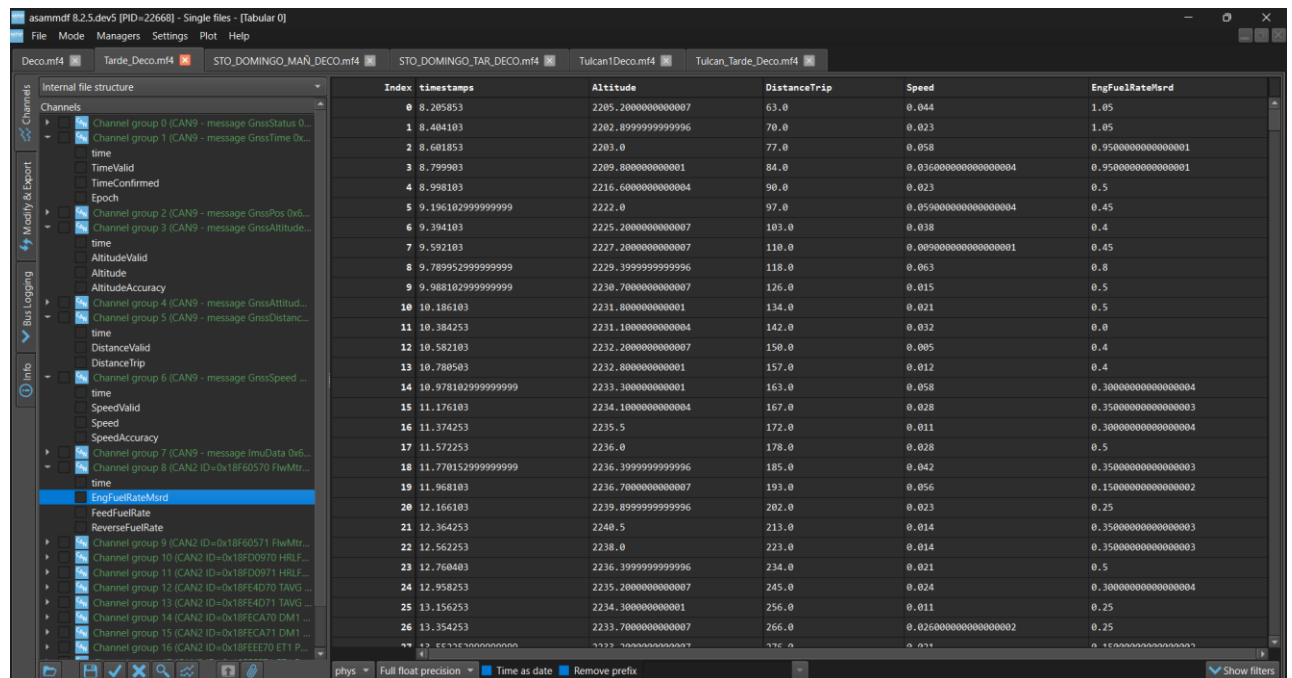


Figura 59. Interfaz para decodificación Asammdf.

3.7.1.1.2 PEMS

El equipo PEMS de la marca 3D Datx registra los datos de emisiones en concentración volumétrica a través de la conexión *wifi* con un computador y mediante la aplicación FLEXstudio provista por el fabricante del equipo, interfaz mostrado en la Figura 60, que muestra tanto el estado de conexión como el estado de la toma de datos y las curvas de valores que estos registran.

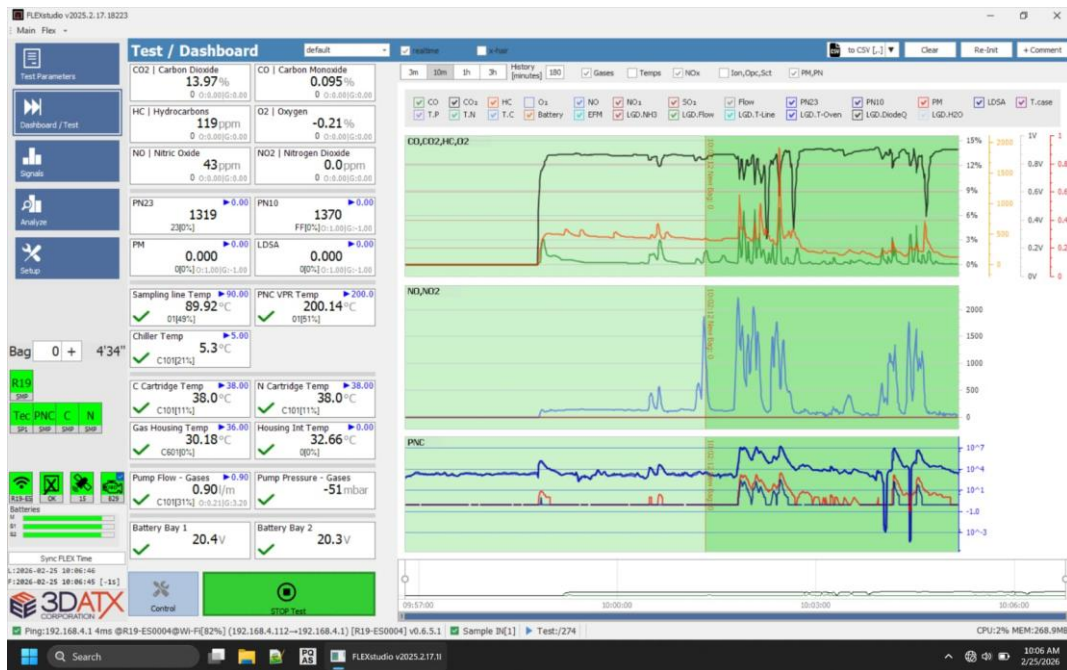


Figura 60. Interfaz para registro de datos FLEXstudio

Con los datos registrados por el interfaz se procedió a usar un modelo matemático que permite llevar los registros de emisión de gases de concentración volumétrica a flujo de gases en gramos por segundos, a partir de datos de funcionamiento de motor. Datos necesarios para su posterior sincronización, en conjunto con los otros dispositivos de medición usados.

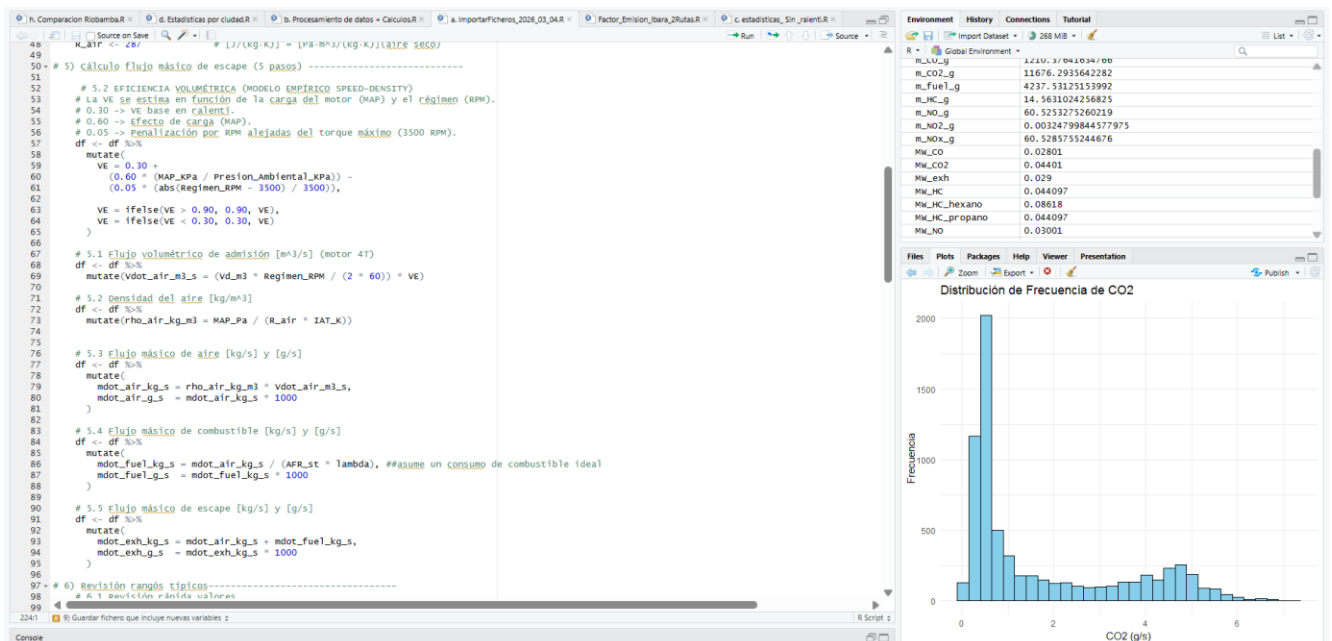


Figura 61. Extracto de código: modelo matemático para transformación a flujo de gases

3.7.1.2 Limpieza, etiquetado y sincronización de datos

Con los datos de posición, funcionamiento de motor, y flujo de combustible guardados en archivos CVS se realizó una limpieza, etiquetado y sincronización usando R y su interfaz gráfica Rstudio, El orden se lo debe determinar según el tipo de estudio y método usado. Sin embargo, para el etiquetado y limpieza de datos requiere una intervención manual, esto para los registradores, debido a que CANEdge2 como ELM327 registran valores redundantes o que no son relevantes para la investigación de manera automática.

La sincronización de datos partió de las columnas de registro de tiempos (Timestamps) debido a que tanto el CANEdge2 como el ELM327 se sincronizan automáticamente con la misma referencia de tiempo proveniente de los relojes atómicos de los satélites GNSS. Por ello, se buscó sincronizar los datos buscando la menor variación posible entre los valores de fecha y hora. Sin embargo, se debe validar una correcta sincronización de datos.

La sincronización de datos debe validarse y para ello se seleccionó tres variables que tengan dependencia directa: El consumo de combustible instantáneo en L/h, grabado por los dos registradores y el Régimen de giro del motor, grabado solamente por el ELM327. Dependencia que se radica en la necesidad de la inyección de mayor cantidad de combustible para alcanzar un régimen de giro más alto.

Para dicha evaluación se usó el método de correlación cruzada que se encarga de evaluar la similitud de las señales en función del desplazamiento de una sobre la otra, lo que permite medir cuanto tiempo de desfase existe entre las dos señales. Sin embargo, dicha función es sensible al ruido presente en las señales, por lo que fue necesario aplicar un filtro previo a la señal con ayuda de la función *rollmean*.

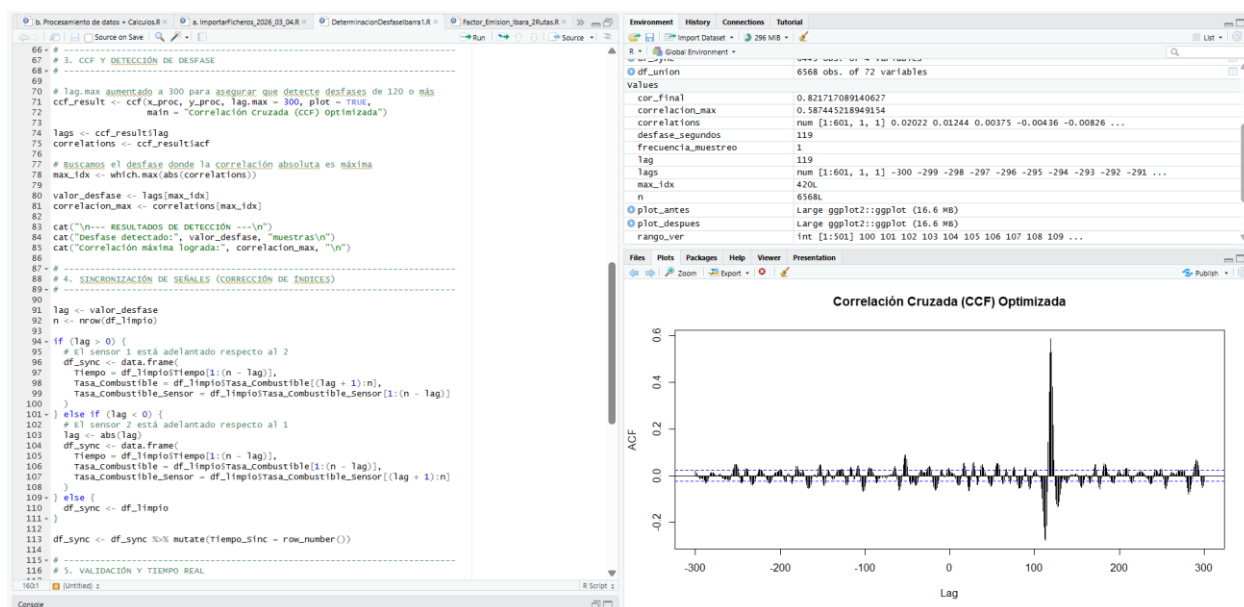


Figura 62. Extracto de código: método de correlación Cruzada

El gráfico de sincronización muestra las señales de consumo registradas por ambos equipos, además del régimen de giro, que, a pesar de no tener la misma forma exacta, son similares y se encuentran sincronizadas correctamente. La aprobación visual de la sincronización evidenciada en la Figura 63, permite continuar con el procesamiento y post procesamiento de datos

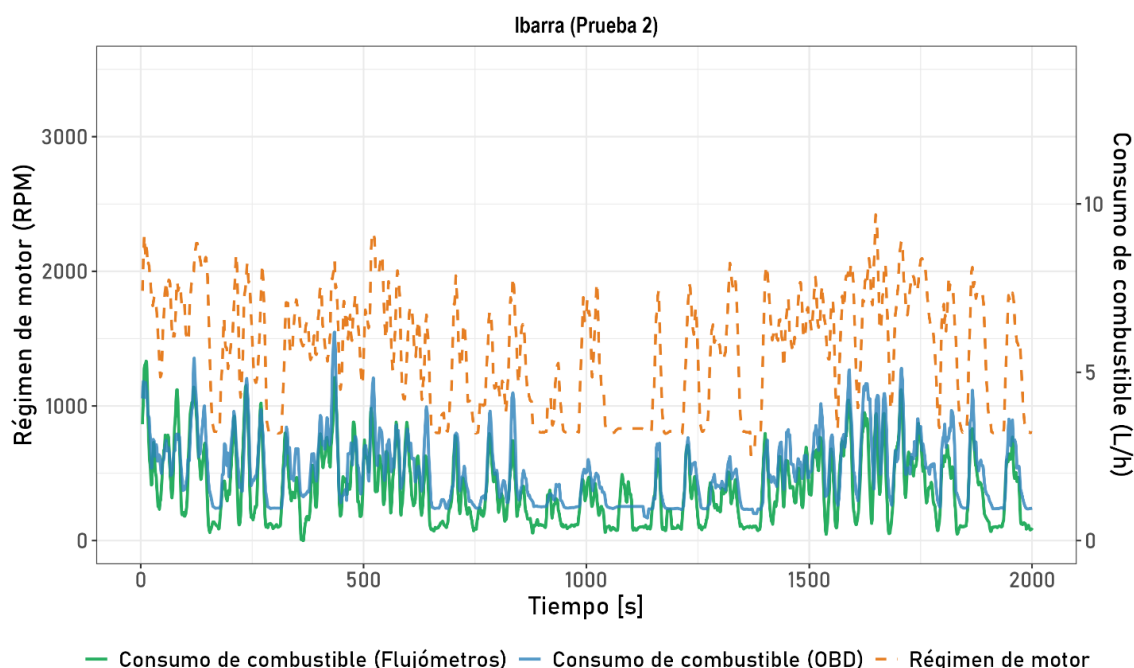


Figura 63. Variación instantánea de consumo de combustible y régimen de motor

3.7.1.3 Corrección de error sistémico en el flujo de combustible (OBD vs Sensor)

La determinación del flujo de combustible registrado por el sensor se basa en la diferencia volumétrica entre el flujo de alimentación y el de retorno del motor expresado en litros por hora (l/h). Sin embargo, fue necesario la aplicación de un factor de corrección para el flujo de combustible diferencial registrados por los flujómetros mediante la Ecuación 6, debido a la existencia de un error sistemático constante en el registro del consumo de combustible con respecto al consumo registrado directamente del sistema OBD considerado como el real.

$$\dot{m}_{\text{combustible corregido}} = \text{factor de corrección2} * (\dot{m}_{\text{combustible}} + \text{factor de corrección1}) \quad (6)$$

El factor de corrección 1 se encarga de ajustar la altitud de la señal, mientras que el factor de corrección 2 es el encargado de ajustar la amplitud de la señal. Los valores para cada uno de los factores fueron evaluados de manera visual, mediante la comparación de los consumos acumulados para cada ciudad además de la aplicación de una correlación lineal que permitió comparar los consumos de combustible segundo a segundo. Los factores aplicados fueron los mismos para todas las ciudades, con la finalidad de no alterar la diferencia de consumo de combustible producto del incremento de la altitud.

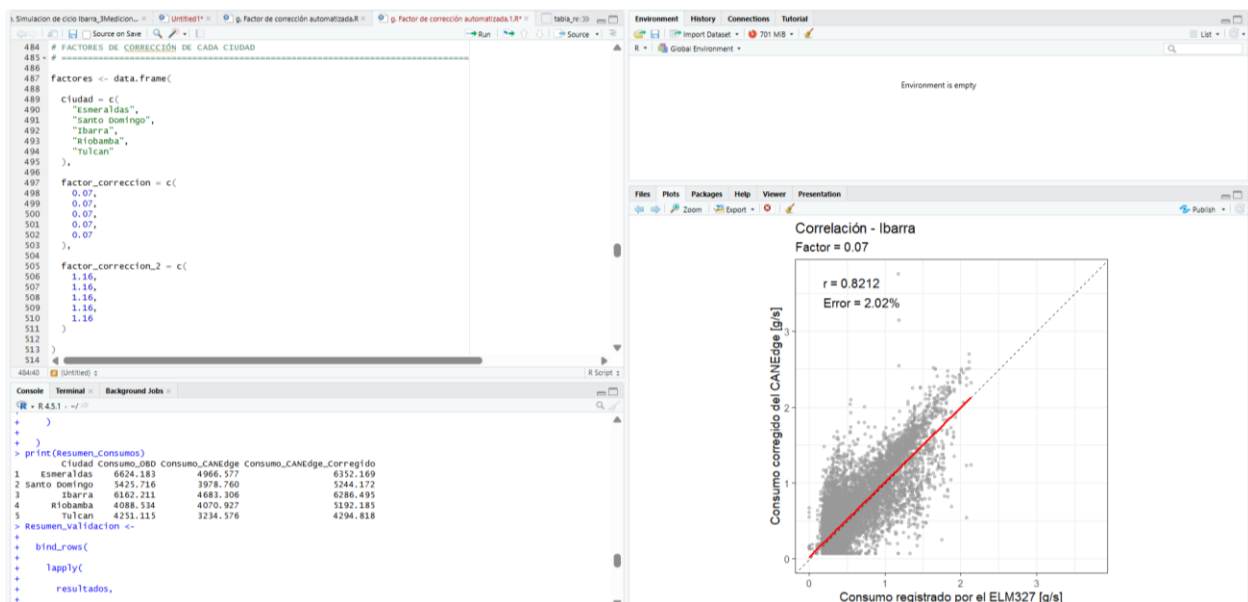


Figura 64. Extracto de código, de aplicación del factor de corrección al flujo de combustible registrado por flujómetros

3.7.2 Procesamiento de datos

El procesamiento de datos detallado en la Figura 65 sistematiza el cálculo de parámetros críticos para el estudio. Se observa una secuencia lógica que transita desde la caracterización

dinámica del vehículo (modos de operación) hasta la evaluación termodinámica del motor. Este flujo asegura la coherencia de los resultados finales mediante un ciclo de retroalimentación en la estimación del VSP, permitiendo la cuantificación de las emisiones instantáneas y los consumos promedio.

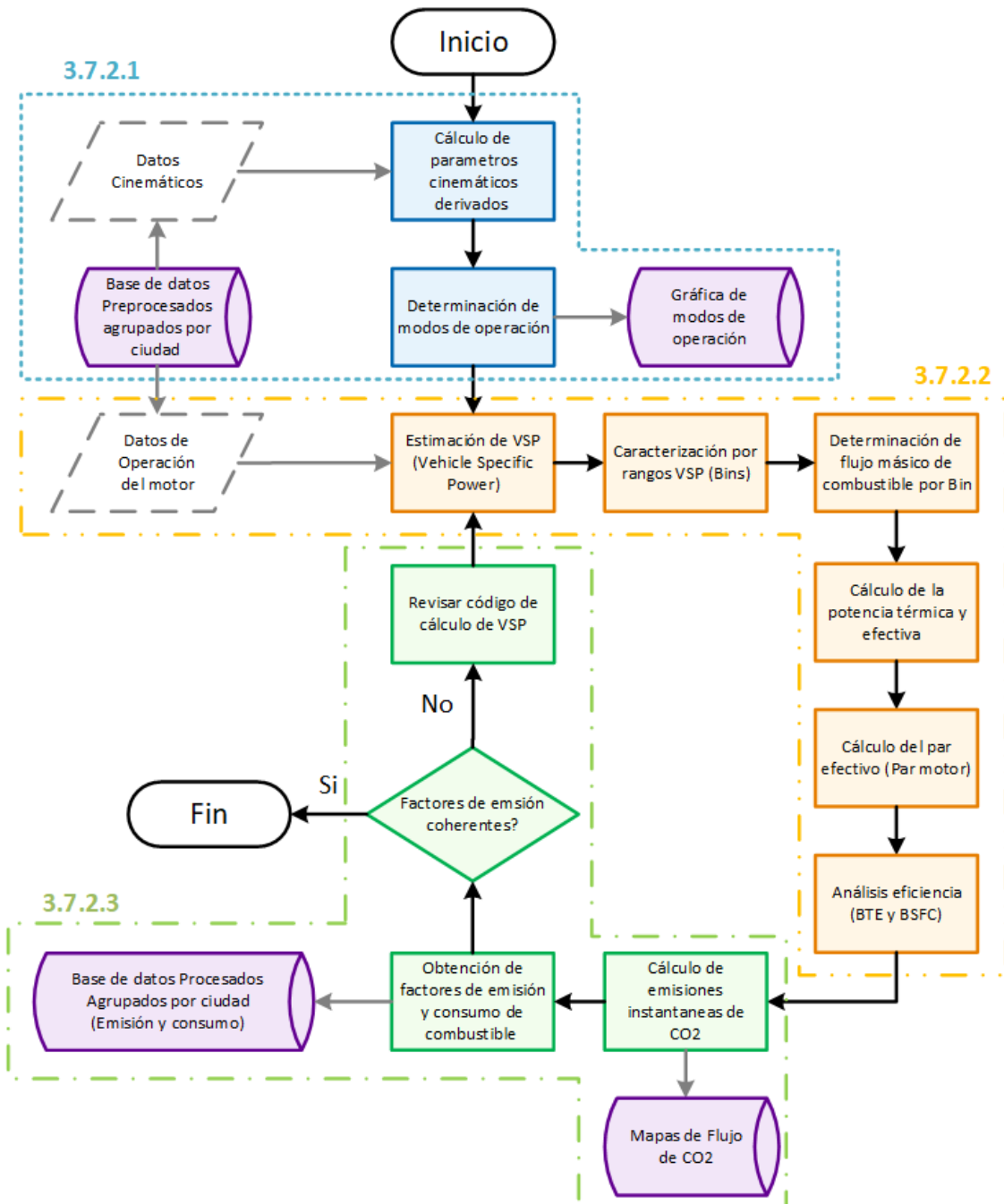


Figura 65. Diagrama de flujo procesamiento de datos

3.7.2.1 Análisis de modos de marcha por ciudad

En esta etapa se construyó un diagrama de barras para representar la distribución porcentual de los modos de marcha registrados en cada una de las ciudades de prueba. Inicialmente, se seleccionaron únicamente las rutas correspondientes a las ciudades evaluadas y se eliminaron

los registros que no disponían de una clasificación del modo de marcha. Posteriormente, los datos se agruparon por ciudad y categoría de conducción para determinar la frecuencia de ocurrencia de cada condición operativa.

A continuación, las frecuencias obtenidas se transformaron en porcentajes con respecto al total de registros de cada ciudad. Como medida de control, se aplicó un ajuste sobre el último porcentaje de cada grupo para asegurar que la suma de las categorías fuera exactamente del 100 %, evitando pequeñas diferencias ocasionadas por el redondeo decimal.

Posteriormente, se definió de forma manual el orden de los modos de marcha para garantizar que el estado de ralentí constituyera la base de las barras apiladas y mantener una representación uniforme entre todas las ciudades. Asimismo, se asignó una paleta de colores con diferentes tonalidades para identificar cada ciudad y distinguir visualmente las categorías de conducción (Figura 66).

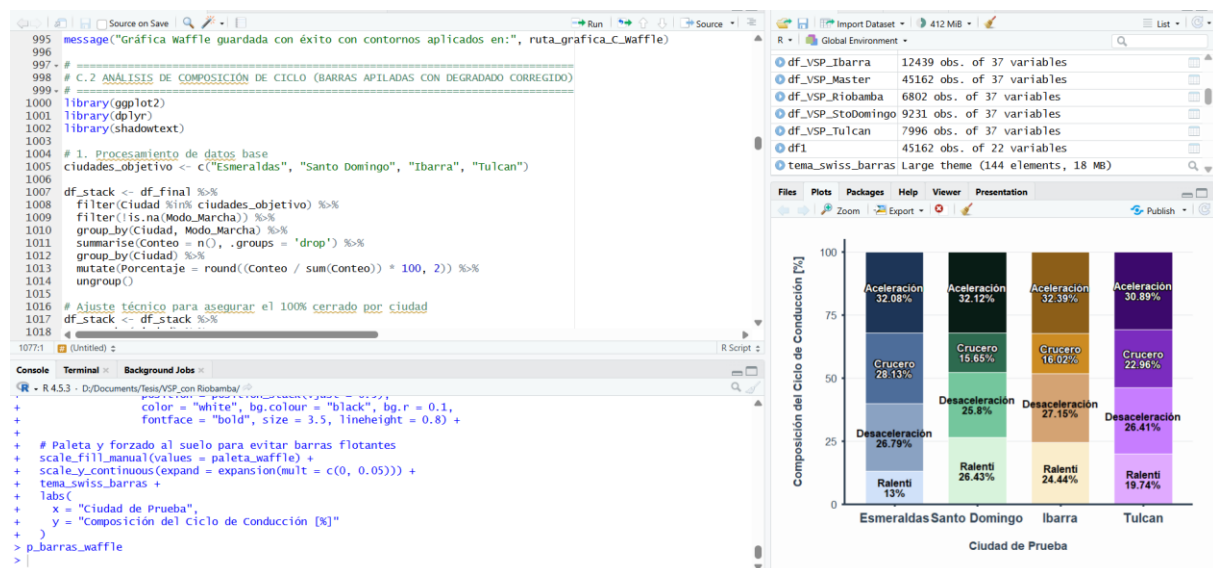


Figura 66. Fragmento del código para la construcción del diagrama de barras.

3.7.2.2 Caracterización del funcionamiento del vehículo mediante VSP

El cálculo de VSP se realizó a partir de los datos obtenidos durante las campañas experimentales, considerando principalmente la velocidad, altitud, distancia recorrida y parámetros físicos del vehículo. A partir de estas variables se calcularon la aceleración, la pendiente y la densidad del aire para cada registro. Con estos valores se determinaron las contribuciones de las resistencias a la rodadura, pendiente, aceleración y resistencia aerodinámica, cuya suma permitió obtener la potencia de tracción. Finalmente, la potencia de

tracción se normalizó respecto a la masa total del vehículo para obtener el VSP, expresado en kW/t. El procedimiento empleado se presenta en la Figura 67.

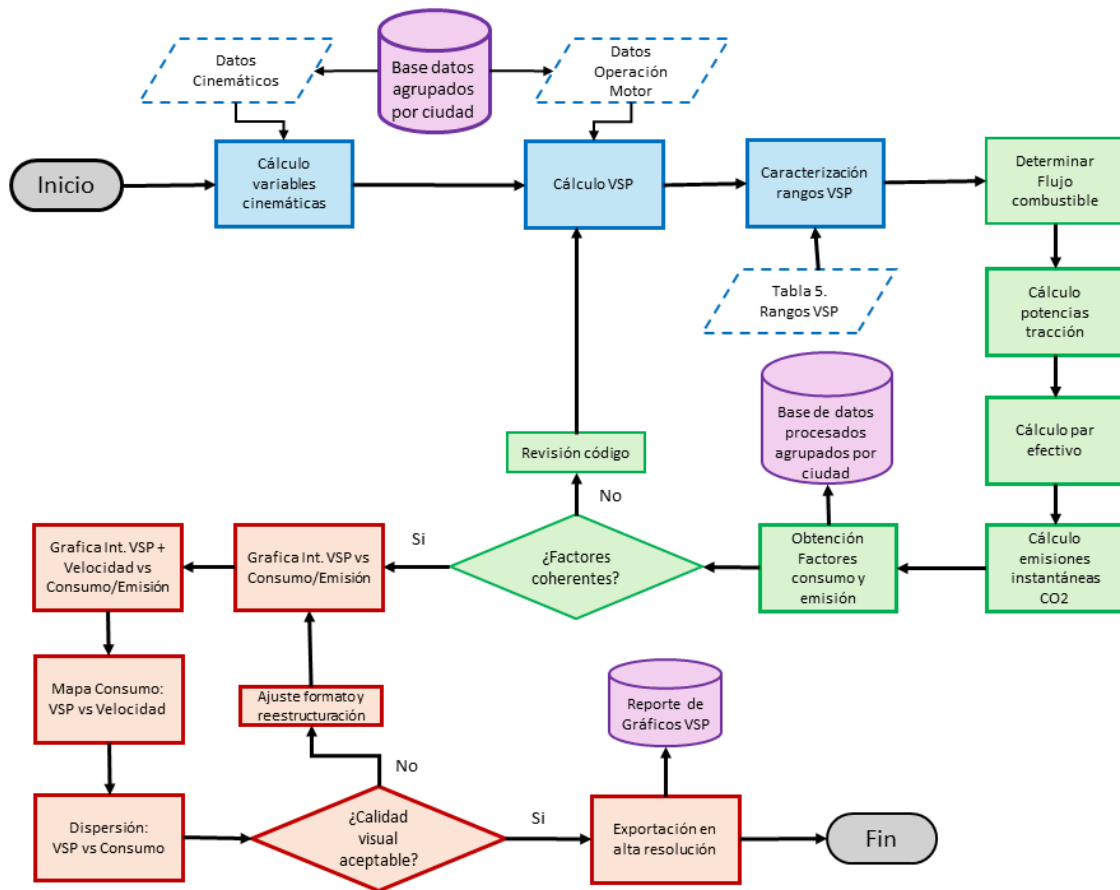


Figura 67. Procedimiento para el cálculo y clasificación del VSP.

Posteriormente, los valores obtenidos de VSP se clasificaron en 13 intervalos de VSP, de acuerdo con los rangos establecidos en la tabla 5. Esta clasificación se combinó con los rangos de velocidad para obtener los Bins, identificados mediante valores como 101–113 y 201–213. De esta forma, los registros quedaron agrupados según el intervalo de VSP y la condición de velocidad correspondiente, permitiendo su posterior análisis entre las ciudades estudiadas.

3.7.2.3 Cálculo de las variables de operación del motor y factores de emisión

En esta etapa del procesamiento de datos, se usaron los registros ya sincronizados, para estimar las variables de operación de motor derivadas. Así se calculó el par motor, consumo de combustible en gramos por segundo, la eficiencia térmica al freno (BTE) y el consumo Especifico al freno (BSFC).

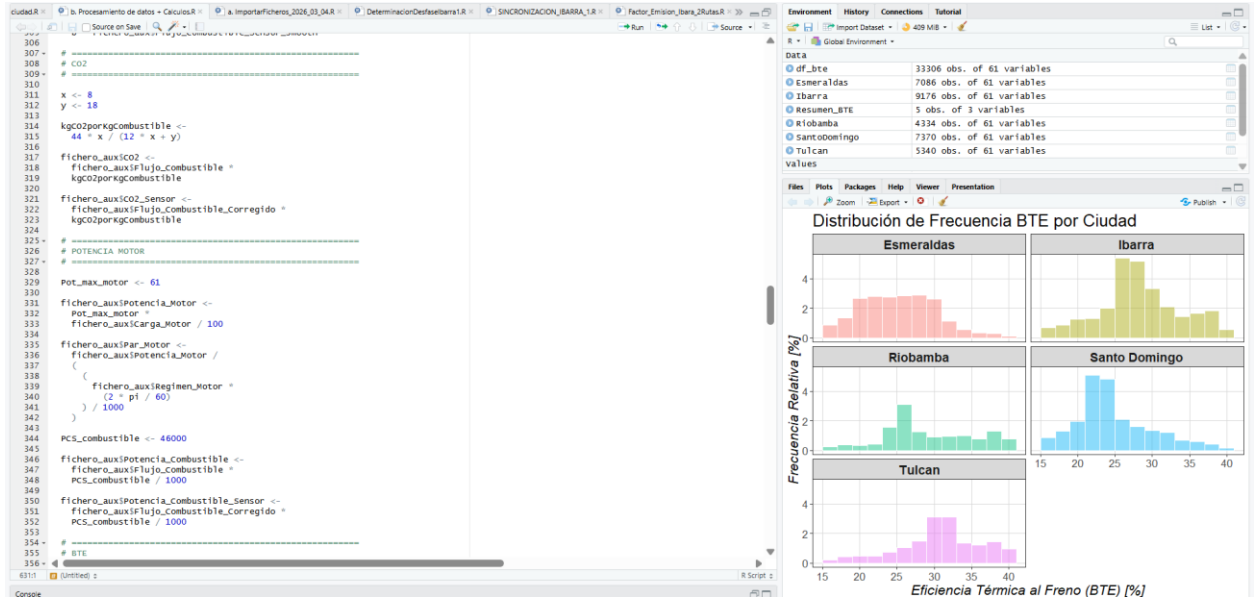


Figura 68. Extracto de código de cálculo de factores de emisión y consumo

El flujo de combustible es registrado tanto por el lector OBD como por el sensor se expresa en L/h. En la Ecuación 7, se detalla el cálculo del consumo empleando la densidad de la gasolina Extra utilizada durante la campaña experimental, la cual corresponde a 720 kg/m³. El resultado final de este procedimiento se expresa en gramos por segundo (g/s).

$$\dot{m}_{combustible} = \frac{\text{Flujo diferencial de combustible} * \rho_{gasolina}}{3600} \quad (7)$$

Según (Rosero, Rosero, & Segovia, 2024), el motor de encendido provocado opera bajo una mezcla estequiométrica, permitiendo que la recolección de datos se realice de manera cuantitativa. Para el cálculo de la tasa de emisiones de CO₂, se emplea la Ecuación 8. En este modelo, se asumen las propiedades del isoootano como referencia para la gasolina, donde el número de moléculas de hidrógeno (H) es 18 y el de carbono (C) es 8. Asimismo, la tasa de consumo instantáneo de combustible ($FC_{i,t}$), expresada en gramos por segundo (g/s), establece la base de cálculo para determinar la tasa de emisión de CO₂.

$$ER_{CO_2i} = FC_i * \frac{44}{12 + \left(\frac{H}{C}\right)} \quad (8)$$

Para calcular la eficiencia térmica al freno se relaciona la potencia térmica y la potencia efectiva como se muestra en la ecuación 9, mientras que el consumo específico al freno se lo calculo en base a los datos de consumo instantáneo de combustible en gramos y la potencia efectiva del motor en kWh de la manera que se muestra en la ecuación 10

$$BTE = \frac{P_e}{P_{th}} \quad (9)$$

$$BSFC = \frac{\text{Consumo instantaneo de combustible} * 3600}{P_e} \quad (10)$$

Para la determinación del factor de emisión, se procede a dividir la masa total de CO₂ obtenida entre la distancia recorrida durante las pruebas experimentales, tal como se describe en la Ecuación 11. De igual manera, se calcula dicho factor con respecto al trabajo realizado, relacionando la masa de emisiones con la potencia efectiva total integrada en el tiempo, según se detalla en la Ecuación 12.

$$FE_{motor} = \frac{\text{Masa total de CO}_2 * 3600}{\text{Distancia recorrida}} \quad (11)$$

$$FE_{motor} = \frac{\text{Masa total de CO}_2 * 3600}{\text{Potencia efectiva total}} \quad (12)$$

Finalmente, mediante las Ecuaciones 13 y 14, se determina el consumo de combustible en función de la distancia recorrida, expresado en gramos por kilómetro (g/km) y litros por cada 100 kilómetros (L/100 km), respectivamente.

$$\text{Consumo}_{km} = \frac{\text{Masa total del combustible}}{\text{Distancia recorrida}} \quad (13)$$

$$\text{Consumo}_{100 km} = \frac{\text{Volúmen total del combustible}}{\text{Distancia recorrida}} * 100 \quad (14)$$

3.7.3 Post procesamiento

En la Figura 69 se describe el flujo de trabajo correspondiente a la fase de visualización de resultados. El diagrama ilustra el proceso secuencial para el diseño de las gráficas, integrando el filtrado de valores atípicos, el análisis de distribución de VSP por ciudades y la exportación de resultados. Esta etapa es importante para la interpretación de las tendencias cinemáticas y de consumo obtenidas en la investigación.

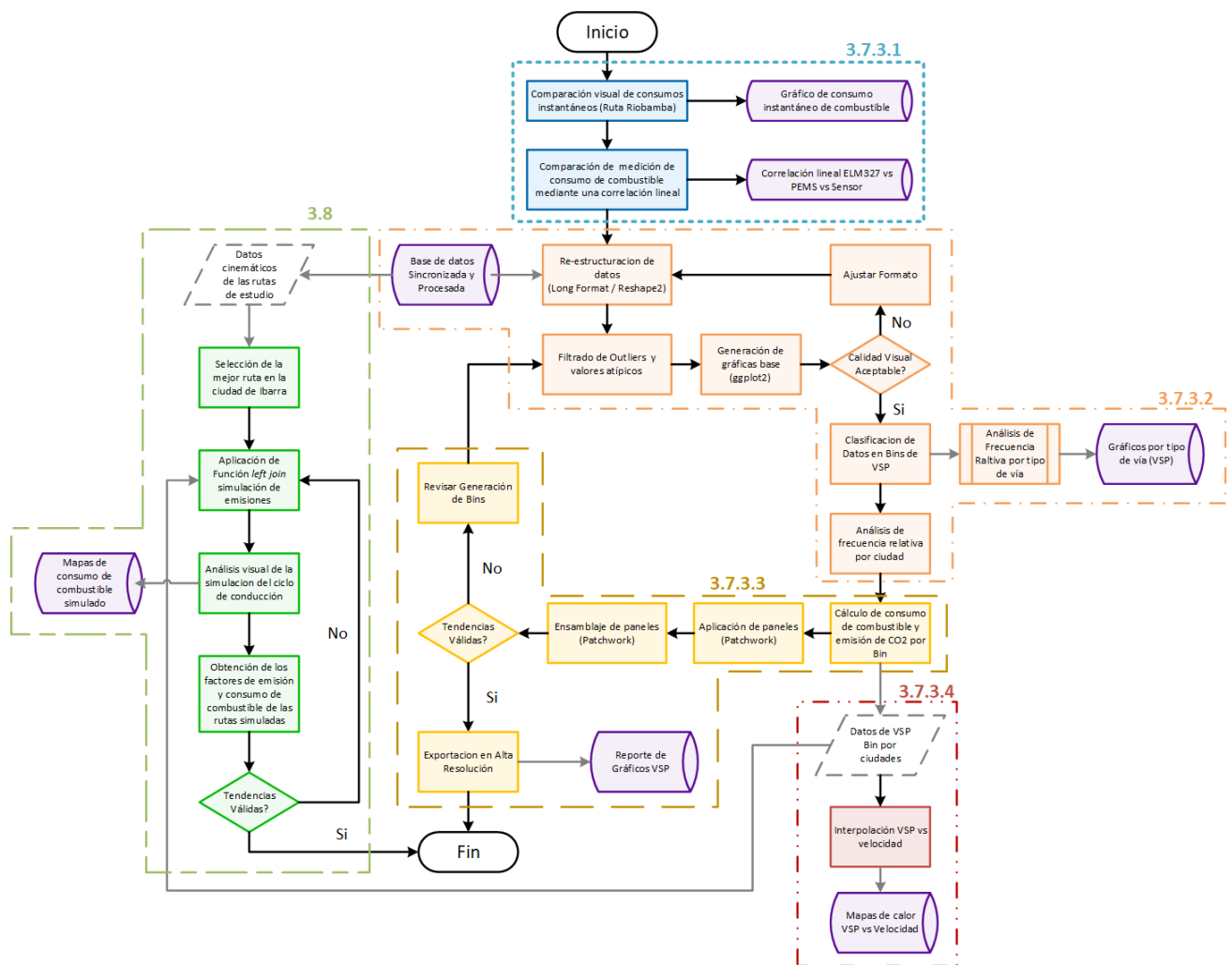


Figura 69. Diagrama de flujo post procesamiento de datos

3.7.3.1 Análisis de equipos de medición

Las mediciones tomadas en simultaneo por los 3 registradores en la ciudad de Riobamba: ELM327, CANEdge2, y PEMS. Sirvieron como base para comparar las mediciones de consumo de combustible y emisiones de CO₂ a lo largo de la ruta RDE. En primer lugar, se comparó de manera visual las curvas de tendencia de los consumos instantáneos registrados. Seguido de esto se evaluó una correlación de Pearson que permitió el cálculo de un factor de correlación entre cada uno de los equipos. Finalmente, se evaluó los factores de consumo de combustible y emisiones de CO₂ de cada uno de los equipos para el total de la ruta.

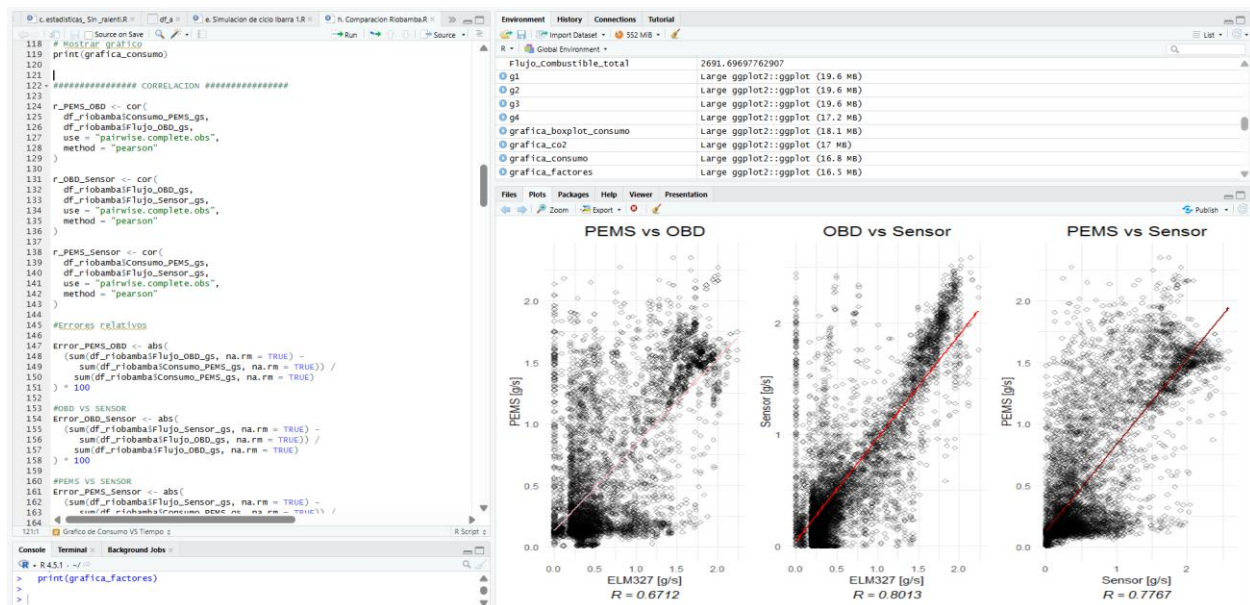


Figura 70. Extracto de código para el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson

3.7.3.2 Construcción de gráficas comparativas por Bines de VSP

Para elaborar el análisis comparativo por intervalos de VSP, los registros se agruparon por ciudad y por Bin de VSP. A partir de esta clasificación, se calcularon los valores promedio de la tasa de emisiones de CO₂ y del consumo instantáneo de combustible para cada intervalo, obteniendo un conjunto de datos representativo del comportamiento del vehículo en los diferentes niveles de demanda energética.

Posteriormente, se estableció un orden fijo para las ciudades con el propósito de mantener una representación uniforme en todas las figuras y facilitar la comparación entre las zonas de estudio. Finalmente, los promedios calculados se representaron mediante gráficos de barras agrupadas, donde las emisiones de CO₂ y el consumo de combustible se presentaron en paneles independientes con una misma escala de identificación para cada ciudad, permitiendo comparar el comportamiento de ambas variables en los trece intervalos de VSP definidos en la metodología (Figura 71.).

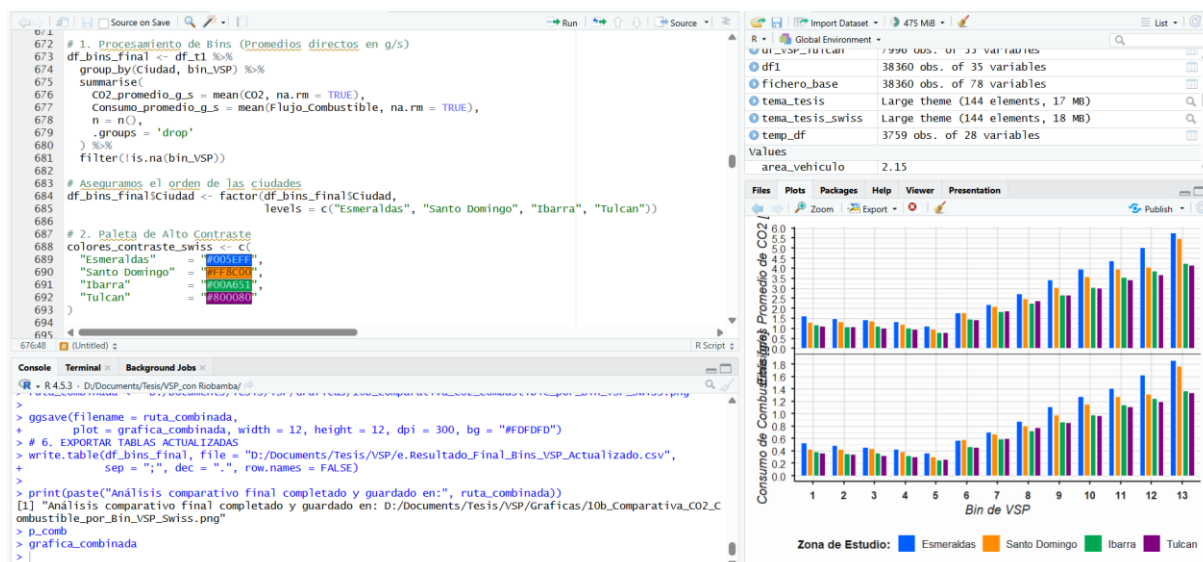


Figura 71. Fragmento de código para la construcción del diagrama de barras comparativo de emisiones y consumo de combustible por bins VSP.

3.7.3.3 Construcción de perfiles de consumo de combustible y emisiones de CO₂

Para la construcción de los perfiles continuos de emisiones de CO₂ y consumo de combustible mediante el enfoque VSP, inicialmente se agruparon los registros por ciudad y por modo operativo, identificados a partir de la combinación del Bin de VSP con el intervalo de velocidad correspondiente. A continuación, se calculó el valor promedio de las emisiones de CO₂ y del consumo instantáneo de combustible para cada intervalo, obteniendo un único valor representativo de cada modo operativo. Luego, se eliminaron los registros sin clasificación y se conservaron únicamente los Bins inferiores a 300. Esta decisión se tomó, ya que, los modos asociados a velocidades superiores a 80 km/h presentaban una cantidad reducida de observaciones en algunas ciudades, lo que producía curvas con alta variabilidad y menor representatividad.

Con la base de datos procesada, los modos operativos se ordenaron siguiendo la secuencia geográfica empleada durante toda la investigación, con el fin de mantener un criterio uniforme para la comparación entre ciudades. Después, se generaron los perfiles continuos de emisiones de CO₂ y consumo de combustible, asignando una simbología específica para cada ciudad con el propósito de facilitar su identificación visual. Finalmente, ambas representaciones se integraron en una sola figura y se exportaron tanto la gráfica en formato PNG como la tabla de valores promedio utilizada en su construcción, con fines de respaldo y verificación de los resultados (Figura 72.).

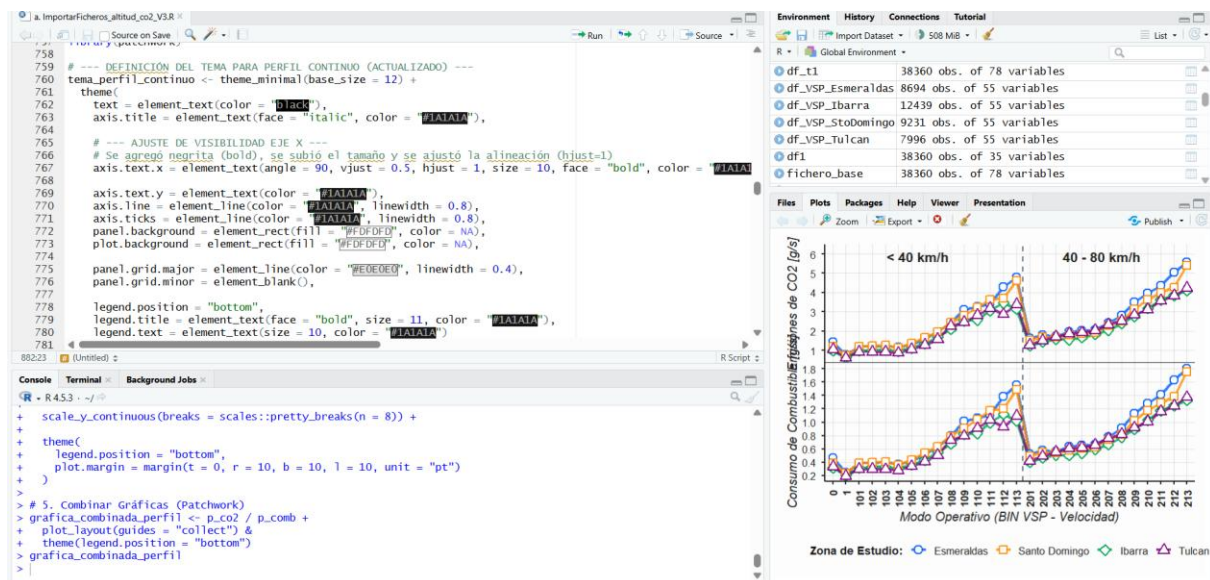


Figura 72. Fragmento del código para la generación de los perfiles de emisiones y tasa de combustible

3.7.3.4 Elaboración de mapas de calor en el dominio Velocidad- VSP

Para la elaboración de los mapas de calor de emisiones de CO₂, inicialmente se cargó la base de datos consolidada del vehículo y se seleccionaron únicamente las variables necesarias para el análisis: ciudad, ensayo, velocidad del vehículo, VSP y tasa instantánea de emisiones de CO₂. Posteriormente, se eliminaron los registros con información incompleta o valores de velocidad no válidos, garantizando un conjunto de datos consistente para el procesamiento posterior.

A continuación, se generó una malla bidimensional mediante interpolación lineal, utilizando como variables independientes la velocidad y el VSP, mientras que la tasa de emisiones de CO₂ se empleó como variable de interpolación. Este procedimiento permitió transformar los registros puntuales obtenidos durante los recorridos en una superficie continua, facilitando la representación espacial de las emisiones sobre el dominio velocidad–VSP.

Como etapa preliminar, la metodología fue verificada utilizando los datos de la ciudad de Ibarra para comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo de interpolación y la configuración de la escala gráfica. Una vez validado el procedimiento, el algoritmo se automatizó para procesar las cuatro ciudades de estudio de forma independiente. Durante este proceso se limitaron los valores extremos de emisiones al rango definido para la escala de representación y se evitó extrapolar información fuera del dominio realmente recorrido por el vehículo, con el propósito de obtener mapas comparables entre ciudades. Finalmente, las superficies interpoladas se integraron en una única figura mediante paneles independientes para cada

localidad, utilizando una escala de colores uniforme que permitió comparar la distribución espacial de las emisiones de CO₂ bajo las mismas condiciones de representación (Figura 73.).

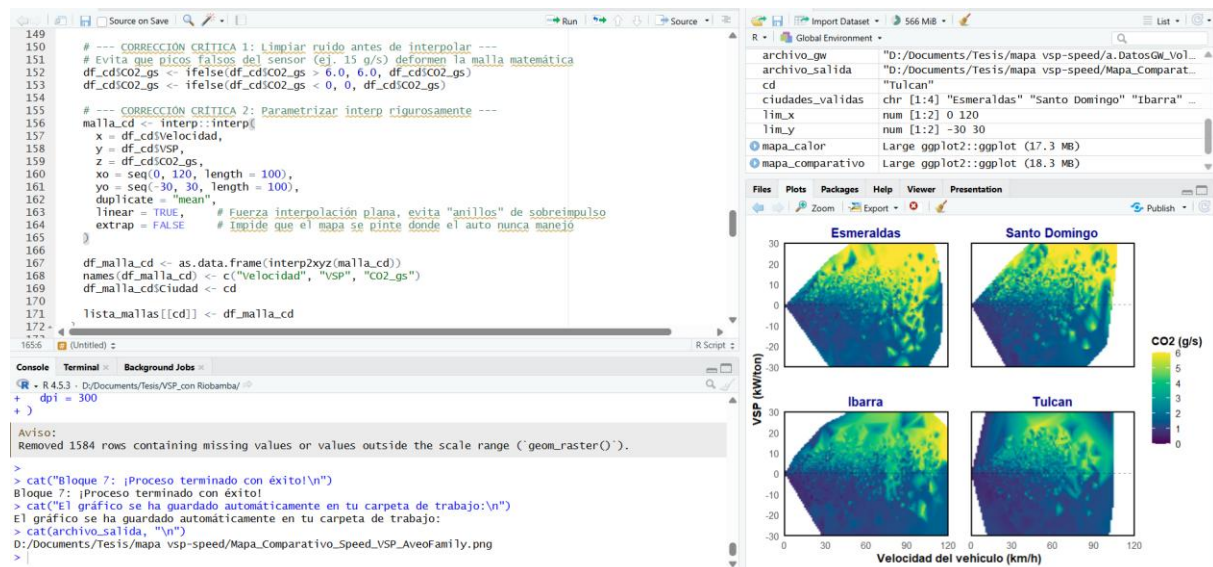


Figura 73. Fragmento del código para la construcción de los mapas de calor.

3.8 Simulación de consumo de combustible y emisiones de CO₂ a diferente altitud

Posterior a la caracterización del vehículo en cada ciudad de prueba mediante el enfoque VSP se procede a seleccionar la prueba de la ciudad de Ibarra que presente el mejor perfil de velocidad (Figura 74.), se usó la ciudad de Ibarra como prueba base debido a que la prueba en tráfico real se realizó sobre una ruta RDE.

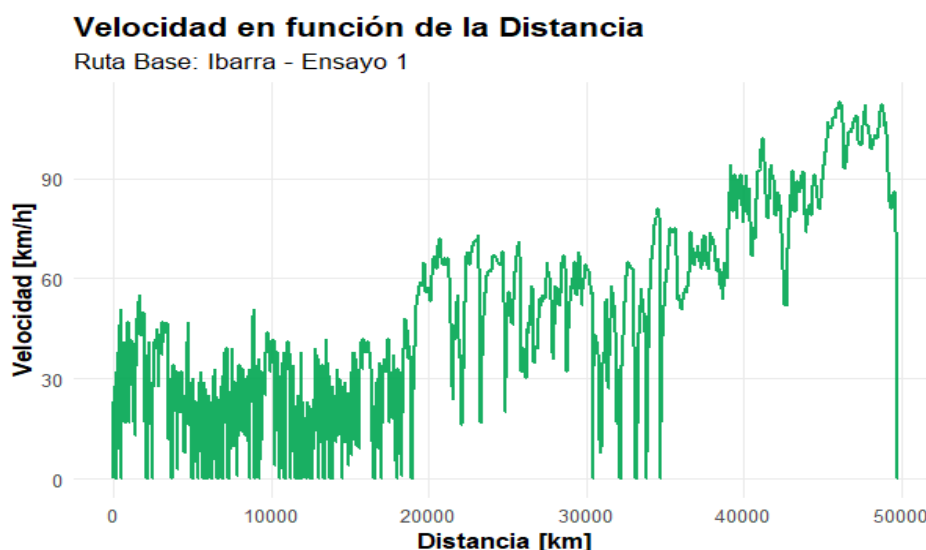


Figura 74. Perfil de velocidad en función de la distancia recorrida de la Prueba 1 en la ciudad de Ibarra

Con base en la Prueba 1 de la ciudad de Ibarra, se realizó la simulación del consumo de combustible y las emisiones de CO₂ con las características propias de cada ciudad, mediante la función *left_join* de la librería *dplyr*. Función que permite relacionar la ruta base de Ibarra con la base de datos que contiene los factores de consumo de combustible y emisiones de CO₂ para cada condición de operación, utilizando como variable de correspondencia a BIN de VSP por velocidad. Es así como, para cada condición de funcionamiento presente en la ruta base, se identifica el factor correspondiente a la ciudad simulada y se incorporan sus valores de consumo de combustible y emisiones de CO₂, manteniendo la misma secuencia cinemática de la ruta realizada en Ibarra.

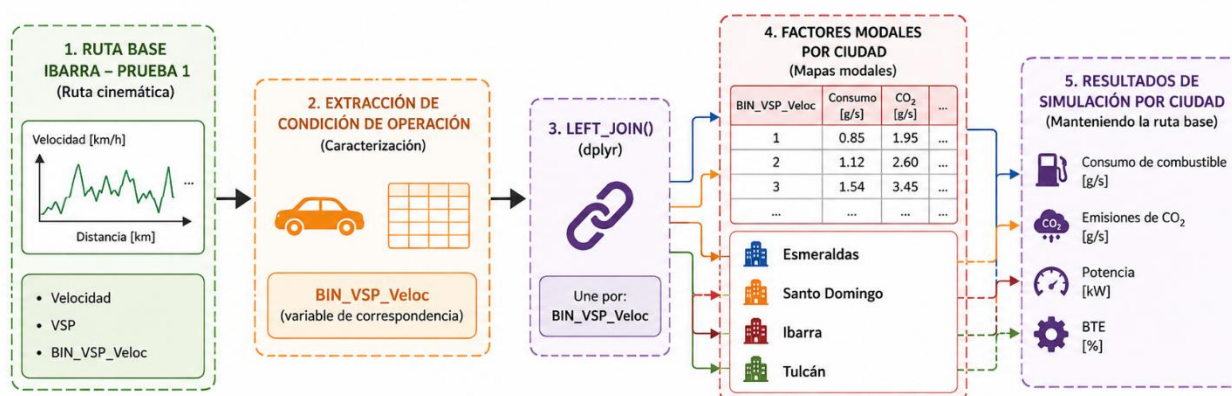


Figura 75. Diagrama: simulación de consumo de combustible y emisiones de CO₂.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se exponen los resultados de la investigación. Primero, se detallan los resultados relacionados con el análisis cinemático del vehículo en las rutas de estudio, modos de operación del vehículo. A continuación, se analiza los puntos de las zonas más frecuentes de operación del motor. Posteriormente se presentan los factores de emisión correspondientes a cada ruta de estudio. Finalmente se presenta el análisis del modelamiento VSP.

4.1 Comparación de medidas de consumo de combustible entre equipos

La ciudad de Riobamba fue la única en la que se pudo contar con el equipo PEMS para el levantamiento de datos en conjunto con los demás equipos de medición, razón por la cual se realizó una comparación de las mediciones de consumo de combustible y emisiones de CO₂ del vehículo registrado por los 3 dispositivos ELM327, CANEdge2, PEMS:

4.1.1 Comparación señales de consumo combustible

La Figura 76. muestra un tramo de las señales de consumo de combustible obtenidas de los 3 registradores expresada en gramos de combustible por segundo. La curva de consumo registrada por el PEMS se muestra con color azul, y presenta picos de consumo más altos, una señal más amplia y pequeñas fluctuaciones que captura mejor los eventos transitorios. El consumo de combustible registrado por el ELM327 a través del OBD representado con color naranja muestra menor amplitud en el registro y una curva con menores fluctuaciones, sin embargo, registra bien los picos de consumo, por último, el registro presentado por el sensor de flujo asociado al CANEdge2 muestra tendencias similares a las de los otros equipos, pero con menos picos y una curva atenuada.

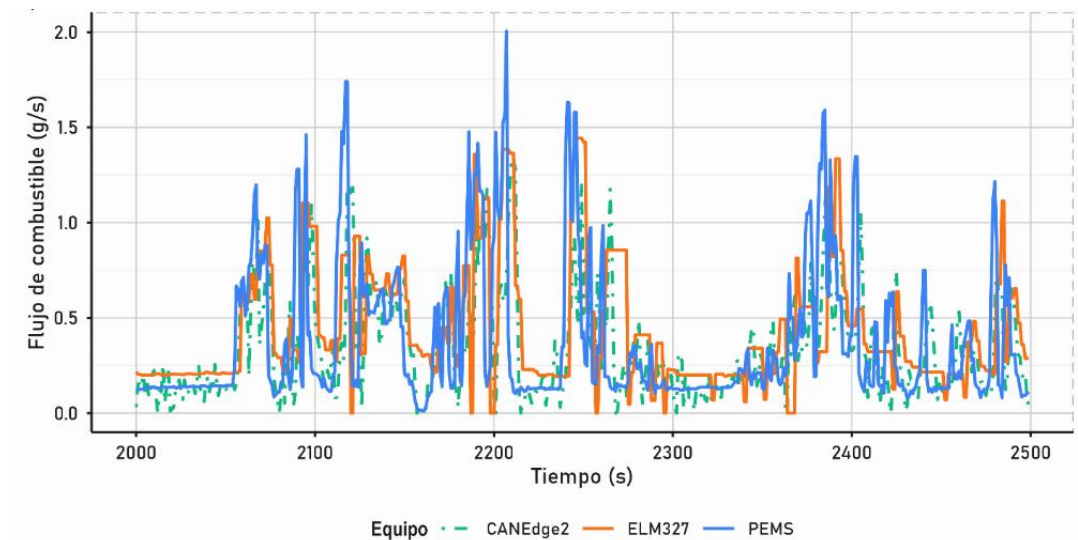


Figura 76. Señales de consumo de combustible: ELM327, CANEdge2, PEMS

Cuando el vehículo mantiene una velocidad constante las diferencias en los registros son menores, lo que sugiere un error pequeño en las mediciones durante condiciones estacionarias, presentando mayores diferencias durante los cambios rápidos de carga. Diferencias causadas por la respuesta dinámica ante el aumento de flujo de combustible de cada uno de los registradores usados en el estudio. Sin embargo, la tendencia es clara; el PEMS es más sensible a cambios bruscos en la carga del motor, no obstante, todos los equipos representan correctamente el comportamiento dinámico del consumo de combustible.

4.1.2 Correlación entre señales de consumo de combustible

La Figura 77. muestra la correlación lineal entre las mediciones registradas por los 3 equipos. Correlación que ayuda a determinar cómo están asociadas dos señales. En este caso se comparó a cada una de las señales de consumo de combustible registradas por el OBD, el sensor del flujo y el PEMS.

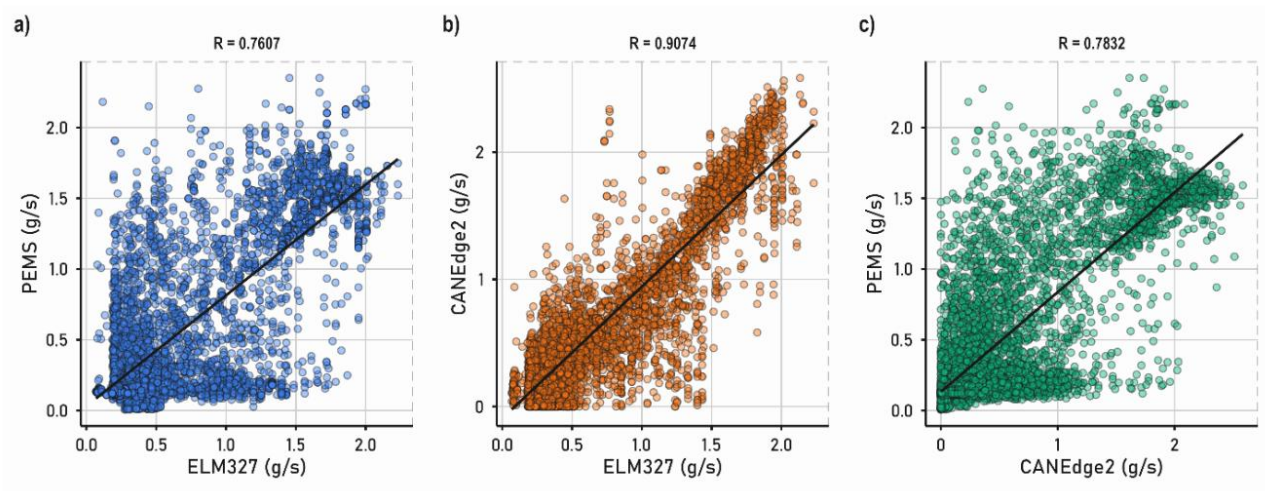


Figura 77. *Correlación lineal de consumo de combustible (Riobamba)*

La correlación entre el equipo PEMS y el registro directo del OBD muestra un coeficiente de Pearson de 0.67 lo que evidencia una correlación moderada entre las dos señales registradas, sin embargo, la nube de puntos muestra una dispersión considerable en especial en consumos inferiores a 1 g/s. Así mismo al analizar la correlación entre el registro OBD y el sensor de flujo, existe un coeficiente de Pearson de 0.80 lo que mejora la relación analizada anteriormente. La nube de puntos se encuentra muy cercana a la línea de tendencia, mostrando una menor dispersión de datos a lo largo de todo el rango de consumo. Finalmente, al comparar el registro del PEMS y del sensor de flujo, muestra un coeficiente de 0.77 lo que sugiere una correlación alta, aunque la nube de puntos muestra una dispersión marcada en consumos inferiores a 1.5 g/s probablemente causada por que los equipos ELM327 que extrae el consumo del sistema OBD II y CANEdge2 que registra las mediciones de los flujómetros poseen una respuesta dinámica similares entre sí pero diferente a la que opera el equipo PEMS usado en la campaña experimental.

4.1.3 Comparación en factores de consumo y CO₂ en términos de distancia

La Figura 78. muestra los factores de emisión de CO₂ y consumo de combustible de los 3 registradores usados en la prueba en tráfico real.

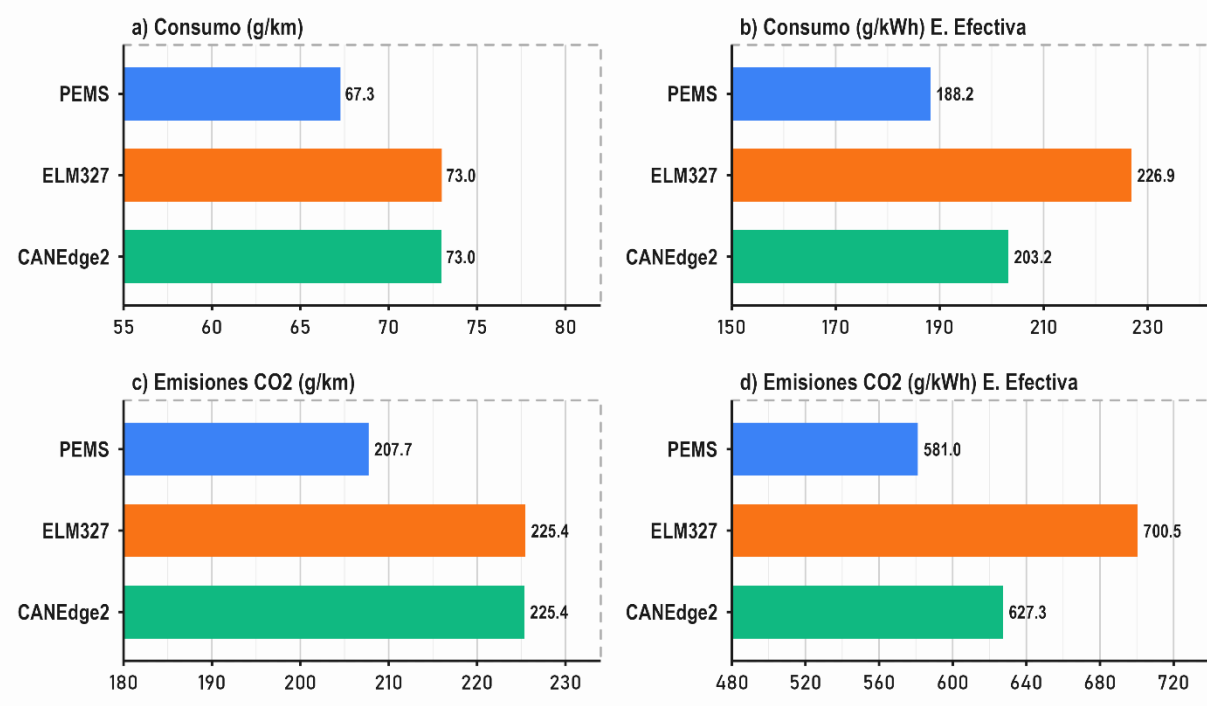


Figura 78. Factores de consumo de combustible y emisión de CO₂ (Riobamba)

Al analizar los factores de consumo y emisión en términos de distancia recorrida, se puede notar que el PEMS muestra un factor de emisión de 207.7 gCO₂/km y un consumo de 67.3 g/km, mientras que el CANEdge2 y el ELM327 muestran factores 8.5% mayores. Por otro lado, analizando los factores en términos de energía producida, muestran valores distintos: 581 gCO₂/kWh registrado por el PEMS, 627.3 gCO₂/kWh del CANEdge2 y 700.5 gCO₂/kWh del ELM327. Es aquí donde se puede apreciar la diferencia en los métodos de medición de consumo de combustible y emisión de CO₂, empleados por cada equipo de registro y adquisición de datos.

4.1.4 Comparación de consumo por intervalos de VSP

La prueba realizada en la ciudad de Riobamba sirvió como base para realizar una comparación de las mediciones realizadas tanto por el ELM327, el CANEdge2 en conjunto con los flujómetros DFM 100 ACAN y el equipo PEMS.

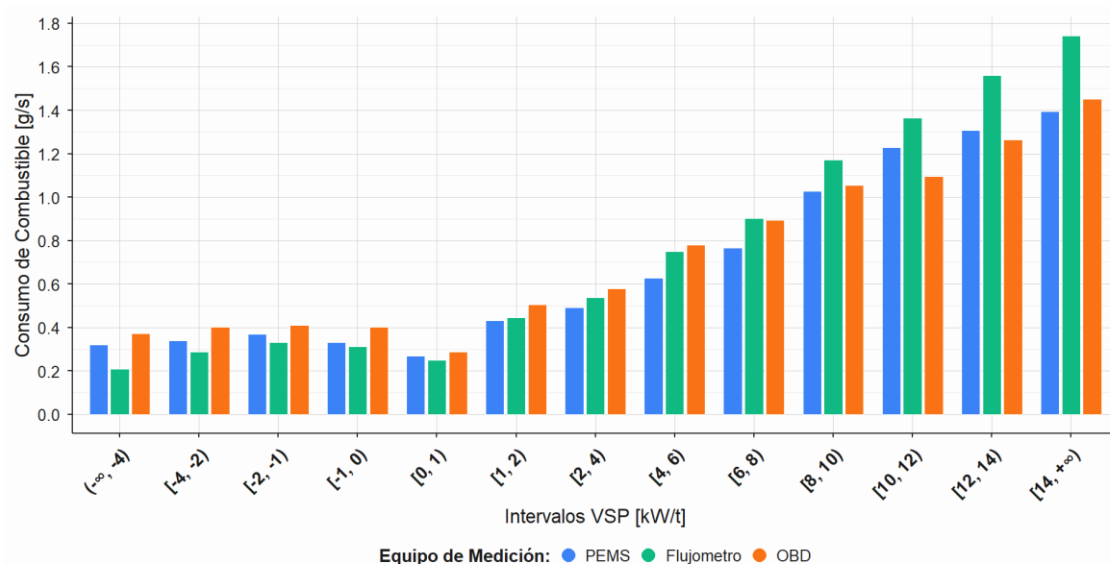


Figura 79. Comportamiento consumo de combustible en los diferentes equipos de medición por intervalos VSP

La Figura 79. muestra el consumo de combustible de cada uno de los equipos de medición por intervalo de VSP, lo que permite comparar el consumo en ventanas que equipara la demanda de potencia. Al comparar las mediciones realizadas por los equipos ELM327 y PEMS presentan un consumo de combustible similar para las 13 ventanas de potencia (Anexo 4), sin embargo, la medición física sobre el flujo de combustible realizado por el CANEdge2 presenta discrepancias en las mediciones realizadas con los equipos antes mencionados, en los intervalos de baja demanda de potencia, el flujo de combustible registrado es menor al registrado por los otros equipos. Sin embargo, en el resto de los intervalos, el flujo de combustible medido por el sensor es mayor al registrado con el resto de los equipos, incluso alcanzando una diferencia del 25% mayor, en el intervalo de mayor demanda de potencia $[14, +\infty)$.

4.2 Cinemática y modos de operación por nivel de altitud

En esta sección, se presentan los datos obtenidos, relacionados con las características cinemáticas tanto de las rutas de estudio en las diferentes ciudades y aquellas características que definen el modo de operación del vehículo.

4.2.1 Cinemática en Esmeraldas a 15 m s.n.m.

La Tabla 13. Muestra las características cinemáticas de las 2 rutas de estudio realizadas en la ciudad de Esmeraldas, una ciudad costera que permite caracterizar el funcionamiento del vehículo a nivel del mar. Las dos rutas tuvieron una duración de 4083 y 3003 segundos respectivamente y una extensión que sigue la misma tendencia de 43.66 kilómetros y 36.58

kilómetros, cabe destacar que es la ruta con mayor diferencia en extensión y duración en la investigación. Dicha ruta permite al vehículo alcanzar velocidades de 119.55 km/h en autopista, y mantener una velocidad promedio de 25 km/h y 50 km/h aproximadamente para los tramos urbano y suburbano.

Tabla 13. *Características cinemáticas Ruta Esmeraldas*

	Ruta 1 Esmeraldas				Ruta 2 Esmeraldas			
	Urbano	Suburbano	Autopista	General	Urbano	Suburbano	Autopista	General
Altitud inicial(m)	23.44	25.67	37.93	23.44	22.13	38.05	36.85	22.13
Altitud final (m)	37.84	19.59	27.14	19.59	38.04	90.71	38.47	90.71
Duración (s)	1865	1643	575	4083	1624	785	594	3003
Distancia (km)	12.53	18.79	12.32	43.66	11.93	11.86	12.78	36.58
Velocidad Máxima(km/h)	57.38	79.23	114.98	114.98	60.22	75.49	119.55	119.55
Velocidad promedio(km/h)	24.23	41.00	77.19	38.44	26.54	54.18	77.38	43.82

4.2.2 Cinemática en Santo Domingo a 625 m s.n.m.

La Tabla 14. Exponen las características cinemáticas de las dos rutas de estudio realizadas en la ciudad de Santo Domingo, ciudad situada 625 metros sobre el nivel del mar, rutas con una duración similar de 3799 segundos y 3571 segundos, y una distancia recorrida de 29.81 kilómetros y 27.69 kilómetros respectivamente. Una ruta que permite alcanzar velocidades de 111 km/h en Autopista y una velocidad promedio de 18 km/h en el tramo urbano y 35 km/h en el tramo suburbano.

Tabla 14. *Características cinemáticas Ruta Santo Domingo*

	Ruta 1 Santo Domingo				Ruta 2 Santo Domingo			
	Urbano	Suburbano	Autopista	General	Urbano	Suburbano	Autopista	General
Altitud inicial(m)	611.48	639.38	515.66	639.38	619.32	647.54	522.70	647.54
Altitud final (m)	576.80	515.95	487.90	487.90	566.82	523.01	489.38	489.38
Duración (s)	1579	1144	1076	3799	1413	1112	1046	3571
Distancia (km)	7.8	10.89	11.12	29.81	7.32	9.78	10.58	27.69
Velocidad Máxima(km/h)	52.84	71.67	110.95	110.95	53.60	85.60	111.42	111.42
Velocidad promedio(km/h)	17.54	33.83	36.86	27.92	18.45	31.33	36.06	27.62

4.2.3 Cinemática en Ibarra a 2225 m s.n.m.

Las características cinemáticas de las 2 rutas de estudio realizadas en la ciudad de Ibarra se presentan en la Tabla 15. que presenta la prueba sobre una ruta estudiada previamente como un circuito RDE, Ibarra la ciudad con menor altitud de la Sierra en el presente estudio con 2225 m s.n.m con una duración de 4834 segundos y una extensión de 35 kilómetros. Ruta que permite alcanzar velocidades de 125 km/h en la zona de autopista, y mantener

velocidades promedio de 13 km/h en el tramo urbano y de 43 km/h en el tramo suburbano. Ruta que se caracteriza por no tener grandes diferencias de altitud en las zonas urbana y suburbana, mientras que presenta una drástica caída a 1745 m s.n.m. en la zona de autopista en el sector de los Cañaverales.

Tabla 15. *Características Cinemáticas Ruta Ibarra*

	Ruta 1 Ibarra				Ruta 2 Ibarra			
	Urbano	Suburbano	Autopista	General	Urbano	Suburbano	Autopista	General
Altitud inicial(m)	2240.87	2234.87	2230.74	2240.87	2234.34	2238.63	2215.60	2234.34
Altitud final (m)	2235.03	2231.09	1737.99	1737.99	2238.81	2216.23	1745.88	1745.88
Duración (s)	3209	738	887	4834	2731	932	679	4342
Distancia (km)	11.41	9.62	13.73	34.770	11.12	10.44	13.48	35.05
Velocidad Máxima(km/h)	56.95	75.38	116.20	116.20	56.98	78.56	125.71	125.71
Velocidad promedio(km/h)	12.44	46.33	55.57	25.53	14.09	40.17	70.19	28.46

4.2.4 Cinemática en Tulcán a 2950 m s.n.m.

La Tabla 16. presenta las características cinemáticas de las dos rutas realizadas en Tulcán, la ciudad más alta del estudio con 2 950 m s.n.m. rutas con duraciones de 2824 segundos y 2516 segundos y una extensión de 18 kilómetros. La autopista permite alcanzar velocidades de hasta 106 km/h mientras que el tramo urbano y suburbano permitieron mantener velocidades promedio de 11 km/h y 25 km/h respectivamente.

Tabla 16. *Características cinemáticas ruta Tulcán*

	Ruta 1 Tulcán				Ruta 2 Tulcán			
	Urbano	Suburbano	Autopista	General	Urbano	Suburbano	Autopista	General
Altitud inicial(m)	2973.15	2884.13	2978.63	2884.13	2980.37	2876.55	2977.51	2876.55
Altitud final (m)	2978.60	2973.43	2956.05	2956.05	2977.20	2981.53	2951.82	2951
Duración (s)	1336	861	627	2824	1065	805	646	2516
Distancia (km)	4.34	4.87	7.9	17.12	3.41	6.359	8.78	18.55
Velocidad Máxima(km/h)	63.14	65.26	92.73	92.73	33.84	76.64	106.56	106.56
Velocidad promedio(km/h)	11.60	20.31	45.04	21.68	11.40	27.83	48.49	26.18

4.2.5 Modos de operación por nivel de altitud

En la Figura 80. se presentan, mediante un diagrama de barras, los modos de operación registrados durante la toma de datos para cada ciudad: aceleración, crucero, desaceleración y ralentí. Estos parámetros permiten caracterizar el comportamiento cinemático del vehículo y la

naturaleza del flujo vehicular en las urbes de estudio (Tulcán, Ibarra, Santo Domingo y Esmeraldas).

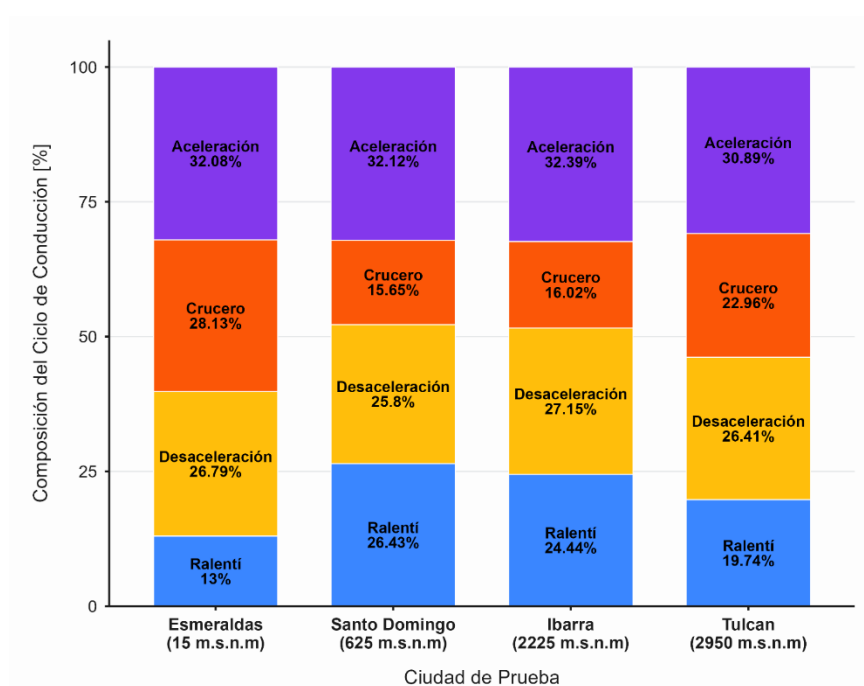


Figura 80. Distribución porcentual de los modos de operación por ciudad.

En primer lugar, se observa que la fase de aceleración tiene una presencia significativa en todas las rutas. Ibarra registra el valor más alto (32.39%), seguido por Santo Domingo (32.12%), Esmeraldas (32.08%) y Tulcán (30.89%), lo que sugiere una mayor frecuencia de arranques y cambios de régimen. Respecto a la desaceleración, Ibarra alcanza el valor máximo (27.15%), seguido de Esmeraldas (26.79%), Tulcán (26.41%) y Santo Domingo (25.8%), guardando coherencia con un perfil de conducción estable.

El ralentí es el modo que presenta mayor variabilidad entre ciudades, reflejando directamente el impacto de semáforos, intersecciones y densidad de tráfico. Santo Domingo e Ibarra lideran este apartado con 26.43% y 24.44% respectivamente, lo que evidencia un flujo vehicular más interrumpido. Por el contrario, Esmeraldas registra el valor más bajo (13%), seguida de Tulcán (19.74%), lo que denota patrones de circulación más dinámicos y con escasas detenciones prolongadas.

Finalmente, el modo crucero actúa como el indicador principal de la fluidez de la ruta. Esmeraldas destaca con el porcentaje máximo (28.13%), consolidándose como la ciudad con el tráfico más fluido entre las evaluadas. Le sigue Tulcán con un 22.96%, reafirmando su perfil de baja interferencia por detenciones. En el extremo opuesto, Santo Domingo e Ibarra presentan

los porcentajes más bajos de cruceo (15.65% y 16.02%), lo cual es una consecuencia directa del elevado tiempo que el vehículo permanece en ralentí y en fases de transición (aceleración/desaceleración) debido a la congestión urbana.

4.3 Evaluación del efecto de la altitud mediante el enfoque VSP

Una vez obtenidos los datos cinemáticos del vehículo, se aplicó el modelo de VSP para caracterizar las condiciones de operación durante la conducción. El VSP permitió integrar variables como la velocidad, aceleración, pendiente y resistencia aerodinámica en un indicador asociado a la demanda de potencia del vehículo. A partir de sus valores, los registros se clasificaron en intervalos de VSP, lo que permite comparar el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ bajo diferentes condiciones de operación. Con esta clasificación se analiza el comportamiento del consumo y las emisiones en función del VSP y de los rangos de velocidad considerados.

4.3.1 Correlación VSP y consumo instantáneo a diferente altitud

La Figura 81. presenta la distribución del consumo instantáneo de combustible en función del VSP para las cuatro ciudades de estudio. Cada punto corresponde a un registro obtenido durante la operación del vehículo, lo que permite observar el comportamiento del consumo ante diferentes niveles de demanda de potencia.

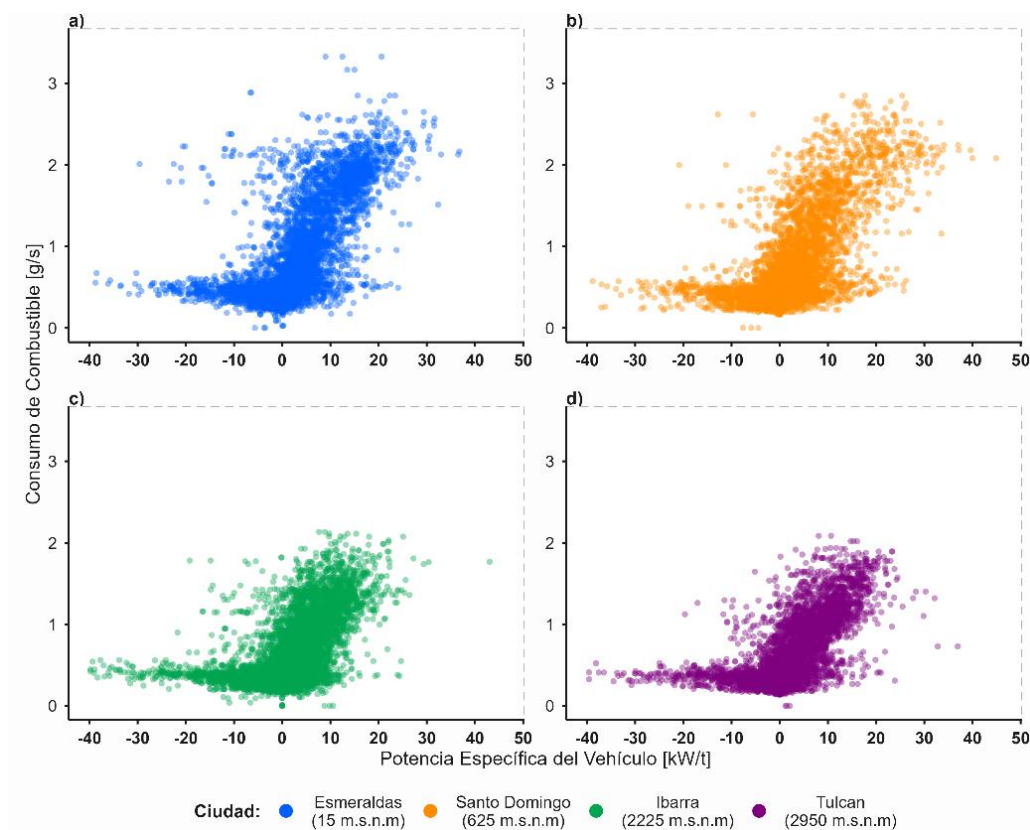


Figura 81. Correlación entre VSP-consumo instantáneo a diferente altitud

Para valores de VSP negativos y cercanos a cero, el consumo se concentra en un rango reducido y presenta una tendencia relativamente estable en las cuatro ciudades. A medida que el VSP toma valores positivos, se observa un incremento del consumo y una mayor dispersión de los registros. Este comportamiento es más evidente en las ciudades de menor altitud.

Esmeraldas (Figura 81a) presenta la mayor dispersión y los valores máximos de consumo, con registros superiores a 3 g/s y valores cercanos a 3.5 g/s para VSP próximos a 20 kW/t. Santo Domingo (Figura 81b) también presenta una dispersión considerable, aunque sus valores máximos son inferiores a los de Esmeraldas. En Ibarra y Tulcán (Figuras 81c y 81d), la distribución se mantiene más concentrada, con valores máximos cercanos a 2 g/s.

En conjunto, la figura muestra una tendencia creciente del consumo conforme aumenta el VSP, acompañada de una mayor dispersión en los valores positivos. Bajo niveles similares de VSP, las ciudades de menor altitud presentan valores de consumo más elevados, con una diferencia más marcada en Esmeraldas respecto a Ibarra y Tulcán.

4.3.2 Análisis consumo y CO₂ por intervalo de VSP

La Figura 82. presenta los valores medios del consumo instantáneo de combustible (a) y de las emisiones de CO₂ (b) para los intervalos de VSP evaluados en Esmeraldas, Santo Domingo, Ibarra y Tulcán. La figura fue elaborada a partir de los valores presentados en el Anexo 5, donde se detallan las tasas de consumo de combustible y emisiones de CO₂ para cada intervalo y ciudad. En ambas variables se observa, en términos generales, un incremento conforme aumenta el intervalo de VSP, especialmente a partir de valores positivos.

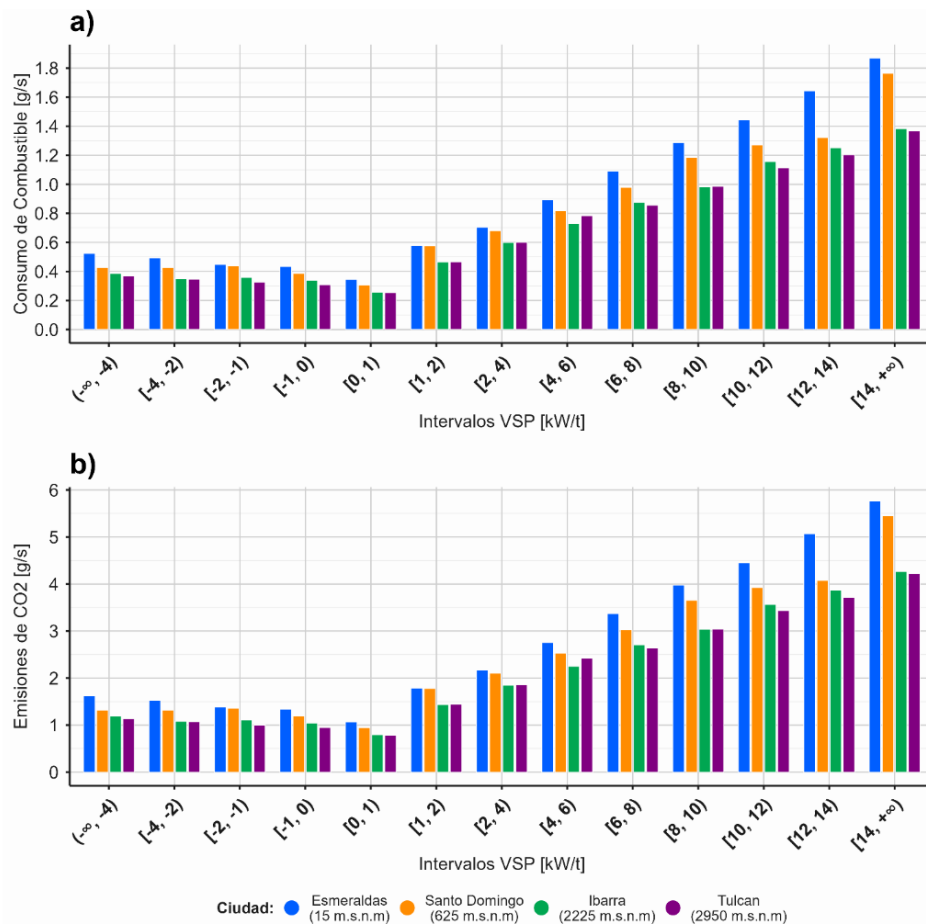


Figura 82. Emisiones de CO₂ y consumo instantáneo de combustible para los distintos intervalos de VSP.

En los primeros intervalos, correspondientes a $(-\infty, -4]$, $[-4, -2]$, $[-2, -1]$ y $[-1, 0]$, las diferencias entre ciudades son relativamente reducidas. En $(-\infty, -4]$, el menor consumo (Figura 82a) corresponde a Tulcán, con 0,368 g/s, mientras que el mayor se registra en Esmeraldas, con 0,524 g/s, lo que representa una diferencia de 42,4 %. Para las emisiones de CO₂ (Figura 82b), los valores extremos corresponden igualmente a Tulcán (1,136 g/s) y Esmeraldas (1,618 g/s), con una diferencia de 42,4 %. En $[0, 1]$, se mantiene este comportamiento, con un consumo de 0,254 g/s en Tulcán y 0,345 g/s en Esmeraldas, equivalente a una diferencia de 35,8 %; para las emisiones, los valores son 0,784 y 1,064 g/s, respectivamente, con una diferencia de 35,7 %.

A partir de $[1, 2]$, se observa un incremento progresivo de ambas variables en las cuatro ciudades. Esta tendencia se hace más evidente en los intervalos de mayor VSP, donde también se amplían las diferencias entre los valores extremos. En $[8, 10]$, el menor consumo corresponde a Tulcán, con 0,986 g/s, mientras que el mayor se registra en Esmeraldas, con 1,288 g/s, representando una diferencia de 30,6 %. Para las emisiones de CO₂, Tulcán presenta 3,043 g/s y Esmeraldas 3,976 g/s, con una diferencia de 30,7 %.

El mayor contraste se presenta en $[14, +\infty)$, donde Esmeraldas alcanza los valores máximos, con 1,868 g/s de consumo y 5,769 g/s de CO₂. En este mismo intervalo, Tulcán registra los valores mínimos, con 1,367 g/s y 4,220 g/s, respectivamente. La diferencia entre ambas ciudades alcanza 36,7 % tanto para el consumo de combustible como para las emisiones de CO₂. Santo Domingo presenta valores de 1,764 g/s y 5,448 g/s, mientras que Ibarra registra 1,382 g/s y 4,268 g/s, manteniéndose ambas ciudades entre los valores extremos.

De manera general, en los intervalos de VSP elevados, Esmeraldas y Santo Domingo presentan los mayores valores de consumo y emisiones, mientras que Ibarra y Tulcán registran los menores. En particular, en $[12,14)$, el menor consumo corresponde a Tulcán (1,203 g/s) y el mayor a Esmeraldas (1,642 g/s), con una diferencia de 36,5 %. Para las emisiones de CO₂, los valores son 3,715 g/s y 5,070 g/s, respectivamente, con una diferencia de 36,5 %.

Las diferencias observadas entre ciudades se encuentran asociadas a las condiciones de operación y a las características particulares de cada recorrido. Para el cálculo del VSP se consideraron las condiciones ambientales y parámetros propios del vehículo correspondientes a cada escenario, por lo que factores como las condiciones atmosféricas y el comportamiento aerodinámico intervienen en los valores obtenidos. Por tanto, los resultados representan el comportamiento del vehículo bajo las condiciones específicas de cada ciudad y no permiten atribuir las diferencias observadas exclusivamente a la altitud.

4.3.3 Análisis consumo y CO₂ mediante intervalo VSP+Velocidad

La Figura 83 y el Anexo 6 presentan los valores medios del consumo instantáneo de combustible (a) y de las emisiones de CO₂ (b), clasificados mediante intervalos VSP + velocidad para los rangos inferiores a 40 km/h y de 40–80 km/h. Esta clasificación permite comparar el consumo y las emisiones bajo diferentes niveles de VSP dentro de cada rango de velocidad. Debido a la relación entre el consumo de gasolina y la generación de CO₂, las diferencias porcentuales entre ciudades presentan valores prácticamente equivalentes para ambas variables; por ello, en cada comparación se reporta un único porcentaje.

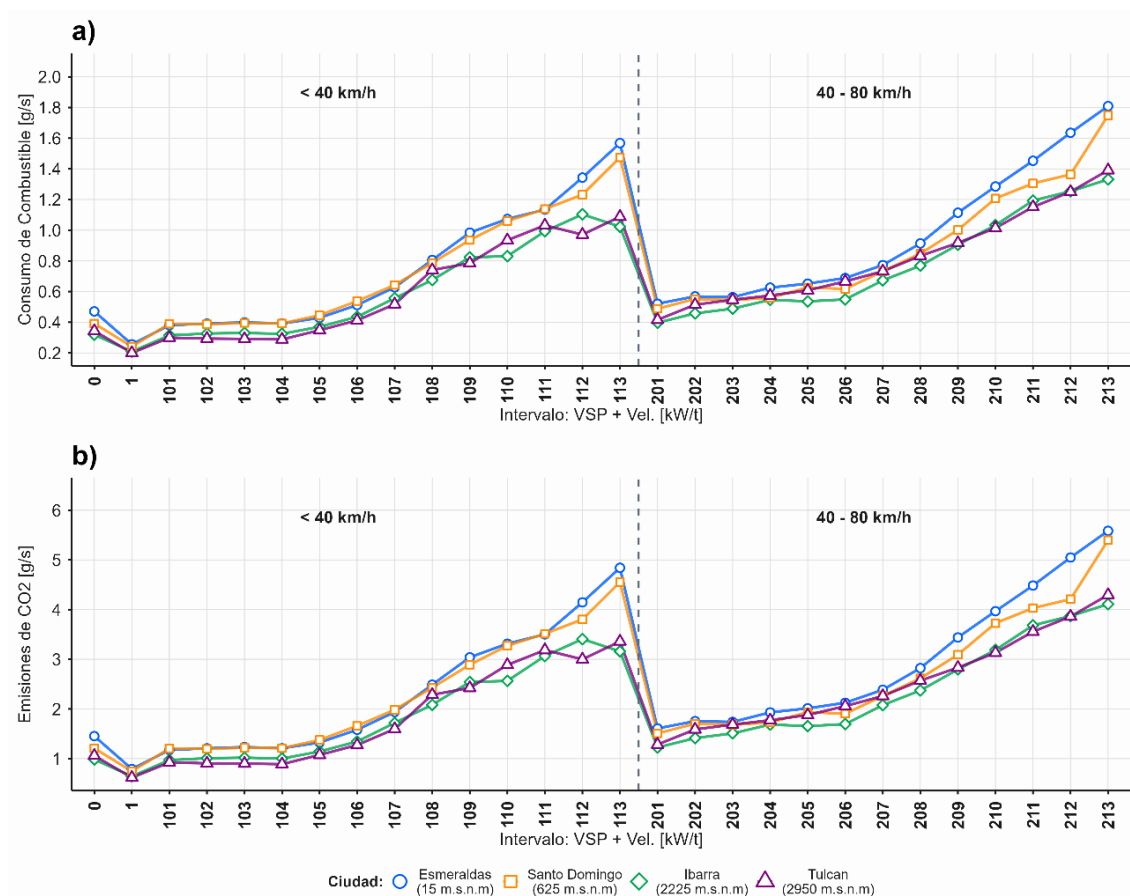


Figura 83. Distribución continua de la tasa de emisiones de CO_2 y del consumo instantáneo de combustible para regímenes de velocidad.

En los intervalos VSP + velocidad de VSP negativo (0–104 y 201–204), las diferencias entre ciudades son menores. En el intervalo 104, Tulcán registra el menor consumo, con 0.288 g/s, y las menores emisiones de CO_2 , con 0.888 g/s, mientras que Santo Domingo alcanza 0.392 g/s y 1.210 g/s, respectivamente, lo que representa un incremento del 36.1 % respecto a Tulcán. En el intervalo 204, Ibarra presenta los valores más bajos, con 0.546 g/s de combustible y 1.686 g/s de CO_2 , mientras que Esmeraldas alcanza 0.625 g/s y 1.931 g/s, con una diferencia del 14.5 %.

En los intervalos VSP + velocidad de bajo VSP positivo (105–109 y 205–209), ambas variables aumentan conforme avanzan los intervalos y se amplían las diferencias entre ciudades. En el intervalo 109, Tulcán presenta 0.785 g/s de combustible y 2.423 g/s de CO_2 , frente a 0.984 g/s y 3.039 g/s en Esmeraldas, con una diferencia del 25.3 %. En el intervalo 209, Ibarra registra 0.905 g/s de combustible y 2.795 g/s de CO_2 , mientras que Esmeraldas alcanza 1.114 g/s y 3.439 g/s, con una diferencia del 23.1 %.

Las mayores diferencias se presentan en los intervalos VSP + velocidad de alta demanda positiva (110–113 y 210–213). En el intervalo 113, Esmeraldas alcanza 1.568 g/s de combustible y 4.841 g/s de CO₂, mientras que Ibarra registra 1.023 g/s y 3.159 g/s, respectivamente, con una diferencia del 53.3 %. En el intervalo 213, Esmeraldas presenta los valores máximos, con 1.809 g/s de combustible y 5.585 g/s de CO₂, frente a 1.331 g/s y 4.109 g/s en Ibarra, con una diferencia del 35.9 %.

En conjunto, el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ aumentan desde los intervalos de demanda negativa hacia los de baja y alta demanda positiva. Las diferencias entre ciudades son menores en los intervalos de demanda negativa y se amplían conforme aumenta el VSP, alcanzando la mayor separación en el intervalo 113.

4.3.4 Mapas de consumo: VSP vs Velocidad

La Figura 84 presenta la distribución del consumo instantáneo de combustible en función de la velocidad del vehículo y la Potencia Específica Vehicular (VSP) para las cuatro ciudades analizadas. En los cuatro casos, la mayor concentración de registros se encuentra alrededor de VSP cercanos a 0 kW/t, con una distribución que se extiende hacia valores positivos y negativos conforme varían las condiciones de conducción. Los menores consumos se concentran principalmente en las zonas de VSP negativo y cercanas a cero, mientras que los valores más altos se ubican principalmente en la región de VSP positivo, asociada con una mayor demanda de potencia del vehículo.

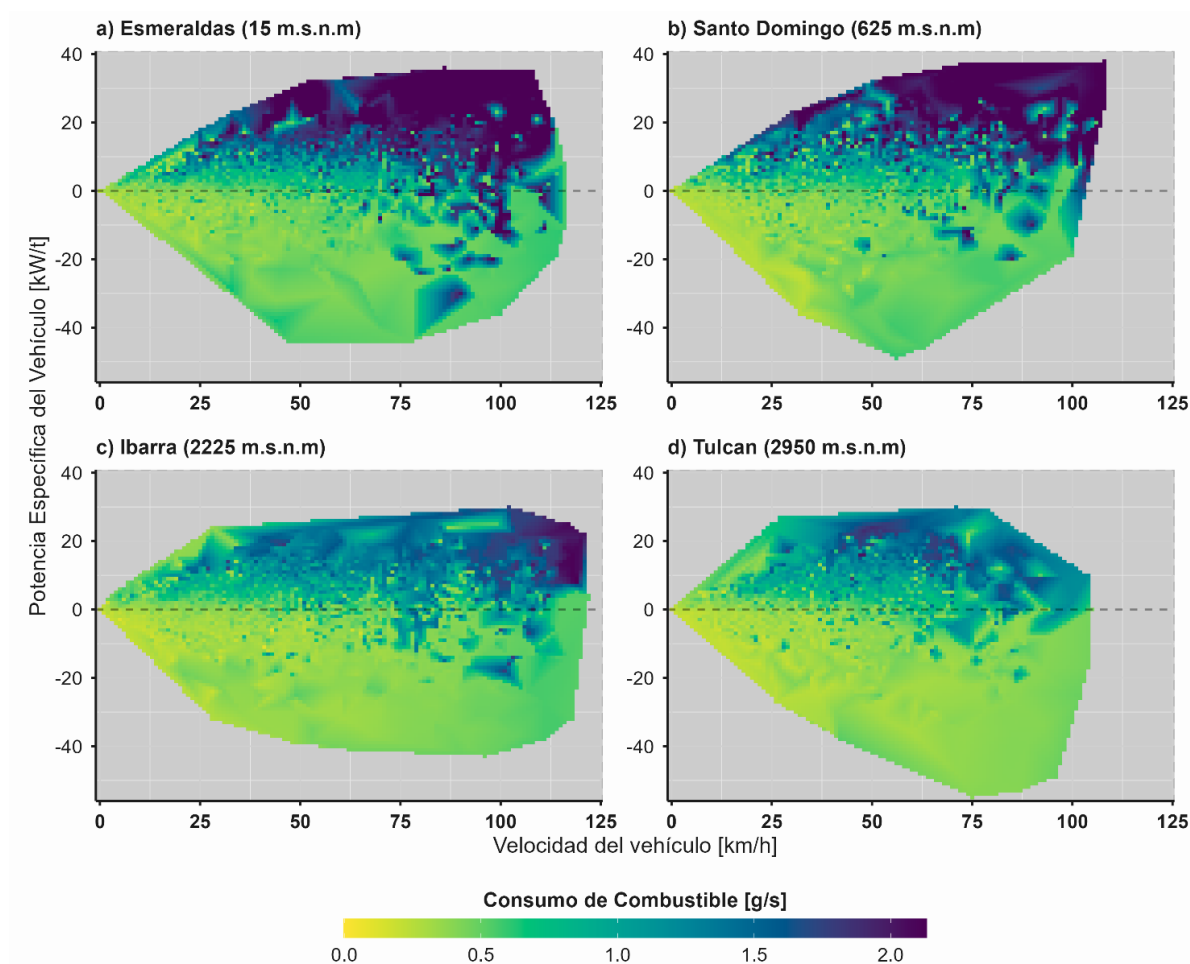


Figura 84. Mapas Consumo instantáneo de combustible en función de VSP vs. Velocidad

La distribución de los registros presenta diferencias entre ciudades. Santo Domingo alcanza el mayor VSP máximo, con 38.29 kW/t, seguido de Esmeraldas con 35.74 kW/t, lo que representa una diferencia del 7.1 %. Sin embargo, Esmeraldas presenta la mayor tasa máxima de consumo, con 3.328 g/s, frente a 2.848 g/s en Santo Domingo, 2.133 g/s en Ibarra y 2.085 g/s en Tulcán. Respecto a Tulcán, el valor máximo de Esmeraldas es aproximadamente 59.6 % superior.

La distribución de VSP también guarda relación con el tiempo de ralentí registrado en cada ciudad. Esmeraldas presenta el menor porcentaje de ralentí, con 13 %, mientras que Santo Domingo, Ibarra y Tulcán alcanzan 26.43 %, 24.44 % y 19.74 %, respectivamente (Figura 80). De forma consistente, Esmeraldas presenta la mayor proporción de registros con VSP positivo, con 62.85 %, frente a 47.85 % en Santo Domingo, 48.74 % en Ibarra y 52.11 % en Tulcán. Esto indica una mayor presencia de registros asociados con demanda positiva de potencia durante las pruebas de Esmeraldas.

En conjunto, los mapas muestran una mayor concentración del consumo en las regiones de VSP positivo y valores elevados de VSP. Esmeraldas presenta las mayores tasas de consumo

instantáneo, mientras que Santo Domingo alcanza el mayor VSP máximo. Ibarra y Tulcán mantienen distribuciones con menores valores máximos de consumo y VSP.

4.4 Comparación consumo y CO₂ por ciudad

La Tabla 19. muestra los factores de consumo de combustible y emisión de CO₂ en términos de distancia recorrida y energía efectiva producida, muestran los valores del ensayo en general y en los diferentes tramos: urbano, suburbano y autopista. Lo cual demuestra un factor de emisión mayor en el tramo urbano para todas las ciudades, además de un factor de emisión mayor en las ciudades de baja altitud como lo son Esmeraldas y Santo Domingo. Los que responde al efecto de una menor altitud y mayor densidad del aire.

Tabla 17. Factores de emisión por distancia recorrida

Ciudad	Tramo	Valor promedio (%)	Factor de Emisión por Energía generada (g/kWh)			Tasa promedio (g/s)		Factor de Emisión por Distancia Recorrida (g/km)	
			BTE	BSFC	CO ₂	FC	CO ₂	FC	CO ₂
Esmeraldas	Urbano	24	338.83	977.21	0.49	1.53	70.74	218.42	
	Suburbano	25.9	314.83	894.19	0.89	2.74	66.81	206.30	
	Autopista	27.85	289.89	835.04	1.52	4.69	70.83	218.71	
	Total	25.25	322.62	897.88	0.79	2.45	69.29	213.94	
Sto. Domingo	Urbano	24.25	333.40	967.60	0.42	1.31	84	259.37	
	Suburbano	24.9	327.30	911.36	0.58	1.79	63.59	196.36	
	Autopista	25.5	321.50	861.45	0.75	2.33	74.01	228.53	
	Total	24.85	328.11	907.18	0.56	1.75	72.88	225.04	
Ibarra	Urbano	27.2	298.26	889.06	0.35	1.07	91.91	283.80	
	Suburbano	30.4	268.39	748.99	0.64	1.99	53.44	165.03	
	Autopista	30.45	268.36	745.08	0.75	2.33	43.10	133.10	
	Total	28.3	287.87	809.18	0.47	1.45	61.89	191.09	
Tulcán	Urbano	30	269.81	806.65	0.31	0.98	98.45	304	
	Suburbano	30.1	270.96	788.19	0.47	1.47	71.49	220.76	
	Autopista	32.9	246.93	702.52	0.69	2.14	53.01	163.68	
	Total	30.7	264.76	760.11	0.45	1.41	68.49	211.47	

4.4.1 Factor consumo en términos de distancia (Sin ralentí)

De la misma manera, se analiza los factores de consumo y emisiones contrarrestando el efecto del tráfico, a través de un filtrado de todos los registros que constituyen la operación en ralentí, que en algunas zonas de funcionamiento puede llegar a influir más que altitud sobre el consumo y las emisiones

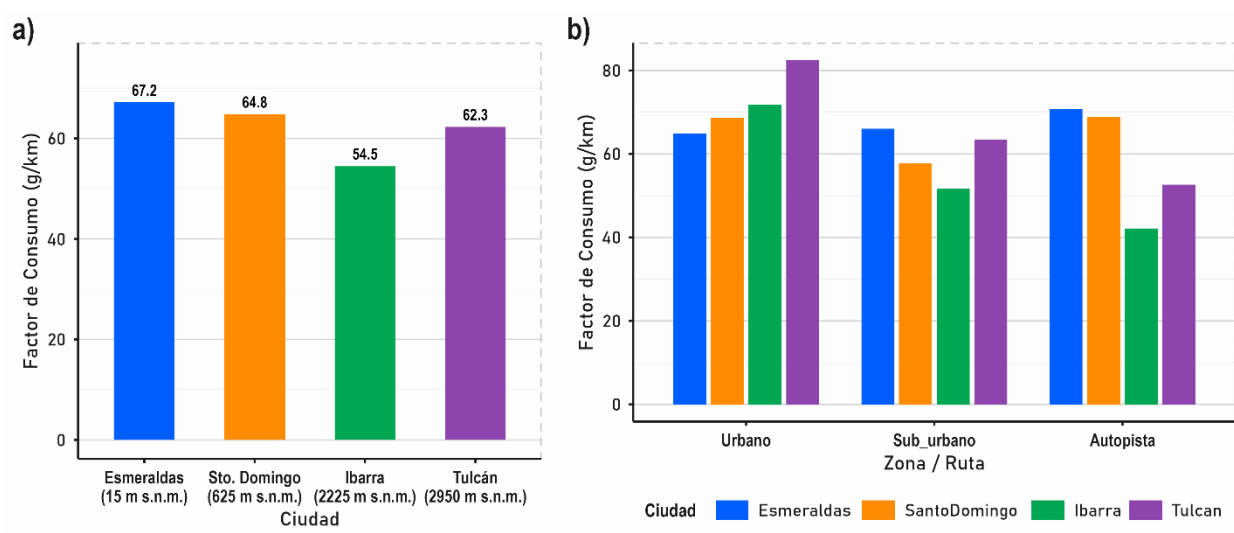


Figura 85. Factores de consumo de combustible por nivel de altitud (Sin Ralentí)

La Figura 85a. muestra el factor de consumo de combustible en la totalidad de las rutas, mostrando una clara tendencia a reducir con el incremento de la altitud, sin embargo, la ciudad de Tulcán no sigue esta lógica, lo que sugiere la influencia de un factor externo a esta investigación que afecta el consumo de combustible. La Figura 85b en cambio muestra los factores de consumo diferenciando entre las zonas: urbano, suburbano y autopista. En donde podemos notar que la zona suburbana y autopista, refleja el comportamiento del consumo en la ruta general, mientras que el tramo urbano invierte la tendencia, mostrando un aumento del consumo de combustible con el incremento de la altitud. Tulcán registra un valor de 82.3 g/km, un 26% mayor que en Esmeraldas. Comportamiento particular que puede atribuirse a las detenciones y arranques constantes

4.4.2 Factor de emisión de CO₂ en términos de distancia recorrida (Sin Ralentí)

La Figura 86a muestra los factores de emisión de CO₂ en términos de distancia recorrida, que siguen la misma tendencia que el consumo de combustible, esto asociado a que el CO₂ es un producto directo de la combustión de la gasolina. Esmeraldas presenta un factor de emisión de 207.4 gCO₂/km un 19% mayor que en la ciudad de Ibarra.

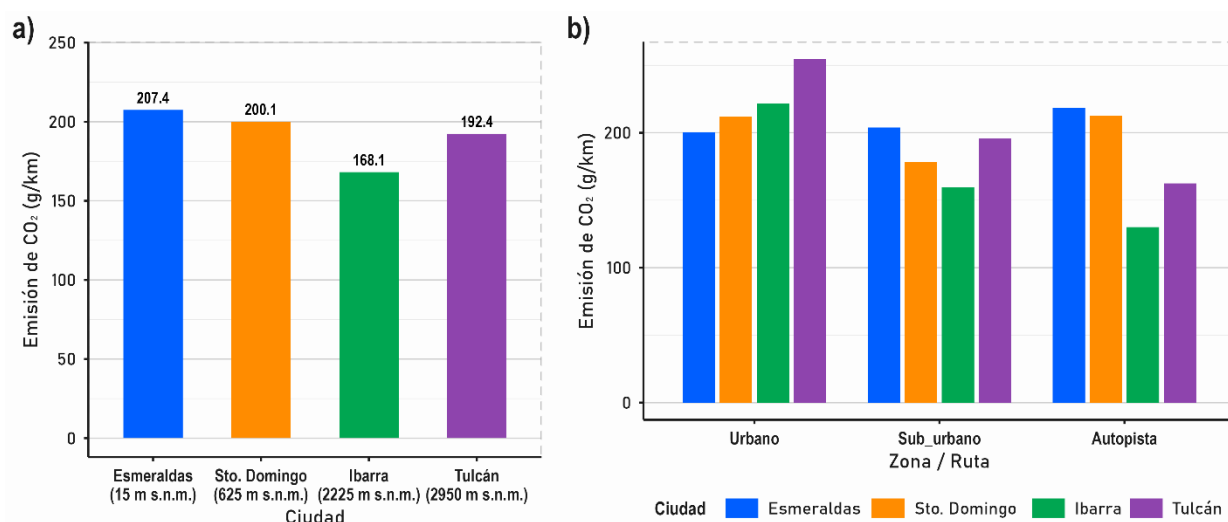


Figura 86. Factores de emisión de CO₂ por nivel de altitud (Sin Ralentí)

4.4.3 Factor emisión en términos de energía de tracción (Sin Ralentí)

La Figura 87. muestra los valores de emisión de CO₂ en términos de energía de tracción, Tulcán presenta el factor de emisión más alto 2274 gCO₂/kWh, en todas las zonas, incluso superando los 3000 gCO₂/kWh en la zona urbana. Caso atípico ya que supera al factor presentado por Esmeraldas con 10%, que presenta una reducción progresiva entre las ciudades de Esmeraldas e Ibarra, reducción asociada a la reducción de consumo de combustible y el incremento del BTE.

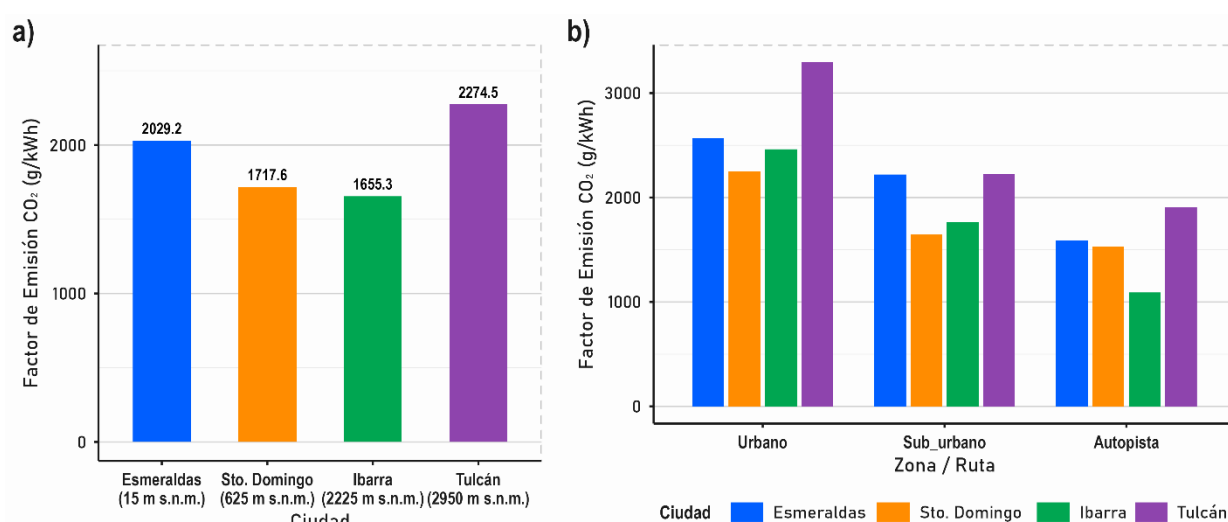


Figura 87. Factores de emisión de CO₂ en términos de Energía de Tracción (Sin Ralentí)

4.4.4 Eficiencia térmica al Freno (Sin Ralentí)

La Figura 88. muestra los valores de eficiencia térmica al freno presentados en las ciudades de estudio, este parámetro muestra un comportamiento diferente a los presentados anteriormente. En este caso en particular el BTE aumenta con el incremento de la altitud, comportamiento

asociado a la reducción de la densidad del aire con la altura, Tulcán presenta valores de eficiencia de 30.9% un 16% mayor al presentado al nivel del mar en donde el consumo de combustible fue el más alto registrado entre las ciudades.

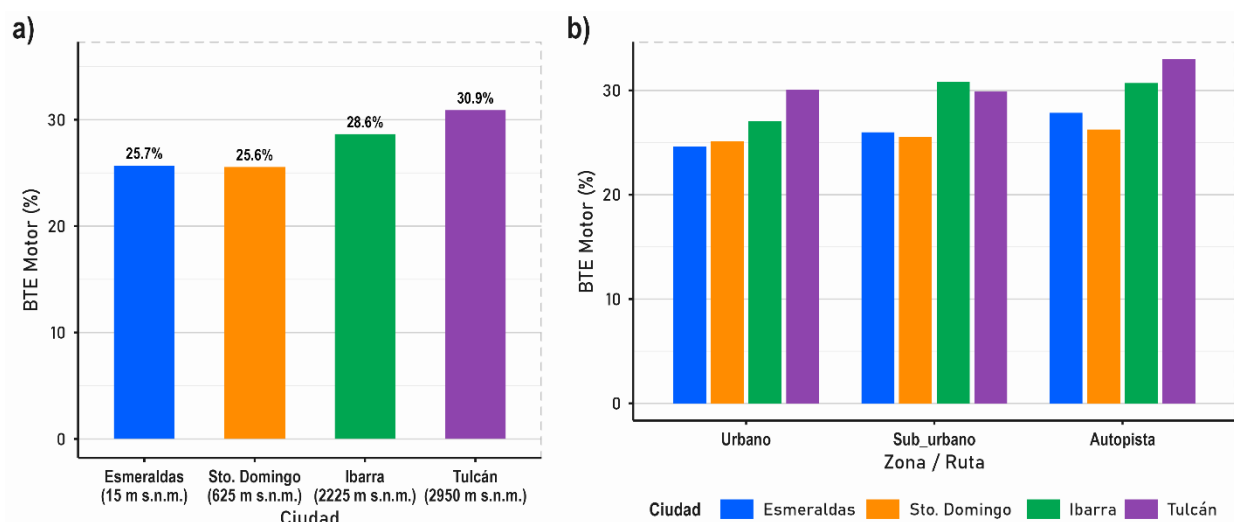


Figura 88. Eficiencia térmica al freno por nivel de altitud (Sin Ralentí)

4.5 Distribución espacial de emisión de CO₂ a diferente altitud

Habiendo cuantificado las tasas de emisión en función de la dinámica del vehículo, resulta imperativo trasladar estos hallazgos numéricos al entorno geográfico real. Razón por la cual se realizó una representación espacial del flujo de CO₂.

Esta representación cartográfica permite, la identificación visual de los patrones de emisión y la localización de puntos críticos o *hotspots* de contaminación a lo largo de la infraestructura vial. A continuación, se analiza el comportamiento espacial de las emisiones, segmentado por los diferentes tramos de operación (urbano, suburbano y autopista) para cada una de las urbes. Este análisis evidencia cómo la interacción entre la topografía, el diseño de las vías y las condiciones de fluidez del tráfico impactan en la huella de carbono distribuida sobre el territorio.

4.5.1 Distribución CO₂ Esmeraldas a 15 m s.n.m.

En la Figura 89. se presenta el comportamiento de las emisiones para la ruta costera de Esmeraldas. Al inspeccionar el tramo urbano, se distingue una predominancia de trazos verdes, generalmente inferiores a los 2.5 g/s. A diferencia de las zonas céntricas evaluadas en las otras ciudades, este trayecto exhibe una mayor continuidad en la coloración de su trazado, con una

notable disminución de puntos de alta emisión aislados. Esto reafirma visualmente el perfil cinemático previamente establecido, lo que responde a que Esmeraldas posee un flujo vehicular más dinámico, con un alto porcentaje de operación en velocidad crucero y menores paradas de tráfico.

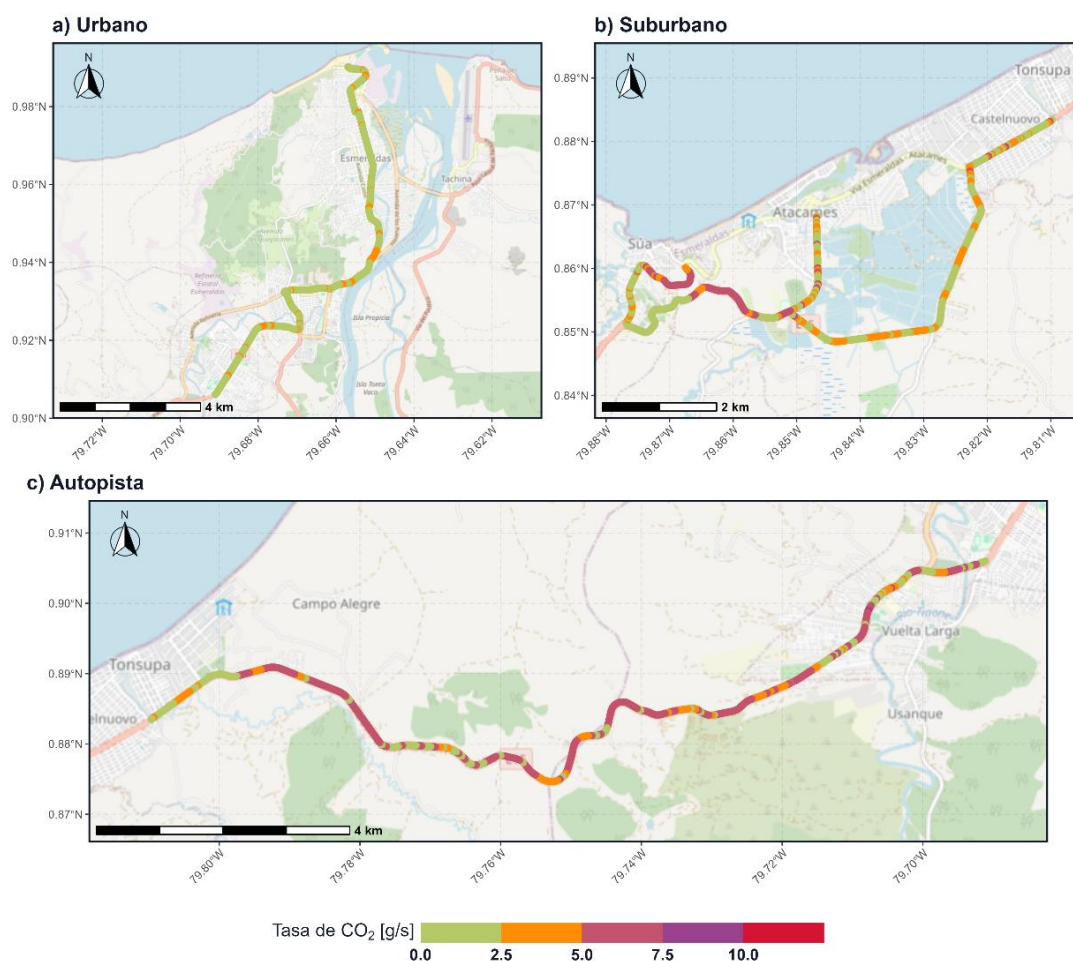


Figura 89. Mapa de calor de las tasas de emisión de CO₂ en los tramos urbano, suburbano y de autopista en Esmeraldas.

Al transitar hacia los sectores turísticos y periféricos, el panel suburbano (que conecta zonas como Tonsupa, Atacames y Súa) revela una dinámica de conducción mucho más exigente. En estas vías, la cartografía adquiere tonalidades anaranjadas y violetas que se extienden a lo largo de varios kilómetros, marcando tasas que oscilan entre los 5.0 y 7.0 g/s. Esta tendencia de alta carga se replica de igual manera en el tramo de autopista, donde el motor debe vencer una mayor resistencia aerodinámica, generando franjas de color rojo que delimitan las zonas de máxima huella ambiental del recorrido.

Un hallazgo importante de este mapa radica en su escala, cuyo límite superior se establece en los 7.5 g/s, llegando a rozar los 8.0 g/s en los escenarios más críticos. Al operar a nivel del mar, el motor aprovecha una eficiencia volumétrica óptima gracias a la alta presión atmosférica y densidad del aire. Para compensar este elevado ingreso de aire y mantener los parámetros estequiométricos, el sistema de inyección suministra una mayor masa de combustible por ciclo. Como resultado termodinámico directo, el vehículo expulsa el flujo másico absoluto de CO₂ más alto registrado entre todas las rutas del estudio.

4.5.2 Distribución CO₂ Santo Domingo a 625 m s.n.m.

En la Figura 90. se expone el comportamiento de las emisiones durante los trayectos recorridos en la ciudad de Santo Domingo. El análisis del tramo urbano revela una marcada intermitencia en el flujo de los gases de escape, caracterizada por extensos segmentos en tonalidades verdes que representan tasas inferiores a los 2.0 g/s. Interrumpiendo estas zonas de baja carga, emergen puntos anaranjados que alcanzan repentinamente valores entre los 4.0 y 6.0 g/s, los cuales ilustran los picos instantáneos de inyección requeridos para arrancar el vehículo desde el reposo en medio del congestionamiento.

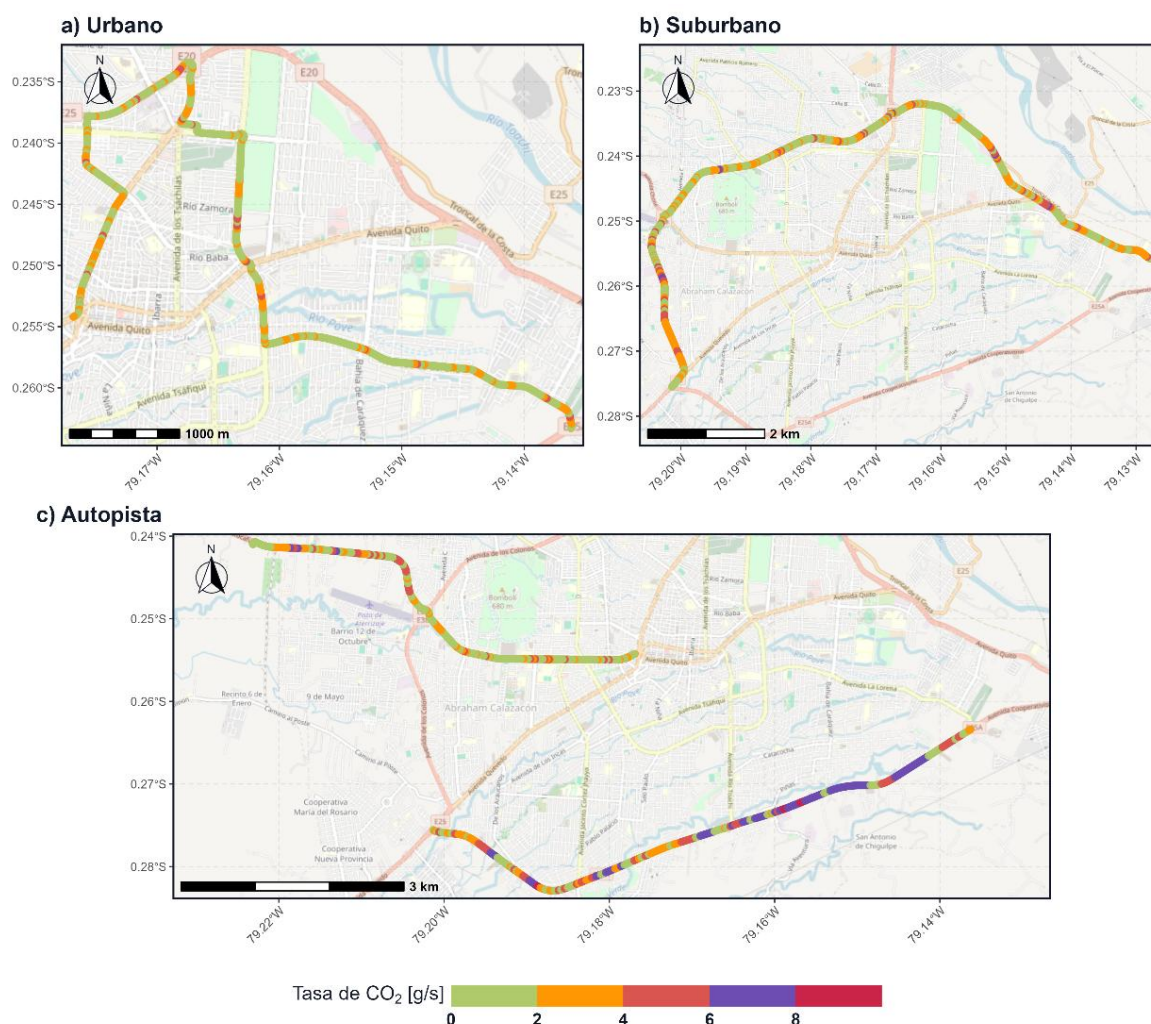


Figura 90. Mapa de calor de las tasas de emisión de CO₂ en los tramos urbano, suburbano y de autopista en Santo Domingo.

En el tramo suburbano, la gráfica exhibe trayectorias donde los colores amarillos y anaranjados comienzan a fusionarse en trazos más largos, denotando una paulatina estabilización de la marcha y una transición hacia velocidades más continuas con tasas que fluctúan frecuentemente entre los 4.0 y 5.0 g/s. Sin embargo, el cambio más drástico de todo el perfil se materializa en los segmentos correspondientes al tramo de autopista. En este sector, las vías se tiñen de manera constante con tonos azules, evidenciando una exigencia prolongada sobre el tren motriz para lograr y mantener altas velocidades frente a la resistencia aerodinámica de la ruta.

A diferencia de los mapas cartográficos de la región interandina, la escala colorimétrica de Santo Domingo presenta una expansión notable en sus límites, con picos de contaminación sostenidos que escalan hasta los 8.0 g/s en las zonas de mayor exigencia de la autopista. Al

ubicarse a una altitud considerablemente menor que Tulcán e Ibarra, el entorno provee una mayor densidad de oxígeno al sistema de admisión. Esta condición permite que la unidad de control electrónico inyecte y queme eficientemente una masa de combustible mayor durante los ciclos de alta demanda de potencia, lo que resulta en un flujo másico de CO₂ superior liberado a la atmósfera.

4.5.3 Distribución CO₂ Ibarra a 2225 m s.n.m.

En la Figura 91. se ilustra la cartografía de emisiones para el recorrido realizado en Ibarra. Al observar el panel del tramo urbano, destaca la densa red cuadriculada característica del centro de la urbe, la cual exhibe una predominancia de color verde a lo largo de las calles, indicando tasas basales que oscilan entre 0 y 1.5 g/s. Visualmente, esto corrobora el congestionamiento y continuas detenciones características de este tramo. Los focos de mayor emisión se presentan de forma muy puntual y aislada, alcanzando valores aproximados de 3 a 4 g/s.

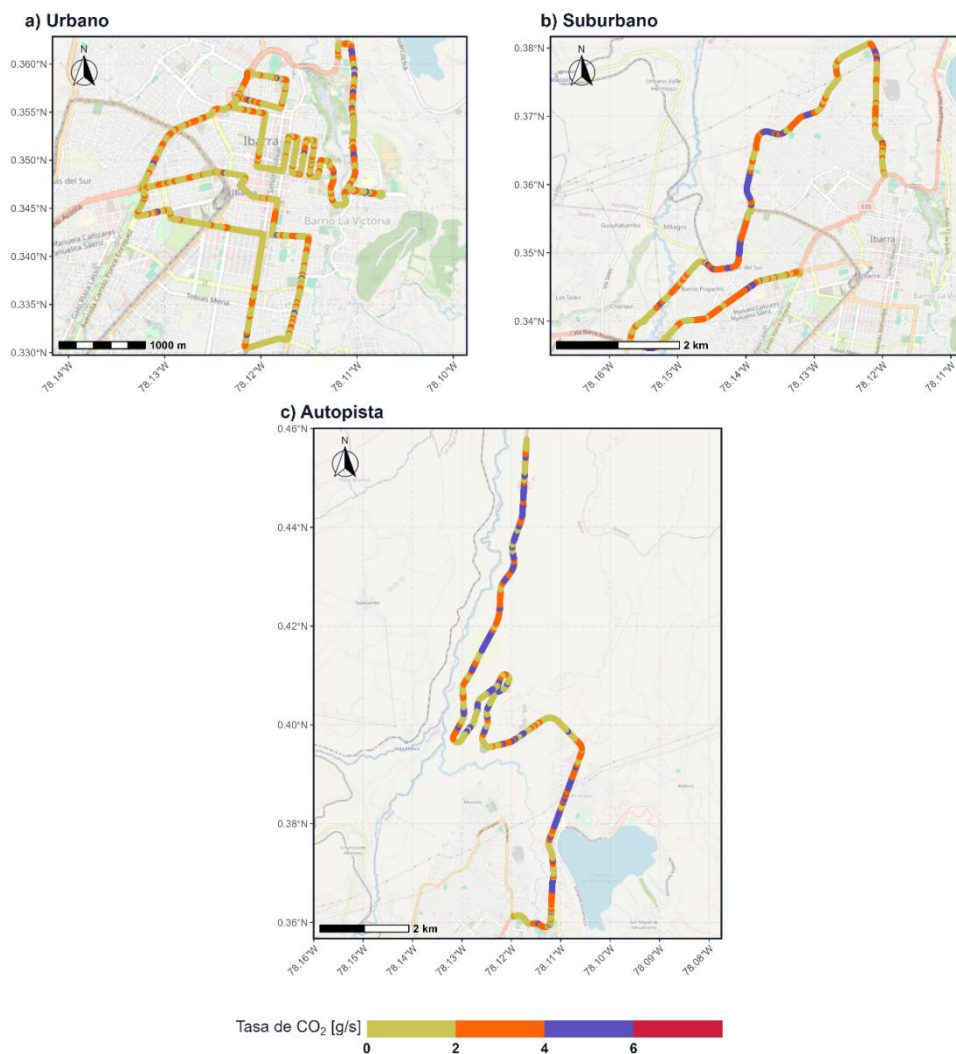


Figura 91. Mapa de calor de las tasas de emisión de CO₂ en los tramos urbano, suburbano y de autopista en Ibarra.

En el tramo suburbano, el trazado muestra segmentos más prolongados con intensidades medias, donde las tasas de emisión fluctúan constantemente entre los 2 y 4 g/s. Por su parte, el tramo de autopista revela una ruta donde la exigencia sobre el tren motriz se eleva de manera sostenida, lo que se refleja en una alta concentración de color anaranjado. En estas zonas de mayor velocidad y exigencia de tracción, los valores superan frecuentemente los 4.5 g/s, marcando los principales picos de contaminación del recorrido. No obstante, la escala demuestra que estos máximos absolutos se contienen en el umbral de los 6.0 g/s en color rojo.

4.5.4 Distribución CO₂ Tulcán a 2950 m s.n.m.

En la Figura 92. se presenta la distribución geográfica de las tasas de emisión instantánea de CO₂ para los tres tramos evaluados en la ciudad de Tulcán. En el panel correspondiente al tramo urbano, se observa un predominio de tonalidades verdes y amarillas. Este patrón visual indica bajas tasas de emisión másica, fuertemente asociadas a velocidades reducidas y tiempos en ralentí, presentando únicamente ligeros incrementos puntuales que coinciden con los arranques necesarios para vencer la inercia en intersecciones.

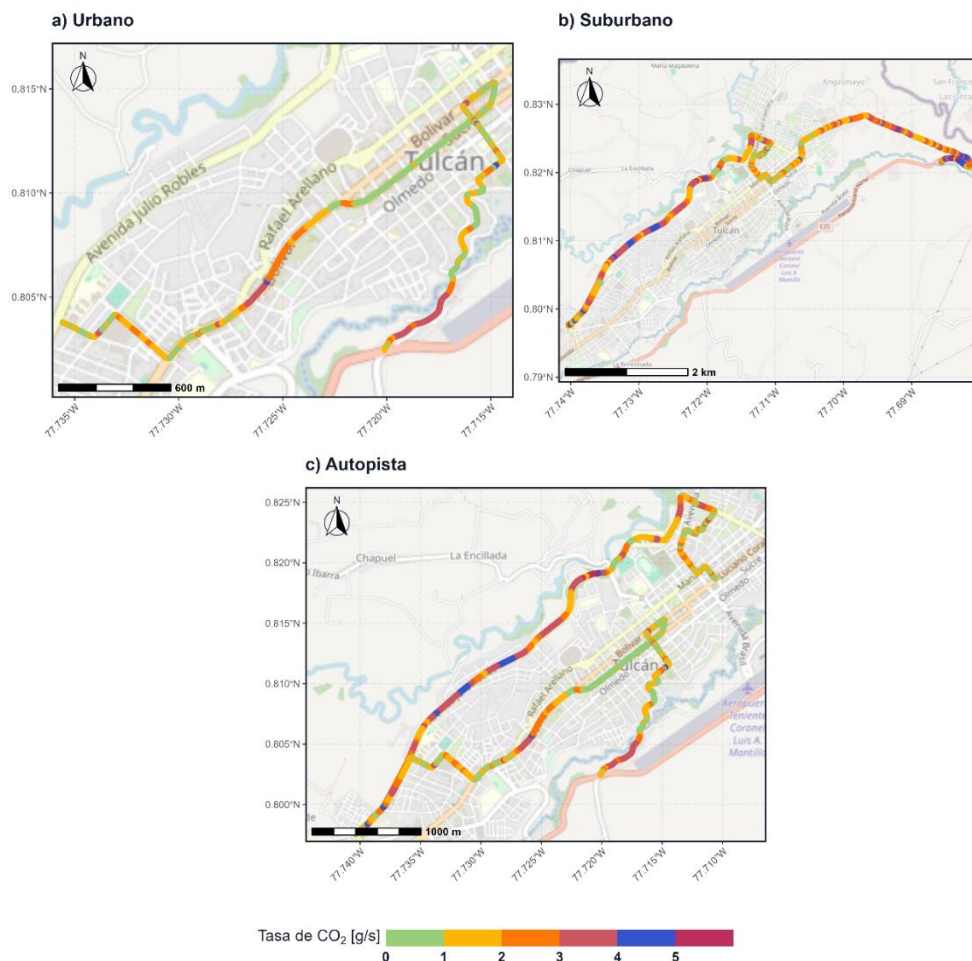


Figura 92. Mapa de calor de las tasas de emisión de CO₂ en los tramos urbano, suburbano y de autopista en Tulcán.

A medida que el vehículo transita hacia el tramo suburbano, bordeando las inmediaciones del aeropuerto local, la gráfica evidencia una mayor presencia de segmentos en tonos anaranjados y rojo. Esta transición refleja un flujo vehicular más dinámico, donde las menores detenciones permiten al motor operar en regímenes de carga parcial y velocidad crucero de forma sostenida. Sin embargo, es en el panel del tramo de autopista donde se localizan los principales *hotspots* o focos de alta emisión de la ruta. En este sector, se aprecian trazados continuos marcados en azul y granate, revelando una demanda de potencia constante y elevada para superar la resistencia aerodinámica propia de las altas velocidades.

4.6 Efecto de la altitud en el consumo y CO₂ bajo un mismo ciclo de conducción

La simulación de consumo de combustible y emisiones de CO₂ a partir de la potencia específica del vehículo permitió obtener las curvas de consumo de combustible mostradas en la Figura 89. Ibarra, la ciudad base para la simulación se representa con color verde y línea continua, Esmeraldas la ciudad con menor altitud del estudio se representa con color Azul, Santo Domingo otra ciudad de la región Costa, se distingue por un color amarillo, mientras que Tulcán la ciudad más alta se muestra con un color magenta, todas las ellas estimadas y por ello representadas con líneas punteadas que permiten identificar de mejor manera las variaciones de las curvas.

4.6.1 Tasa de consumo y CO₂ bajo un mismo ciclo de conducción

En la Figura 93 se muestra una ventana de 1000 segundos, de una simulación en la cual se mantiene las mismas características cinemáticas y de pendiente para todas las ciudades, sin embargo, se diferencian por las características ambientales propias de la altitud de cada ciudad. Esmeraldas muestra un mayor consumo de combustible tanto en las zonas de mayor demanda de potencia como en las zonas de operación en ralentí. Santo Domingo como la segunda ciudad menos alta, sigue la tendencia de Esmeraldas y es la segunda ciudad con mayor consumo de combustible incluso superándola en instantes de alta demanda de potencia. Finalmente, Tulcán tiene una tendencia de consumo similar a Ibarra en zonas de operación en ralentí, sin embargo, se puede ver mayor variación en las zonas de alta demanda de potencia, en donde sobrepasa a Ibarra en ciertos rangos de funcionamiento.

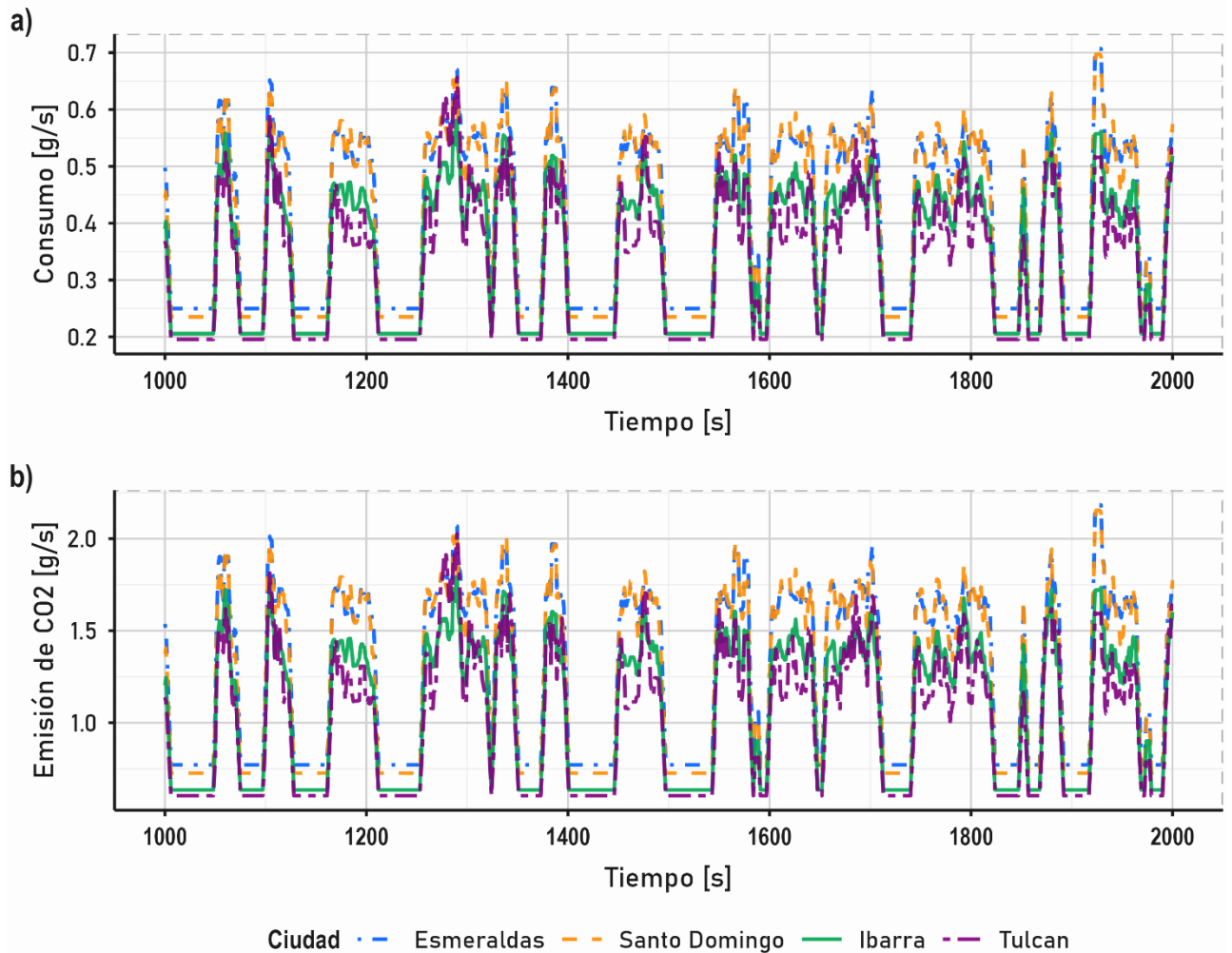


Figura 93. Simulación del consumo de combustible y emisiones de CO₂ bajo condiciones cinemáticas equivalentes a diferentes altitudes, ventana de 1000 s a 2000 s

4.6.2 Factores de consumo y CO₂ bajo un mismo ciclo conducción

La Figura 94b. muestra una tendencia descendente en el factor de emisión en términos de distancia recorrida con el aumento de la altitud, con valores que van entre los 200.5 gCO₂/km y 251.9 gCO₂/km, De la misma manera, el factor de consumo de combustible (Figura 94a), con consumos que van desde 64.9 g/km a 81.6 g/km. Además, se realizó el cálculo del factor de emisión en función de la energía de tracción que va desde 1674.5 gCO₂/kWh a 2050.1 gCO₂/kWh (Figura 94c), lo cual muestra la tendencia de reducción de consumo de combustible con el aumento de la altitud, limitando el funcionamiento del vehículo y lo que nuevamente reafirma lo expuesto en el análisis de VSP en el cual se expone valores de consumo de combustible más altos en la ciudad costera.

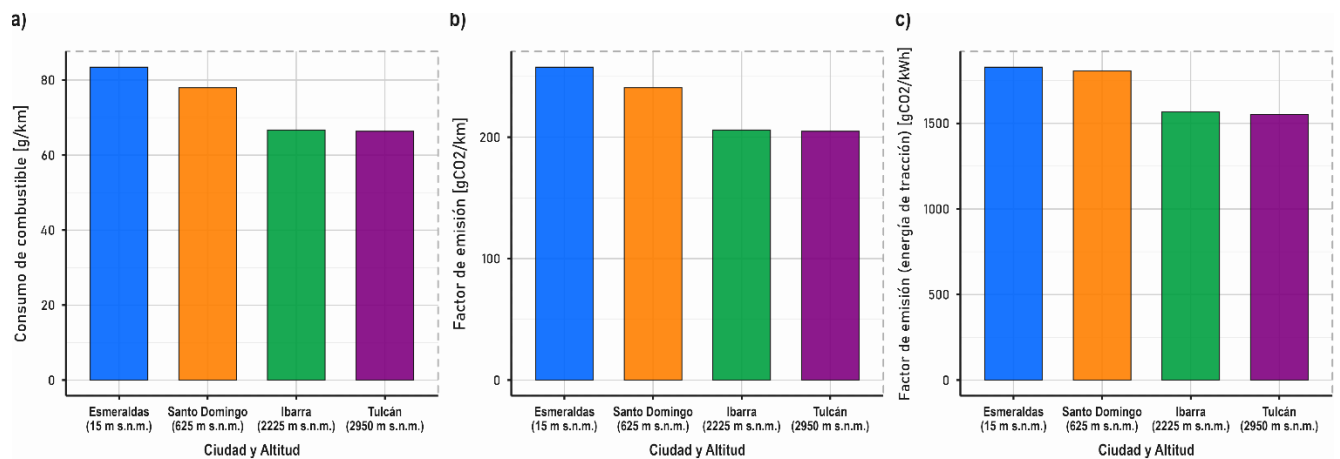


Figura 94. Factores consumo y CO₂ en ciclo conducción

La Tabla 18. muestra los factores de consumo de combustible y emisiones de CO₂ que sirvieron como base para generar la Figura 94.

Tabla 18. Factores de emisión de CO₂ y consumo de combustible simulados

Ciudad	Altitud (m s.n.m.)	Factor de Consumo de combustible (g/km)	Factor de emisión (gCO ₂ /km)	Factor de emisión E. Tracción (gCO ₂ /kWh)
Esmeraldas	15	83.45	257.66	1828.40
Santo Domingo	625	77.95	240.69	1805.79
Ibarra	2225	66.69	205.93	1567.83
Tulcán	2950	66.34	204.83	1551.79

4.6.3 Variación en el consumo y CO₂ bajo un mismo ciclo de conducción

A partir de los valores mostrados en la Tabla 18. Pertenecen a los factores de consumo de combustible y emisiones de CO₂ simulados, los cuales son sintetizados en la Tabla 19, la cual muestra la variación porcentual de los factores de emisión y consumo, teniendo como referencia a Esmeraldas la ciudad del estudio que se encuentra a nivel del mar.

Tabla 19. Variación porcentual de factores de emisión de CO₂ y consumo de combustible.

Variación porcentual (%)				
Ciudad	Altitud (m s.n.m.)	Factor de consumo de combustible (g/km)	Factor de emisión de CO ₂ (g/km)	Factor de emisión de CO ₂ (g/kWh)
Santo Domingo	+625	-6.59 %	-6.59 %	-1.24 %
Ibarra	+2225	-20.08 %	-20.08 %	-14.25 %
Tulcán	+2950	-20.50 %	-20.50 %	-15.13 %

Nota: Todos los valores de variación porcentual se analizaron con relación a la ciudad de Esmeraldas (nivel del mar)

Finalmente, tomando en cuenta a la ciudad de referencia a la ciudad de Esmeraldas, por estar ubicada a nivel del mar, se observa una disminución progresiva tanto en el consumo de combustible como en las emisiones de CO₂ en términos de distancia recorrida. En Santo Domingo se presentó una reducción del 6.59%, mientras que Ibarra y Tulcán alcanzaron reducciones de 20.08% y 20.50% respectivamente. Asimismo, el factor de emisión de CO₂ en términos de energía de tracción presentó reducciones con respecto al presentado a nivel del mar, de 1.24 % en Santo Domingo, 14.25 % en Ibarra y 15.13 % en Tulcán. Reducción que se asocia a las diferencias en las condiciones ambientales y atmosféricas derivadas de la altitud. La disminución de la presión atmosférica con el aumento de la altitud reduce la masa de aire disponible para la combustión, sin embargo, la menor disponibilidad de aire puede limitar la potencia desarrollada por el motor.

CAPÍTULO V

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- La revisión bibliográfica sobre el efecto de la altitud en los motores de encendido provocado muestra que: en la mayoría de los estudios existe un incremento del consumo de combustible a medida que incrementa la altitud, sin embargo, también existen otros estudios que han reportado el efecto contrario. Las discrepancias entre las conclusiones de estos estudios casi siempre están relacionadas a la influencia de otros factores como: la pendiente de la vía, congestión vehicular, estilo de conducción y condiciones ambientales.
- El presente estudio se desarrolló con dos campañas experimentales, la primera se realizó en la ciudad de Riobamba usando un equipo PEMS, en donde se levantaron aproximadamente 6 850 registros, la segunda campaña experimental se desarrolló en las ciudades de Esmeraldas, Santo Domingo, Ibarra y Tulcán, se usó un ELM327 y un CANEdge2 en conjunto con dos flujómetros de combustible, que grabaron registros con frecuencia de 1Hz, lo que permitió capturar las variaciones instantáneas en el funcionamiento del vehículo que facilitó su caracterización mediante ventanas de potencia.
- La comparación de mediciones de consumo de combustible registrados por los tres equipos PEMS, ELM327 y CANEdge2 muestran que, el ELM327 y el CANEdge2 mantienen una correlación mayor, con un coeficiente de 0.90. Sin embargo, presentan un factor de consumo y emisión 8.5% mayor al registrado por el PEMS, lo que sugiere una diferencia tanto en la respuesta dinámica de los registradores ante la demanda de carga, como una diferencia en la precisión y en el principio de medición de cada dispositivo.
- La caracterización mediante VSP mostró un incremento del consumo de combustible conforme aumentó la demanda de potencia del vehículo, con diferencias entre las ciudades evaluadas a distintas altitudes. En los intervalos de VSP negativo, Santo Domingo presentó el mayor consumo en el intervalo 104, con 0.392 g/s, frente a 0.288 g/s de Tulcán, presentando una disminución del 26.5 %, mientras que en el intervalo 204, Esmeraldas registró 0.625 g/s frente a 0.546 g/s en Ibarra, con una disminución

del 12.5 %. Para los intervalos de baja demanda, el consumo alcanzó 0.984 g/s en Esmeraldas y 0.785 g/s en Tulcán en el intervalo 109, con una disminución del 20.2 %; en el intervalo 209, Esmeraldas presentó 1.114 g/s frente a 0.905 g/s en Ibarra, con una disminución del 18.7 %. Las mayores diferencias se obtuvieron en alta demanda, donde Esmeraldas alcanzó 1.568 g/s en el intervalo 113 y 1.809 g/s en el 213, frente a 1.023 g/s y 1.331 g/s en Ibarra, con reducciones del 34.7 % y 26.4 %, respectivamente. Las emisiones de CO₂ siguieron el mismo comportamiento del consumo, con diferencias porcentuales prácticamente equivalentes debido a la relación estequiométrica de la mezcla y a que el CO₂ es un producto directo de la quema de combustible. Por tanto, las mayores diferencias entre las ciudades se presentaron cuando el vehículo requirió mayores niveles de potencia, donde las condiciones asociadas a la altitud tuvieron una mayor incidencia sobre el consumo de combustible.

- Para evitar la influencia de otros factores como la pendiente o la congestión vehicular, el presente estudio estimó el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ utilizando el enfoque VSP para un mismo ciclo de conducción, luego de realizar la simulación con el modelo empírico basado en los datos obtenidos en las campañas experimentales se logró determinar que Esmeraldas una ciudad costera, alcanzó un consumo de combustible de 81.6 g/km y un factor de emisión de 251.9 gCO₂/km, 6 % mayores que el consumo y el factor de emisión presentados en la ciudad de Santo Domingo y un 22% mayor que las ciudades de la región interandina que tiene un consumo de 64.9 g/km y un factor de emisión de 200.5 gCO₂/km. Cabe destacar que el modelo usado tiene limitantes frente a la disminución en el rango operacional del vehículo con el aumento de la altitud.

5.2 Recomendaciones

- En un futuro trabajo que se desee evaluar el efecto de la altitud se sugiere estructurar un diseño experimental donde de cierta forma se pueda atenuar o controlar el efecto de otros factores tales como la congestión vehicular, el estilo de conducción y las condiciones ambientales, debido a que podrían llevar a sesgos en los factores de consumo de combustible y emisiones de CO₂. Llegando a ser más influyentes en los resultados que la variación de altitud.

- Sería importante para futuros trabajos, usar el equipo PEMS en más ciudades con diferentes altitudes para evaluar las emisiones de CO₂ con mayor precisión, de la misma manera se debería usar equipos de medición física de flujo de combustible diseñados para gasolina, y que cuenten con mayor precisión en el registro de mediciones, además de emplear rutas RDE para mejorar la calidad de los datos registrados.
- Ampliar la toma de datos en rangos de velocidad superiores a 80 km/h, complementando los intervalos de 0–40 y 40–80 km/h analizados, debido a que los registros disponibles en este rango no fueron suficientes para representar adecuadamente su comportamiento. Esto permitiría caracterizar con mayor detalle la relación entre VSP, velocidad, consumo de combustible y emisiones de CO₂ en condiciones de mayor velocidad. Para futuros estudios, se recomienda aplicar este análisis en diferentes tipos de vehículos, como SUV, camionetas, motocicletas y autobuses, con el propósito de comparar su comportamiento bajo distintas condiciones de operación.
- Para futuros estudios, se podría ampliar el análisis a otras emisiones contaminantes, como CO, NO_x e hidrocarburos, así como evaluar combustibles de diferentes octanajes para comparar el comportamiento del vehículo a distintas altitudes y condiciones de conducción. Esto permitiría analizar las diferencias en el consumo de combustible y las emisiones según la altitud y el tipo de combustible. También podría considerarse el desarrollo de ciclos de conducción estandarizados para cada ciudad, basados en sus perfiles de velocidad, para comparar el consumo y las emisiones bajo condiciones de conducción representativas de cada localidad.

Referencias Bibliográficas

- 3DATX. (2026). *parSYNC® FLEX-PNC* . <https://www.3datx.com/parsync-flex-pnc/>
- AEADE. (2018). *Anuario* 2018. <https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2019/03/Anuario%202018.pdf>
- AEADE. (2025). *BOLETIN-VENTAS_PRENSA_MARZO-2025*. <https://www.aeade.net/>
- Aguirre Ospina, S. (2023). *Modelado y simulación de la dinámica de vehículos en Simulink* [Trabajo de grado , Universidad Tecnológica de Pereira]. <https://hdl.handle.net/11059/15430>
- Ahmadi, P., Torabi, S. H., Afsaneh, H., Sadegheih, Y., Ganjehsarabi, H., & Ashjaee, M. (2020). The effects of driving patterns and PEM fuel cell degradation on the lifecycle assessment of hydrogen fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(5), 3595–3608. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.01.165>
- Alcázar Vargas, M. G., Pérez Fernández, I. J., Carabias Acosta, E., Cabrera Carrillo, J. A., & Castillo Aguilar, J. J. (2021). Estimación de la resistencia a la rodadura en neumáticos mediante banco de ensayos de traccióncompresión. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 25(1), 61–66. <https://doi.org/10.5944/RIBIM.25.1.42196>
- Alonso, J. M. (2005). *Técnicas del AUTOMOVIL INYECCION DE GASOLINA Y DISPOSITIVOS ANTICONTAMINANTES* (2° Edicion).
- Andia-Vargas, J. M., Salinas-Rojas, M., Lafuente, R. O., & Sempértegui-Tapia, D. F. (2023). ESTADO DEL ARTE SOBRE LA INFLUENCIA DE MEZCLAS ETANOL-GASOLINA EN EL DESEMPEÑO DE MOTORES DE COMBUSTION INTERNA. *Revista Investigación & Desarrollo*, 23(1), 93–106. <https://doi.org/10.23881/IDUPBO.023.1-71>
- Antonio, A. R., & Muñoz Domínguez, M. (2016). *Motores de combustion interna*. UNED - Universidad Nacional de Educacion a Distancia. <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/48846>
- Arias Cuasapaz, D. E. (2025). *ANÁLISIS DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE UN VEHÍCULO EN CONDICIONES DE TRÁFICO REAL A DIFERENTES ALTITUDES*. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/16848>
- Armas Vergel, O., Ballesteros Yáñez, R., Benajes Calvo, J., Bermúdez Tamarit, V., Broatch Jacobi, A., Casanova Kindelán, J., Climent Puchades, H., Desantes Fernández, J. M., Galindo Lucas, J., García Oliver, J. M., Giménez Olavarría, B., Guardiola García, C., Hernández Adrover, J. J., Horrillo Güemes, A., Lapuerta Amigo, M., Lecuona Neumann, A., López Sánchez, J. J., Luján Martínez, J. M., Macián Martínez, V., ... Valdés del Fresno, M. (2011). *Motores de combustión interna alternativos* (F. Payri & J. M. Desantes, Eds.; Vol. 5). Reverté S.A. www.reverte.com
- Barbosa Saldana, J., & Gutierrez Torres, C. (2016). *Termodinamica para ingenieros*. Grupo Editorial Patria. <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/40432>
- Bellott Carlos, Valderrama Carolina, Nina Edelmira, Benavides Edgar, García Fernando, Blanc Francesca, Torres Gloria, Bascopé Haydeé, Loayza Jancarla, Bacotich Josip, Rivera Juan Ramón, Mermet Luciana, Bellott Manolo, Calle Vania, Zambrano Pamela, & Borja Renzo. (2023). *Lo urbano y la urbanización en Bolivia: problemáticas y desafíos*. https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-06/desarrollo_urbano_celeste_plomizo_baja.pdf#page=289
- Brady, J., & O'Mahony, M. (2016). Development of a driving cycle to evaluate the energy economy of electric vehicles in urban areas. *Applied Energy*, 177, 165–178. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.05.094>
- Builes-Jaramillo, A., Valencia-Aroyave, D., Muñoz-Duque, M. A., Hoyos-Restrepo, C. A., & Ramírez Muñoz, A. (2015). Modelo para la estimación de emisiones vehiculares como

- herramienta para la gestión ambiental institucional. *Producción + Limpia*, 10(1), 22–39. <https://doi.org/10.22507/PML.V10N1A2>
- Cazorla Espinoza, Y. S. (2022). *ESTIMACIÓN DE UNA RUTA REPRESENTATIVA PARA LA CIUDAD DE QUITO SEGÚN LA METODOLOGÍA DEL CICLO DE EMISIONES REALES RDE*. Universidad Politécnica Salesiana .
- Champutiz Rodríguez, A. F., & Cuyago Loyola, L. D. (2024). *Comparación de la eficiencia de combustible entre diferentes modelos de taxi basado en el enfoque de potencia específica del vehículo. Caso de estudio Ibarra*. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/16679>
- Chevrolet. (2019). *Chevrolet Aveo Family* . <https://www.chevrolet.com.ec/content/dam/chevrolet/south-america/ecuador/espanol/index/cars/2019-aveo/mov/02-pdfs/aveo-family-ficha-tecnica.pdf>
- CONALI, & SNI. (2023, October 19). *Sistema Nacional de Información*. SHP de La División Política de Ecuador.
- CSS Electronics. (2026). *CANedge2: 2x CAN Bus Data Logger (SD + WiFi + GPS/IMU) – CSS Electronics*. <https://www.csselectronics.com/products/can-bus-data-logger-wifi-canedge2-gnss-imu#void>
- DieselNet. (2025). *Estándares de emisiones del motor*. <https://dieselnet.com/standards/>
- Escudero, S., Gonzalez, J., & Rivas, J. L. (2024a). *Motores*. Macmillan Iberia, S.A. <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/267612>
- Escudero, S., Gonzalez, J., & Rivas, J. L. (2024b). *Motores*. Macmillan Iberia, S.A. <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/267612>
- European Environment Agency. (2016). *Explaining road transport emissions : a non-technical guide*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2800/71804>
- Fraija B, I. (2006). Estudio de la aerodinámica en los vehículos . *Prospectiva* , 4(2), 66–70. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49625110801>
- Harrison, R. M., Allan, J., Carruthers, D., Heal, M. R., Lewis, A. C., Marner, B., Murrells, T., & Williams, A. (2021). Non-exhaust vehicle emissions of particulate matter and VOC from road traffic: A review. *Atmospheric Environment*, 262, 118592. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118592>
- Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. www.mhprofessional.com
- INEC. (2015). *Vehículos Matriculados – Serie Histórica 2008-2014* |. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/vehiculos-matriculados-serie-historica-2008-2014/>
- INEN. (2008). *Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 017*.
- INEN. (2017). *GESTIÓN AMBIENTAL AIRE VEHÍCULOS AUTOMOTORES LÍMITES PERMITIDOS DE EMISIONES PRODUCIDAS POR FUENTES MÓVILES TERRESTRES QUE EMPLEAN GASOLINA*. www.normalizacion.gob.ec
- International Sustainable Systems Research Center. (2008). *Manual del Usuario del Modelo IVE Versión 2.0*. <https://www.issrc.org/ive/downloads/manuals/UsersManual%28sp%29.pdf>
- Jimenez Bernal, J. A., & Gutierrez Torres, C. del C. (2015). *Termodinámica*. Grupo Editorial Patria. <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/39466>
- Keller, J. K. (2014). A Cost Effective Method to Create Accurate Engine Performance Maps & Updating the Nebraska Pumping Plant Performance Criteria. *Biological Systems Engineering at DigitalCommons@University of Nebraska - Lincoln*. <http://digitalcommons.unl.edu/biosysengdiss/40>
- Lapuerta, M., Armas, O., Agudelo, J. R., & Sánchez, C. A. (2006). Study of the altitude effect on internal combustion engine operation. Part 1: Performance. *Informacion Tecnológica* , 17(5).

- https://www.researchgate.net/publication/285966603_Study_of_the_altitude_effect_on_internal_combustion_engine_operation_Part_1_Performance/references
- Li, J., Ge, Y., Wang, X., & Zhang, M. (2022). Evaporative emission characteristics of high-mileage gasoline vehicles. *Environmental Pollution*, 303, 119127. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119127>
- Lovera, D., Osses, M., Nikila, N., Nuñez, D., Valentín, L., Mayor, G., Valdivia, H., & Vera, S. (2004). THE IVE MODEL: METHODOLOGY, MEASUREMENTS AND SIMULATION OF EMISSIONS FROM MOBILE SOURCES IN THE CITY OF LIMA-PERU. *Revista Del Instituto de Investigación FIGMMG*, 7(14), 92–99. https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol7_n14/a12.pdf
- Lucero Durán, W. M., & Vintimilla León, A. S. (2024). *OBTENCIÓN DE UN CICLO DE CONDUCCIÓN REPRESENTATIVO DEL CANTÓN CUENCA BASADO EN LA RECOLECCIÓN DE DATOS DE VEHÍCULOS CATEGORÍA M1 QUE CIRCULAN DE MANERA ALEATORIA*. Universidad Politécnica Salesiana .
- Martín Blas, T., Serrano Fernández, A., & Gómez de Quero, L. S. (2025a). *Ciclo de Otto*. <https://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/termo2p/otto.html>
- Martín Blas, T., Serrano Fernández, A., & Gómez de Quero, L. S. (2025b). *Ciclo de Otto*. <https://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/termo2p/otto.html>
- Mera, Z., Varella, R., Baptista, P., Duarte, G., & Rosero, F. (2022). Including engine data for energy and pollutants assessment into the vehicle specific power methodology. *Applied Energy*, 311. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118690>
- Merlo, G. (2023, April 11). *Por qué el transporte de bajas emisiones es clave para América Latina y el Caribe | UNDP Climate Promise*. <https://climatepromise.undp.org/es/news-and-stories/por-que-el-transporte-de-bajas-emisiones-es-clave-para-america-latina-y-el-caribe>
- MIÑO ENRÍQUEZ, J. A., & VILLAFUERTE NOBOA, F. D. (2023). *COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE CO2 DE LOS AUTOBUSES URBANOS DE LA CIUDAD DE IBARRA PARA LOS ESCENARIOS PRE Y POST COVID-19 APLICANDO EL ENFOQUE DE MODELIZACIÓN VSP* [UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE]. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/14849>
- Montúfar, P., Cuisano, J., Huertas, I., Quinga, M., & Lopez, S. (2023). ANALYSIS OF THE ROLE OF ALTITUDE AND TEMPERATURE ON THE PERFORMANCE OF THE IGNITION INTERNAL COMBUSTION ENGINE USED FOR LIGHT VEHICLE PROPULSION. *Russian Law Journal*, 11(8s), 8. <https://doi.org/10.52783/RLJ.V11I8S.1427>
- Motahari, S., & Chitsaz, I. (2019). Effects of altitude and temperature on the performance and efficiency of turbocharged direct injection gasoline engine. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 12(6), 1825–1836. <https://doi.org/10.29252/JAFM.12.06.29862>
- Muñoz, M., Morante, R., García, S., Díaz, J., Herrera, M., Becerra, J., Luna, G., Vásconez, S., Barrera, K., Moncayo, V., Melo, P., Caza, P., Mendieta, P., Pazmiño, M., Calderón, P., & Yépez, M. (2023). *Política Nacional de Movilidad Urbana Sostenible del Ecuador* . <https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/10/Politica-Nacional-de-Movilidad-Urbana-Sostenible-del-Ecuador-2023.pdf>
- Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. www.issuu.com/publicacionescepal/stacks
- Narváez Espinosa, K. A., & Narváez Sosa, A. M. (2023). *Desarrollo de ruta de ensayo RDE en el cantón Ibarra* [Universidad Técnica del Norte]. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13662>
- Panesso Riveros, J. S. (2012). *CARACTERIZACION DE LA DINAMICA LONGITUDINAL DE UN VEHICULO PARA DIFERENTES CONDICIONES VIALES COLOMBIANAS*

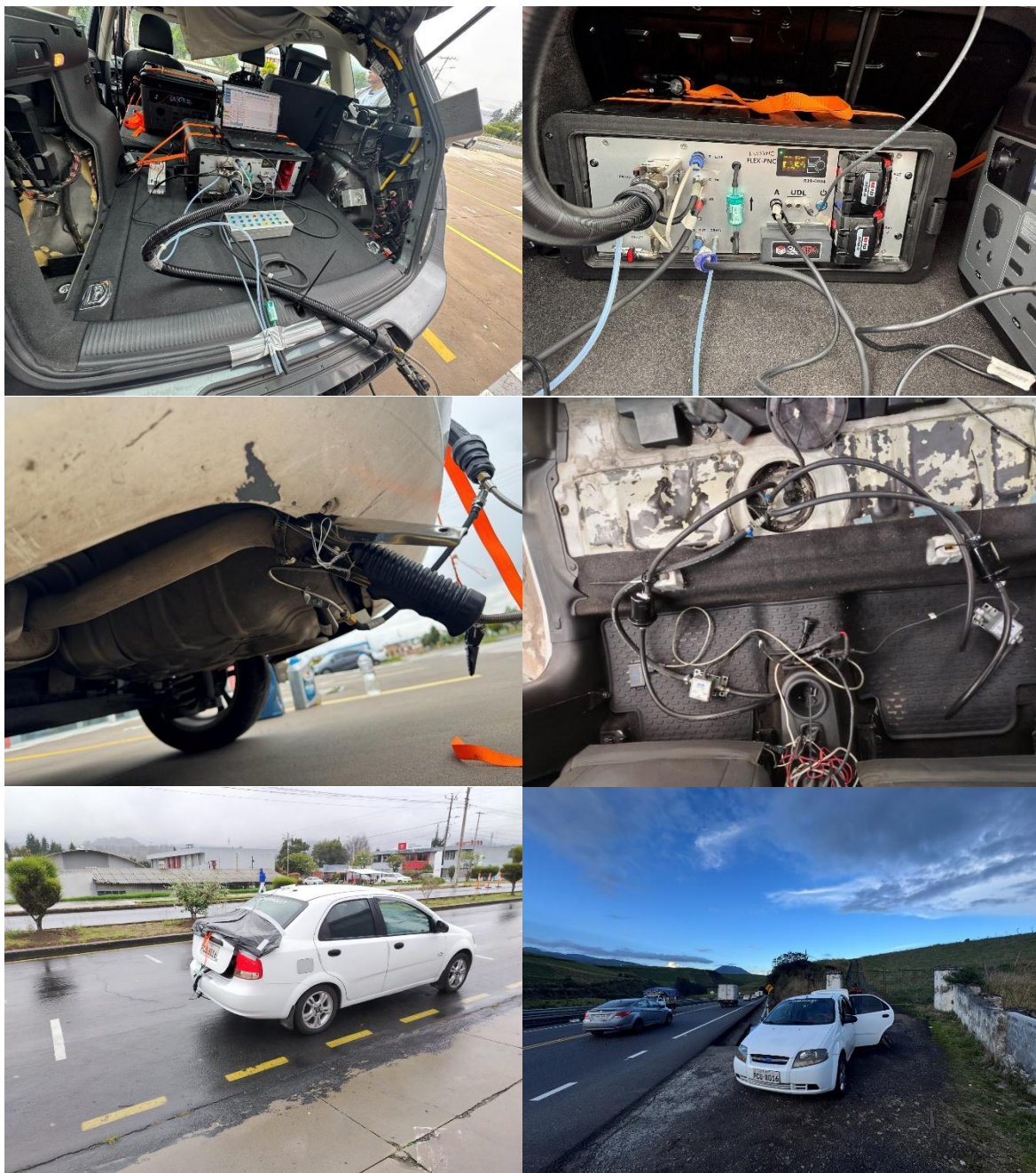
- [Universidad de los Andes]. moz-extension://f79dcc31-8f1c-4b1b-9a04-3144c529381d/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2F repositorio.uniandes.edu.co%2Fserver%2Fapi%2Fcore%2Fbitstreams%2Fceec2e9f-17a6-44ae-a9f5-f637864543a7%2Fcontent
- Park, J., Seo, J., & Park, S. (2023). Development of vehicle emission rates based on vehicle-specific power and velocity. *Science of The Total Environment*, 857, 159622. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.159622>
- Payri, F., & Desantes, J. M. (2011a). *Motores de combustión interna alternativos*. www.reverte.com
- Payri, F., & Desantes, J. M. (2011b). *Motores de combustión interna alternativos*. www.reverte.com
- Prieto-Mostacero, K. A., Ordoñez Luera, I. S., & Fernandez Rojas, J. H. (2023). Emisiones vehiculares mediante modelo dinámico de sistemas en la carretera Central en la ciudad de Lima - Perú noviembre 2020. *Inge CuC*, 19(1), 71–88–71–88. <https://doi.org/10.17981/INGECUC.19.1.2023.07>
- Qi, Z., Gu, M., Cao, J., Zhang, Z., You, C., Zhan, Y., Ma, Z., & Huang, W. (2023). The Effects of Varying Altitudes on the Rates of Emissions from Diesel and Gasoline Vehicles Using a Portable Emission Measurement System. *Atmosphere*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/atmos14121739>
- Ramírez Morales, J. (2017). *Estudio de la dinámica de tracción de un vehículo eléctrico* [Universidad Tecnológica de Pereira]. <https://hdl.handle.net/11059/8533>
- Robotics. (2026). *SCANNER AUTOMOTRIZ V2.1 ELM327 BLUETOOTH NEGRO*. <https://roboticsec.com/producto/scanner-automotriz-v2-1-elm327-bluetooth-negro/>
- Rodríguez García, J. I., & Villar Paúl, J. (2024). *Sistemas de transmissió i frenada* (1st ed.). Macmillan Iberia, S.A. <https://elibro.net/es/ereader/utnorte/267620>
- Rosero, F. (2021). *Understanding the effects of traffic congestion on emissions from urban buses. An integrated approach incorporating real-world emissions, naturalistic driving profiles, and city traffic sensor data*. <https://doi.org/https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.67390>
- Rosero, F., Rosero, C. X., & Segovia, C. (2024). Towards Simpler Approaches for Assessing Fuel Efficiency and CO2 Emissions of Vehicle Engines in Real Traffic Conditions Using On-Board Diagnostic Data. *Energies*, 17(19). <https://doi.org/10.3390/en17194814>
- Rosero Obando, F., Rosero, X., & Mera, Z. (2024). Developing Fuel Efficiency and CO2 Emission Maps of a Vehicle Engine Based on the On-Board Diagnostic (OBD) Approach. *Enfoque UTE*, 15(1), 7–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.29019/enfoqueute.1002>
- Salazar Sabas, O. A., & Betanzo Quezada, E. (2023). Development of a driving cycle based on commercial vehicles and pollutant emissions. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 39, 105–115. <https://doi.org/10.20937/RICA.54386>
- Schölzel Urchueguía, J. F., & Oliver-Villanueva, J.-V. (2024). *Movilidad sostenible. Volumen 1 - Métodos de estimación de emisiones* (J. F. Schölzel Urchueguía, E. L. Saéz, & H. M. Gómez Gutiérrez, Eds.; 1st ed., Vol. 1). Editorial Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/CLI.2024.678901>
- Secretaría Nacional de Planificación. (2024). *Plan de Desarrollo para el Nuevo Ecuador 2024-2025 – Secretaría Nacional de Planificación*. Plan de Desarrollo Para El Nuevo Ecuador 2024-2025. <https://www.planificacion.gob.ec/plan-de-desarrollo-para-el-nuevo-ecuador-2024-2025/>
- Shah, I. H., Manzoor, M. A., Jinhui, W., Li, X., Hameed, M. K., Rehaman, A., Li, P., Zhang, Y., Niu, Q., & Chang, L. (2024). Comprehensive review: Effects of climate change and greenhouse gases emission relevance to environmental stress on horticultural crops and

- management. *Journal of Environmental Management*, 351, 119978. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119978>
- Tan, D., Tan, J., Liu, M., Xu, H., & Ge, Y. (2025). A combined vehicle specific power and laboratory emissions approach to real driving CO₂ emission estimation for light-duty vehicle. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104265>
- TECHNOTON. (2026). *Medidor de flujo de combustible DFM*. <https://jv-technoton.com/es/productos/dfm/>
- Tipanluisa, L., Barros-Merchán, N. P., & Melo-Arteaga, Á. M. (2024). Análisis de potencia-específica-vehicular y grado de la carretera en una ciudad a gran altitud. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (114), 32–39. <https://doi.org/10.17533/UDEA.REDIN.20240726>
- Tu, R., Xu, J., Wang, A., Zhang, M., Zhai, Z., & Hatzopoulou, M. (2022). Real-world emissions and fuel consumption of gasoline and hybrid light duty vehicles under local and regulatory drive cycles. *Science of The Total Environment*, 805, 150407. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150407>
- UNECE. (2013). *Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be fitted and/or be used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these Prescriptions*.
- UNECE. (2024). *Concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these United Nations Regulations*.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2019). Emissions Factor Uncertainty Assessment. *US Environmental Protection Agency*, 10(9), 108. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2019>
- Varas Ponce, L. L., Baltodano Nontol, L. A., & Gálvez Carrillo, R. (2022). EMISIÓN DE GASES VEHICULARES Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD DEL AIRE. *Advances in Science and Innovation*, 1(1), 119–132. <https://doi.org/10.61210/ASI.V1I1.11>
- Villegas, A. M. (2007). *MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA*.
- Wang, J., Wang, L., Li, J., Li, J., Xu, F., Han, F., He, J., Chen, Q., & Chen, X. (2025). RDE & dynamometer analysis of light-duty vehicle emissions across altitudes, temperatures, and driving styles. *PLoS ONE*, 20(3 March). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318298>
- Wang, Y., Ge, Y., Wang, J., Wang, X., Yin, H., Hao, L., & Tan, J. (2020). Impact of altitude on the real driving emission (RDE) results calculated in accordance to moving averaging window (MAW) method. *Fuel*, 277, 117929. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.117929>
- Wellbots. (2025). *Estación de energía portátil OUKITEL P2001 Plus*. <https://www.wellbots.com/es/products/oukitel-p2001-plus-portable-power-station?srsId=AfmBOoqwJADUTvB5yqKWgiR7WYT2YXv9xENQeUcC2C0xSAiH7dsVr3VG>
- WWF. (2020, July 26). *¿Por qué los Andes son esenciales para nuestra salud y la del planeta?* | WWF. <https://www.wwf.org.co/?364410/Por-que-los-Andes-son-esenciales-para-nuestra-salud-y-la-del-planeta>
- Zervas, E. (2011). Impact of altitude on fuel consumption of a gasoline passenger car. *Fuel*, 90(6), 2340–2342. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2011.02.004>
- Zhao, X., Zhao, X., Yu, Q., Ye, Y., & Yu, M. (2020). Development of a representative urban driving cycle construction methodology for electric vehicles: A case study in Xi'an.

Transportation Research Part D: Transport and Environment, 81.
<https://doi.org/10.1016/J.TRD.2020.102279>

Anexos

ANEXO 1. EQUIPO DE MEDICION PEMS MONTADO EN EL VEHICULO DE PRUEBA (CAMPAÑA EXPERIMENTAL EN RIOBAMBA)



ANEXO 2. SEGUNDA CAMPAÑA EXPERIMENTAL (CIUDADES A DIFERENTE ALTITUD)



ANEXO 3. CONFIGURACIÓN DEL CANEDGE2 (DOS COLUMNAS)

```

{
  "general": {
    "device": {
      "meta": "AlmeidaColoma"
    },
    "security": {},
    "debug": {
      "syslog": 1,
      "restart_timer": 120
    }
  },
  "log": {
    "file": {
      "split_size": 50,
      "split_time_period": 0,
      "split_time_offset": 0,
      "cyclic": 1
    },
    "compression": {
      "level": 0
    },
    "encryption": {
      "state": 0
    },
    "error_frames": {
      "state": 1
    }
  },
  "rtc": {
    "sync": 3,
    "timezone": -5,
    "adjustment": 0,
    "tolerance": 15,
    "message": {
      "chn": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "0",
      "id_mask": "7FF"
    },
    "valid_signal": {
      "type": 0,
      "byteorder": 1,
      "bitpos": 1,
      "length": 1,
      "factor": 1,
      "offset": 0
    },
    "time_signal": {
      "type": 0,
      "byteorder": 1,
      "bitpos": 8,
      "length": 40,
      "factor": 0.001,
      "offset": 1577840400
    }
  },
  "secondaryport": {
    "power_schedule": []
  },
  "can_internal": {
    "general": {
      "rx_state": 1,
      "tx_state": 1
    }
  },
  "filter": {
    "id": [
      {
        "name": "Heartbeat",
        "state": 0,
        "type": 0,
        "id_format": 0,
        "method": 0,
        "f1": "2",
        "f2": "2",
        "prescaler_type": 0
      },
      {
        "name": "TimeCalendar",
        "state": 0,
        "type": 0,
        "id_format": 0,
        "method": 0,
        "f1": "3",
        "f2": "3",
        "prescaler_type": 0
      },
      {
        "name": "TimeExternal",
        "state": 0,
        "type": 0,
        "id_format": 0,
        "method": 0,
        "f1": "5",
        "f2": "5",
        "prescaler_type": 0
      },
      {
        "name": "GnssStatus",
        "state": 1,
        "type": 0,
        "id_format": 0,
        "method": 0,
        "f1": "65",
        "f2": "65",
        "prescaler_type": 0
      },
      {
        "name": "GnssTime",
        "state": 1,
        "type": 0,
        "id_format": 0,
        "method": 0,
        "f1": "66",
        "f2": "66",
        "prescaler_type": 0
      },
      {
        "name": "GnssPosition",
        "state": 1,
        "type": 0,
        "id_format": 0,
        "method": 0,
        "f1": "67",
        "f2": "67",
        "prescaler_type": 0
      },
      {
        "name": "GnssAltitude",

```

```

"state": 1,
"type": 0,
"id_format": 0,
"method": 0,
"f1": "68",
"f2": "68",
"prescaler_type": 0
},
{
"name": "GnssAttitude",
"state": 1,
"type": 0,
"id_format": 0,
"method": 0,
"f1": "69",
"f2": "69",
"prescaler_type": 0
},
{
"name": "GnssDistance",
"state": 1,
"type": 0,
"id_format": 0,
"method": 0,
"f1": "6A",
"f2": "6A",
"prescaler_type": 0
},
{
"name": "GnssSpeed",
"state": 1,
"type": 0,
"id_format": 0,
"method": 0,
"f1": "6B",
"f2": "6B",
"prescaler_type": 0
},
{
"name": "GnssGeofence",
"state": 1,
"type": 0,
"id_format": 0,
"method": 0,
"f1": "6C",
"f2": "6C",
"prescaler_type": 0
},
{
"name": "ImuAlign",
"state": 1,
"type": 0,
"id_format": 0,
"method": 0,
"f1": "6E",
"f2": "6E",
"prescaler_type": 0
},
{
"name": "ImuAcc",
"state": 1,
"type": 0,
"id_format": 0,
"method": 0,
"f1": "6F",
"f2": "6F",
"prescaler_type": 0
}
}
],
},
"control": {
"control_rx_state": 0,
"control_tx_state": 0,
"start": {
"message": {
"chn": 0,
"id_format": 0,
"id": "0",
"id_mask": "7FF"
},
"signal": {
"type": 0,
"byteorder": 0,
"bitpos": 0,
"length": 0,
"factor": 0,
"offset": 0
},
"trigger_high": 0,
"trigger_low": 0
},
"stop": {
"message": {
"chn": 0,
"id_format": 0,
"id": "0",
"id_mask": "7FF"
},
"signal": {
"type": 0,
"byteorder": 0,
"bitpos": 0,
"length": 0,
"factor": 0,
"offset": 0
},
"trigger_high": 0,
"trigger_low": 0
}
},
"can_1": {
"general": {
"rx_state": 1,
"tx_state": 1
},
"phy": {
"mode": 0,
"retransmission": 1,
"fd_spec": 1,
"bit_rate_cfg_mode": 1,
"bit_rate_std": 500000,
"bit_rate_fd": 1000000
},
"filter": {
"remote_frames": 0,
"id": [
{
"name": "AllStandardID",
"state": 1,
"type": 0,
"id_format": 0,
"method": 0,
"f1": "0",

```

```

        "f2": "7FF",
        "prescaler_type": 0
    },
    {
        "name": "AllExtendedID",
        "state": 1,
        "type": 0,
        "id_format": 1,
        "method": 0,
        "f1": "0",
        "f2": "1FFFFFFF",
        "prescaler_type": 0
    }
    ],
    "transmit": [],
    "control": {
        "control_rx_state": 0,
        "control_tx_state": 0,
        "start": {
            "message": {
                "chn": 1,
                "id_format": 0,
                "id": "0",
                "id_mask": "7FF"
            },
            "signal": {
                "type": 0,
                "byteorder": 1,
                "bitpos": 0,
                "length": 0,
                "factor": 0,
                "offset": 0
            },
            "trigger_high": 0,
            "trigger_low": 0
        },
        "stop": {
            "message": {
                "chn": 0,
                "id_format": 0,
                "id": "0",
                "id_mask": "7FF"
            },
            "signal": {
                "type": 0,
                "byteorder": 1,
                "bitpos": 0,
                "length": 0,
                "factor": 0,
                "offset": 0
            },
            "trigger_high": 0,
            "trigger_low": 0
        }
    },
    "can_2": {
        "general": {
            "rx_state": 1,
            "tx_state": 1
        },
        "phy": {
            "mode": 0,
            "retransmission": 1,
            "fd_spec": 1,
            "bit_rate_cfg_mode": 1,
            "bit_rate_std": 250000,
            "bit_rate_fd": 1000000
        },
        "filter": {
            "remote_frames": 0,
            "id": [
                {
                    "name": "AllStandardID",
                    "state": 1,
                    "type": 0,
                    "id_format": 0,
                    "method": 0,
                    "f1": "0",
                    "f2": "7FF",
                    "prescaler_type": 0
                },
                {
                    "name": "AllExtendedID",
                    "state": 1,
                    "type": 0,
                    "id_format": 1,
                    "method": 0,
                    "f1": "0",
                    "f2": "1FFFFFFF",
                    "prescaler_type": 0
                }
            ]
        },
        "transmit": [],
        "control": {
            "control_rx_state": 0,
            "control_tx_state": 0,
            "start": {
                "message": {
                    "chn": 2,
                    "id_format": 0,
                    "id": "0",
                    "id_mask": "7FF"
                },
                "signal": {
                    "type": 0,
                    "byteorder": 1,
                    "bitpos": 0,
                    "length": 0,
                    "factor": 0,
                    "offset": 0
                },
                "trigger_high": 0,
                "trigger_low": 0
            },
            "stop": {
                "message": {
                    "chn": 2,
                    "id_format": 0,
                    "id": "0",
                    "id_mask": "7FF"
                },
                "signal": {
                    "type": 0,
                    "byteorder": 1,
                    "bitpos": 0,
                    "length": 0,
                    "factor": 0,
                    "offset": 0
                },
                "trigger_high": 0,
                "trigger_low": 0
            }
        }
    }
}

```

```

    }
  }
},
"lin_1": {
  "phy": {
    "mode": 0,
    "bit_rate": 19200
  }
},
"lin_2": {
  "phy": {
    "mode": 0,
    "bit_rate": 19200
  }
},
"connect": {
  "wifi": {
    "mode": 0,
    "keyformat": 0,
    "accesspoint": []
  }
},
"protocol": 0,
"s3": {
  "sync": {
    "ota": 600,
    "heartbeat": 300,
    "logfiles": 1
  }
}

```

```

  },
  "server": {
    "request_style": 0,
    "keyformat": 0,
    "signed_payload": 0
  }
},
"gnss": {
  "system": 5,
  "invalid_signals": 0,
  "alignment": {
    "method": 0,
    "z": 0,
    "y": 0,
    "x": 0
  },
  "geofence": [],
  "dyn_model": 4,
  "sensor_fusion": 1
}
}

```

ANEXO 4. CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES DE CO₂ SEGÚN EL INTERVALO DE VSP REGISTRADOS POR LOS 3 EQUIPOS DE MEDICION EN LA CIUDAD DE RIOBAMABA.

Intervalo VSP	Cons_PEMS	Cons_Flujometro	Cons_OBD	CO ₂ _PEMS	CO ₂ _Flujometro	CO ₂ _OBD
VSP < -4	0.3207	0.2083	0.3722	0.9902	0.6433	1.1495
-4 ≤ VSP < -2	0.3391	0.2882	0.4017	1.0473	0.8899	1.2405
-2 ≤ VSP < -1	0.3684	0.3318	0.4090	1.1377	1.0245	1.2630
-1 ≤ VSP < 0	0.3309	0.3135	0.4012	1.0218	0.9682	1.2388
0 ≤ VSP < 1	0.2690	0.2492	0.2868	0.8306	0.7697	0.8857
1 ≤ VSP < 2	0.4317	0.4451	0.5049	1.3330	1.3746	1.5590
2 ≤ VSP < 4	0.4927	0.5380	0.5787	1.5214	1.6614	1.7869
4 ≤ VSP < 6	0.6274	0.7512	0.7792	1.9373	2.3195	2.4062
6 ≤ VSP < 8	0.7653	0.9014	0.8946	2.3631	2.7834	2.7624
8 ≤ VSP < 10	1.0271	1.1729	1.0534	3.1714	3.6216	3.2526
10 ≤ VSP < 12	1.2291	1.3660	1.0955	3.7951	4.2179	3.3828
12 ≤ VSP < 14	1.3076	1.5603	1.2648	4.0377	4.8179	3.9054
VSP ≥ 14	1.3948	1.7420	1.4508	4.3068	5.3789	4.4798

Nota. Los valores de FC y CO₂ se encuentran en gramos por segundo (g/s)

ANEXO 5. CONSUMO INSTANTÁNEO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES DE CO₂ SEGÚN EL INTERVALO DE VSP.

Intervalo VSP	Esmeraldas		Sto. Domingo		Ibarra		Tulcán	
	FC	CO ₂	FC	CO ₂	FC	CO ₂	FC	CO ₂
VSP < -4	0.524	1.618	0.427	1.318	0.385	1.189	0.368	1.136
-4 ≤ VSP < -2	0.493	1.522	0.427	1.318	0.349	1.079	0.347	1.072
-2 ≤ VSP < -1	0.447	1.381	0.440	1.357	0.358	1.106	0.325	1.004
-1 ≤ VSP < 0	0.433	1.338	0.386	1.192	0.338	1.044	0.308	0.950
0 ≤ VSP < 1	0.345	1.064	0.306	0.945	0.258	0.795	0.254	0.784
1 ≤ VSP < 2	0.579	1.787	0.576	1.778	0.465	1.435	0.466	1.439
2 ≤ VSP < 4	0.704	2.173	0.681	2.103	0.598	1.847	0.601	1.856
4 ≤ VSP < 6	0.893	2.756	0.818	2.527	0.728	2.249	0.784	2.420
6 ≤ VSP < 8	1.091	3.370	0.980	3.025	0.876	2.703	0.856	2.642
8 ≤ VSP < 10	1.288	3.976	1.183	3.654	0.983	3.035	0.986	3.043
10 ≤ VSP < 12	1.442	4.452	1.271	3.924	1.156	3.568	1.112	3.434
12 ≤ VSP < 14	1.642	5.070	1.321	4.078	1.252	3.865	1.203	3.715
VSP ≥ 14	1.868	5.769	1.764	5.448	1.382	4.268	1.367	4.220

Nota. Los valores de FC y CO₂ se encuentran en gramos por segundo (g/s)

**ANEXO 6. CONSUMO INSTANTÁNEO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES DE CO₂
POR BIN DE VSP**

Bin VSP	Esmeraldas		Sto. Domingo		Ibarra		Tulcán	
	FC (g/s)	CO ₂ (g/s)	FC (g/s)	CO ₂ (g/s)	FC (g/s)	CO ₂ (g/s)	FC (g/s)	CO ₂ (g/s)
0	0.471	1.453	0.391	1.208	0.318	0.983	0.343	1.059
1	0.256	0.791	0.241	0.746	0.209	0.644	0.200	0.618
101	0.380	1.174	0.390	1.204	0.314	0.970	0.299	0.922
102	0.391	1.207	0.387	1.195	0.326	1.008	0.293	0.906
103	0.399	1.233	0.395	1.220	0.330	1.019	0.291	0.900
104	0.391	1.209	0.392	1.210	0.324	1.001	0.288	0.888
105	0.429	1.324	0.446	1.376	0.370	1.143	0.348	1.074
106	0.512	1.581	0.538	1.660	0.435	1.344	0.412	1.273
107	0.628	1.938	0.642	1.984	0.557	1.719	0.517	1.597
108	0.806	2.488	0.787	2.430	0.675	2.084	0.741	2.287
109	0.984	3.039	0.936	2.889	0.823	2.541	0.785	2.423
110	1.073	3.314	1.060	3.273	0.831	2.565	0.935	2.886
111	1.134	3.502	1.138	3.513	0.993	3.065	1.032	3.186
112	1.343	4.146	1.232	3.803	1.103	3.406	0.971	2.999
113	1.568	4.841	1.475	4.554	1.023	3.159	1.088	3.359
201	0.521	1.607	0.488	1.507	0.396	1.224	0.416	1.283
202	0.568	1.754	0.552	1.703	0.458	1.413	0.514	1.588
203	0.563	1.739	0.544	1.681	0.489	1.508	0.546	1.686
204	0.625	1.931	0.559	1.727	0.546	1.686	0.574	1.773
205	0.652	2.012	0.627	1.935	0.536	1.655	0.608	1.877
206	0.688	2.124	0.617	1.905	0.549	1.694	0.666	2.057
207	0.773	2.386	0.732	2.261	0.673	2.077	0.732	2.260
208	0.914	2.821	0.847	2.617	0.768	2.373	0.832	2.570
209	1.114	3.439	1.002	3.093	0.905	2.795	0.917	2.832
210	1.285	3.968	1.207	3.727	1.033	3.188	1.014	3.131
211	1.452	4.485	1.305	4.030	1.193	3.683	1.152	3.556
212	1.635	5.049	1.363	4.210	1.254	3.871	1.250	3.860
213	1.809	5.585	1.748	5.398	1.331	4.109	1.391	4.295

Nota. Los valores de FC y CO₂ se encuentran en gramos por segundo (g/s)