



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y OPACIDAD
DE GASES EN UN MOTOR DIÉSEL CRDi CON RESPECTO A LA ALTURA
GEOGRÁFICA DE LA CIUDAD DE CUENCA Y A NIVEL DEL MAR**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Automotriz

AUTORES: EDISON FERNANDO IDROVO GUAMAN

OSCAR FERNANDO VARGAS ORELLANA

TUTOR: ING. CHRISTIAN OMAR PULLA MOROCHO, MSc

Cuenca - Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Edison Fernando Idrovo Guamán con documento de identificación N° 0302980347 y Oscar Fernando Vargas Orellana con documento de identificación N° 0350161352; manifestamos que:

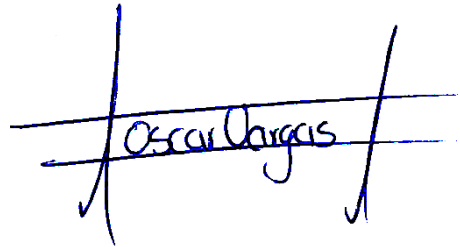
Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 14 de julio de 2025

Atentamente,



Edison Fernando Idrovo Guamán
0302980347



Oscar Fernando Vargas Orellana
0350161352

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACION DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Edison Fernando Idrovo Guamán con documento de identificación N° 0302980347 y Oscar Fernando Vargas Orellana con documento de identificación N° 0350161352, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Análisis comparativo del consumo de combustible y opacidad de gases en un motor diésel CRDi con respecto a la altura geográfica de la ciudad de Cuenca y a nivel del mar”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

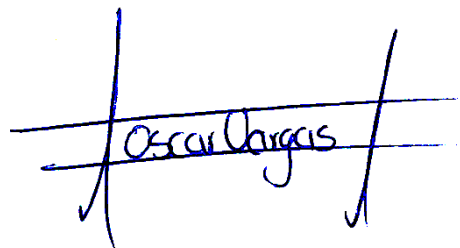
En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 14 de julio de 2025

Atentamente,



Edison Fernando Idrovo Guamán
0302980347



Oscar Fernando Vargas Orellana
0350161352

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Christian Omar Pulla Morocho con documento de identificación N° 0103570602, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y OPACIDAD DE GASES EN UN MOTOR DIÉSEL CRDi CON RESPECTO A LA ALTURA GEOGRÁFICA DE LA CIUDAD DE CUENCA Y A NIVEL DEL MAR, realizado por Edison Fernando Idrovo Guamán con documento de identificación N° 0302980347 y por Oscar Fernando Vargas Orellana con documento de identificación N° 0350161352, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 14 de julio del 2025

Atentamente,



Ing. Christian Omar Pulla Morocho, MSc.

0103570602

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado con especial amor a mi madre, por ser una inspiración constante y una guía en cada paso que he doy en la búsqueda de ser mejor persona y profesional. Por su apoyo incondicional, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles, y por su amor, sacrificio y esfuerzo incansables para sacarme adelante.

A mi abuelita, por su amor incondicional, sus sabios consejos y la sabiduría que me acompaña en cada decisión.

También dedico este logro a mis familiares, quienes han estado presentes en cada etapa de este camino, brindándome ánimo y fortaleza.

Y a mis amigos, por estar siempre ahí, en los buenos y en los malos momentos, compartiendo alegrías, retos y enseñanzas.

Este trabajo es también de ustedes.

Edison Fernando Idrovo Guamán

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, con todo el amor, respeto y gratitud que habita en mí, primeramente, a Dios, por haber sido mi guía constante, mi refugio en los momentos de incertidumbre y la fuerza que me sostuvo cuando flaqueé. Gracias por no soltarme nunca y por permitirme alcanzar este logro que hoy representa una meta cumplida.

A mis padres, por ser el pilar de mi formación y la inspiración de mi esfuerzo. Con su ejemplo de lucha, responsabilidad y amor incondicional, me enseñaron que el camino al éxito se recorre con humildad, constancia y fe. Sin ustedes, nada de esto sería posible.

A mis hermanos Dany, Frank y Anthony, quienes han caminado junto a mí en esta etapa con su apoyo y compañía. En especial a Frank, quien desde la distancia ha sido una luz en mi vida; aunque esté lejos físicamente, su presencia, sus consejos, y el ejemplo que ha sido para mí, han sido fundamentales en mi crecimiento. Lo extraño profundamente, pero en cada paso que doy llevo presente todo lo que me enseñó. Gracias a él y a mis padres, entendí el valor del estudio, del trabajo y de la superación, y por eso hoy soy quien soy.

Y como no a mis abuelos, quienes con su sabiduría, cariño y enseñanzas dejaron en mí huellas imborrables. A quienes ya no están, los llevo en mi corazón, celebrando este logro junto a ellos desde lo más profundo de mi alma.

Finalmente, dedico este esfuerzo a todas aquellas personas que, de una u otra manera, han creído en mí. Familiares, amigos, compañeros: cada palabra de aliento, cada gesto sincero, cada momento compartido, fue parte de este camino. Este triunfo no me pertenece solo a mí, sino a todos quienes caminaron a mi lado y jamás dejaron de confiar en que este sueño podía hacerse realidad.

Oscar Fernando Vargas Orellana

AGRADECIMIENTO

Agradezco, en primer lugar, a Dios, por ser mi fortaleza en los momentos de incertidumbre, por brindarme sabiduría y salud durante todo este proceso, y por permitirme llegar hasta aquí con fe, esperanza y determinación. Cada paso ha sido guiado por Su voluntad, y este logro es una muestra de Su infinita gracia.

A mi madre, mi ejemplo de vida, gracias por ser mi mayor inspiración. Por tu amor incondicional, tu esfuerzo incansable y tu fe en mí, incluso cuando yo dudaba. Tu sacrificio y dedicación han sido la base de todo lo que soy. Este logro no es solo mío, es también tuyo, porque sin ti, nada de esto sería posible.

A mi padrastro, quien ha sido más que un padre para mí. Gracias por estar presente en los momentos clave, por tu guía, tus consejos sabios y por enseñarme con tu ejemplo el valor de la responsabilidad, la humildad y la constancia. Tu apoyo ha sido fundamental para que pueda mantenerme firme en este camino.

A mi hermana, por ser esa presencia constante, una luz en mi camino, espero le sirva de ejemplo de que todo se puede lograr. Gracias por ser una fuente de motivación y por caminar a mi lado con amor y complicidad. Sin cada uno de ustedes, este logro no habría sido posible.

Edison Fernando Idrovo Guamán

AGRADECIMIENTO

Hoy, al culminar una de las etapas más significativas de mi vida académica, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que fueron parte fundamental de este camino.

En primer lugar, agradezco a Dios, por ser mi guía constante, por sostenerme en los momentos de incertidumbre y por darme la fortaleza para superar cada desafío.

A mis padres, Bolívar Vargas Y Marialeti Orellana por su amor incondicional, esfuerzo incansable y apoyo firme en cada paso. Gracias por enseñarme a luchar con humildad y a nunca rendirme. A mis hermanos, por su cercanía, compañía y palabras de aliento; su presencia ha sido un pilar en este logro. A mis abuelos, por haber sembrado en mí valores esenciales como el respeto, el trabajo honesto y la fe en el conocimiento.

Un reconocimiento especial al Ingeniero Christian Omar Pulla Morocho, M.Sc., tutor de esta tesis, por su guía paciente, sus

enseñanzas y su compromiso constante durante el desarrollo de este proyecto. Asimismo, expreso mi profundo agradecimiento al Ingeniero Jimmy, por compartir su experiencia y conocimientos técnicos que fueron claves para alcanzar este resultado.

No puedo dejar de mencionar a mi tío John Vargas, cuya generosa colaboración con el vehículo fue determinante para la ejecución de las pruebas prácticas. Sin su apoyo, este trabajo no habría podido materializarse de la forma en que se logró.

Gracias también a toda mi familia Vargas Orellana y a mis compañeros, amigos y docentes que, con su apoyo y confianza, contribuyeron con motivación, ideas y compañía durante este trayecto académico.

Este logro no es solamente mío, sino también de todos aquellos que creyeron en mí y caminaron a mi lado quedo eternamente agradecido con todos.

Oscar Fernando Vargas Orellana

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se centra en la evaluación del rendimiento energético y ambiental de una camioneta Mitsubishi L200 con tecnología diésel Common Rail Direct Injection (CRDi), mediante pruebas prácticas realizadas en dos regiones del Ecuador: Guayaquil, al nivel del mar, y Cuenca, situada a más de 2.500 metros sobre el nivel del mar. Adicionalmente, se incluyó un recorrido intermedio por el Parque Nacional El Cajas, superando altitudes de 4.000 msnm, con el fin de observar el comportamiento del sistema de inyección en condiciones extremas.

El análisis técnico consideró variables clave como el consumo específico de combustible, la opacidad de los gases de escape, la velocidad promedio, la carga del vehículo y la variación altitudinal. Las pruebas permitieron determinar que el rendimiento del motor diésel se ve comprometido en zonas de gran altitud, donde la menor disponibilidad de oxígeno obliga al sistema CRDi a modificar la estrategia de inyección, generando un aumento del consumo de combustible por kilómetro recorrido.

En cuanto a las emisiones, la opacidad de los gases mostró escasa variación entre regiones, lo cual se atribuye al buen estado mecánico y electrónico del vehículo, así como al adecuado mantenimiento del sistema de inyección y sensores. Sin embargo, el comportamiento de las emisiones contaminantes a gran altitud, en combinación con velocidades elevadas, reflejó un incremento de CO₂, lo que evidencia la necesidad de ajustes operativos en flotas que transitan rutas andinas. Esta investigación ofrece fundamentos sólidos para optimizar el uso de vehículos diésel en entornos de topografía variable y mejorar la gestión técnica de emisiones en zonas urbanas y rurales.

Palabras clave: Mitsubishi L200, CRDi, consumo de combustible, altitud geográfica, opacidad, emisiones, motor diésel.

ABSTRACT

This research focuses on the evaluation of energy efficiency and environmental behavior of a Mitsubishi L200 pickup truck equipped with a Common Rail Direct Injection (CRDi) diesel engine, through real-world testing conducted in two Ecuadorian regions with distinct altitudes: Guayaquil, at sea level, and Cuenca, located above 2,500 meters. Additionally, a supplementary route was conducted through El Cajas National Park, reaching elevations over 4,000 meters above sea level, to observe engine behavior under extreme altitude conditions.

The experimental methodology assessed key variables such as specific fuel consumption, exhaust gas opacity, average driving speed, engine load, and altitude variation. Results indicate that engine performance is affected at higher elevations, where reduced oxygen availability forces the CRDi system to adjust injection parameters, leading to increased fuel usage per kilometer.

Regarding emissions, opacity levels showed minimal variation between the coastal and highland regions, attributed to the optimal mechanical and electronic condition of the vehicle, as well as proper maintenance of its injection system and sensors. However, emission behavior at high altitudes, especially under increased speed conditions, revealed elevated CO₂ output, highlighting the operational challenges faced by diesel-powered vehicles on mountainous routes. This study provides valuable technical insights for improving diesel vehicle management in topographically diverse areas and enhancing environmental control strategies in urban and interprovincial transport operations.

Keywords: Mitsubishi L200, CRDi system, fuel consumption, altitude, opacity, emissions, diesel engine performance.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	XXII
PROBLEMA DE ESTUDIO	XXIII
Antecedentes.....	XXIV
Importancia y Alcances	XXV
Delimitación	XXV
OBJETIVOS.....	XXVIII
OBJETIVO GENERAL	XXVIII
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	XXVIII
CAPÍTULO I.....	29
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	29
1.1 Introducción al sistema CRDi	29
1.2 Breve historia del sistema y evolución	30
1.3 Comparación con sistemas de inyección diésel anteriores.....	32
1.4 Componentes clave del sistema CRDi	34
1.4.2 Bomba de alimentación	35
1.4.3 Filtro de combustible.....	36
1.4.5 Riel común.....	37
1.4.6 Inyectores	38
1.4.7 Sistema de retorno y válvula de alivio	39
1.5 Ventajas del sistema CRDi.....	39
1.6 Gestión electrónica del motor: ECU, sensores y actuadores relevantes.....	40
1.6.1 Sensor de masa de aire (MAF):	40
1.6.2 Sensor de presión absoluta del múltiple (MAP):.....	40
1.6.3 Sensor de temperatura del refrigerante (ECT):.....	40

1.6.4 Sensor de posición del cigüeñal (CKP) y del árbol de levas (CMP):	41
.....	41
1.6.5 Sensor de presión del riel (RPS):.....	41
1.6.6 Sensor de temperatura del combustible:.....	41
1.6.7 Sensor de oxígeno (O2) o sonda lambda:.....	41
1.6.8 Sensor de presión del turbo (BPS):	41
1.6.9 Inyectores electromagnéticos o piezoeléctricos:	41
1.6.10 Válvula de dosificación de la bomba de alta presión (IMV):.....	41
1.6.11 Válvula de recirculación de gases de escape (EGR):	41
1.6.12 Actuador del turbocompresor de geometría variable (VGT):	41
1.7 Factores que influyen en el consumo y emisiones en motores diésel	42
1.8 Condiciones de operación: carga, temperatura, altitud.....	43
1.9 Calidad del Combustible	44
1.10 Estado mecánico y electrónico del motor.....	44
1.11 Influencia de la altitud geográfica	45
1.12 Efecto de la presión atmosférica sobre la combustión	46
1.13 Modificaciones de rendimiento en altura	46
1.14 Respuesta del sistema CRDi ante variaciones de altitud.....	47
1.15 Ajustes automáticos de inyección.....	47
1.16 Limitaciones del sistema en zonas de gran altitud	48
1.17 Normativas técnicas y ambientales	49
1.18 NTE INEN 2202.....	50
1.19 Normativa Euro 4 y otras referencias internacionales.....	51
CAPÍTULO II.....	53

RECOLECCIÓN EXPERIMENTAL DE DATOS DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y OPACIDAD DE GASES EN DIFERENTES ALTITUDES	53
2.1 Instrumentos y equipos utilizados	53
2.1.1 Medidor de Flujo de Combustible AIC 5004 Fuelflowmaster	53
2.1.2 Opacímetro MAHA MDO (Maschinenbau Haldenwang).....	53
2.2 Equipos Electrónicos de Diagnóstico	54
2.2.1 Escáner Automotriz LAUNCH X431 PRO	54
2.3 Materiales Complementarios para la Instalación	54
2.4 Procesos y protocolos de medición	55
2.5 Preparación Previa de Equipos y Materiales	56
2.6 Instalación del Sistema AIC 5004 Fuelflowmaster	56
2.6.1 Conexión del circuito de alimentación (ida):	57
2.6.2 Conexión del circuito de retorno:	57
2.7 Instalación del Opacímetro MAHA MDO 2 LON	57
2.8 Conexión y Lectura con Escáner Automotriz LAUNCH.....	57
2.9 Validación Final del Sistema.....	58
2.10 Diagrama de flujo del proceso experimental para la recolección de datos de consumo y opacidad en motor CRDi a distintas altitudes.....	58
2.11 Vehículo utilizado para las pruebas de consumo y opacidad	59
2.11.1 Mitsubishi L200 2022 4x2 MT.....	59
2.12 Determinación de rutas	60
2.13 Recolección de datos	63
2.13.1 Datos del consumo de combustible a 2.560 msnm.....	63
2.13.2 Recolección de los datos del consumo de combustible en Guayaquil	73

2.14 Gráficas obtenidas de la opacidad según la altura geográfica.....	83
2.15 Gráfica de opacidad en la ciudad de Cuenca.....	83
2.16 Gráfica de la opacidad a nivel del mar	84
CAPÍTULO III	86
ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y OPACIDAD EN RELACIÓN CON LA ALTURA GEOGRÁFICA	86
3. 1 Análisis comparativo entre las altitudes geográficas entre las dos ciudades	86
3.2 Análisis de las variaciones de las velocidades	89
3.3 Análisis comparativo del consumo de combustible	92
3.4 Análisis comparativo de la opacidad de gases	93
3.4.1 Opacidad vs temperatura del aceite	94
3.4.2 Opacidad vs RPM.....	94
3.5 Relación Altitud – Velocidad	96
3.6 Emisiones contaminantes	100
CONCLUSIONES.....	104
RECOMENDACIONES	105
BIBLIOGRAFÍA	106
ANEXOS	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de la ciudad de Cuenca	XXVI
Figura 2 Mapa de la ciudad de Guayaquil.....	XXVII
Figura 3 Diagrama de un sistema de inyección Common rail	34
Figura 4 Tanque de combustible	35
Figura 5 Bomba de combustible diésel de baja presión	36
Figura 6 Filtro de combustible	36
Figura 7 Bomba de alta presión.....	37
Figura 8 Riel común	38
Figura 9 Inyector Denso	38
Figura 10 Válvula de alivio	39
Figura 11 Sensores y actuadores del sistema Common Rail.....	42
Figura 12 Esquema de instalación del AIC 5004	56
Figura 13 Diagrama de flujo del proceso experimental	58
Figura 14 Mitsubishi L200 4x2 TM	59
Figura 15 Ruta 1 Ciudad de Cuenca.....	61
Figura 16 Ruta 2 Ciudad de Guayaquil	62
Figura 17 Opacidad en la ciudad de Cuenca	84
Figura 18 Opacidad en nivel del mar	85
Figura 19 Gráfico de las diferentes altitudes en la prueba tomada en la ciudad de Cuenca.	87
Figura 20 Gráfico de las diferentes altitudes en la prueba tomada en la ciudad de Guayaquil	88
Figura 21 Gráfico de las diferentes altitudes en la prueba tomada en el Cajas	88
Figura 22 Mapa de las velocidades de Cuenca.....	90

Figura 23 Mapa de las velocidades en la ciudad de Guayaquil.....	91
Figura 24 Mapa de las velocidades de la ruta del Cajas Hasta Puerto Inca	92
Figura 25 Comparación del Consumo de Combustible en Rutas: Guayaquil, Cuenca y Cajas	93
Figura 26 Opacidad vs Temperatura del Aceite	94
Figura 27 Opacidad vs RPM	95
Figura 28 Análisis tridimensional de la trayectoria vehicular en Cuenca: correlación entre velocidad, altitud y posición geoespacial	97
Figura 29 Análisis tridimensional de la trayectoria vehicular en Guayaquil: correlación entre velocidad, altitud y posición geoespacial	98
Figura 30 Análisis tridimensional de la trayectoria vehicular en el Cajas: correlación entre velocidad, altitud y posición geoespacial	99
Figura 31 Evaluación de emisiones de CO ₂ en recorridos urbanos mediante variables de altitud y velocidad en la ciudad de Cuenca	101
Figura 32 Evaluación de emisiones de CO ₂ en recorridos urbanos mediante variables de altitud y velocidad en el Cajas.....	102
Figura 33 Evaluación de emisiones de CO ₂ en recorridos urbanos mediante variables de altitud y velocidad en la ciudad de Guayaquil.....	103

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1 Evolución de los sistemas de inyección de diésel	31
Tabla 2 Comparación de sistemas de inyección diésel.....	33
Tabla 3 Comparativa técnica de normativas de emisiones y opacidad	52
Tabla 4 Materiales complementarios utilizados para la instalación de los equipos	55
Tabla 5 Ficha técnica de la Mitsubishi L200 2022.....	60
Tabla 6 Datos obtenidos del consumo de combustible en la Ciudad de Cuenca.....	63
Tabla 7 Datos obtenidos del consumo de combustible a nivel del mar.....	73
Tabla 8 Diferencia de datos entre las dos ciudades	86
Tabla 9 Efectos de la altura geográfica con respecto a la opacidad	95

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1	Datos del consumo de combustible de la ruta Dos chorreras - Puerto Inca .	111
Anexo 2	Altitud, Longitud, Velocidad y Latitud de la ruta del Cajas.....	112
Anexo 3	Datos del consumo de combustible de la ruta del Guayaquil.....	113
Anexo 4	Altitud, Longitud, Latitud y Velocidad de la Ruta de Guayaquil.....	115
Anexo 5	Datos del consumo de combustible de la ciudad de Cuenca	117
Anexo 6	Altitud, Latitud, Longitud y velocidad de Cuenca	119
Anexo 7	Rutas y Archivos GPX	120
Anexo 8	En la toma de datos vía a la costa	121
Anexo 9	En la instalación de los equipos del opacímetro.....	122
Anexo 10	Gráficas de opacidad.....	122

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los avances en la inyección de combustible diésel han sido significativos, destacando sistemas de alta precisión como el Common Rail. Esta tecnología ha mejorado notablemente la eficiencia y el rendimiento del motor, al mismo tiempo que ha reducido las emisiones contaminantes. Su uso se ha extendido en la industria automotriz por ofrecer un control más preciso del proceso de inyección, optimizando el consumo de combustible y la calidad de los gases emitidos.

Sin embargo, factores externos como la altitud geográfica juegan un papel determinante en el comportamiento de los motores diésel. En ciudades ubicadas a gran altitud sobre el nivel del mar, como lo es la ciudad de Cuenca (2.560 msnm), los vehículos con motores diésel experimentan un incremento en el consumo de combustible y un aumento en la opacidad de los gases emitidos. La disminución de la densidad del aire afecta directamente el proceso de combustión, esta situación no solo compromete la eficiencia energética de los vehículos, sino que también tiene implicaciones ambientales y de salud pública, debido al aumento de contaminantes como material particulado fino (PM) y compuestos nitrogenados, asociados a enfermedades respiratorias crónicas (OMS, 2021).

En Ecuador, la normativa ambiental NTE INEN 2202 establece límites de opacidad para vehículos diésel, sin embargo, estas regulaciones no siempre consideran las variaciones operativas provocadas por la altitud. A ello se suma la limitada disponibilidad de estudios técnicos que evalúen el comportamiento real de los motores CRDi en diferentes niveles de altitud, lo que dificulta el diagnóstico adecuado y el diseño de estrategias de mantenimiento específicas para zonas de altura.

Este trabajo de titulación tiene como objetivo comparar el consumo de combustible y la emisión de gases opacos en un motor diésel CRDi, evaluado en dos zonas geográficas con altitudes diferentes: Cuenca y una ciudad costera. Para ello, se utilizarán equipos como el medidor de flujo AIC 50004 Fuelflowmaster. Este análisis permitirá identificar el impacto real de la altitud sobre el rendimiento y emisiones del motor, contribuyendo al desarrollo de lineamientos técnicos que promuevan una movilidad más eficiente y ambientalmente responsable. Así mismo, los resultados obtenidos servirán de base para futuras investigaciones

PROBLEMA DE ESTUDIO

En ciudades ubicadas a gran altitud como Cuenca (2.560 msnm), se ha evidenciado un aumento en el consumo de combustible y en la opacidad de gases emitidos por vehículos diésel, en comparación con zonas a nivel del mar como Guayaquil (0-100 msnm) según la prefectura del Guayas, lo cual afecta tanto al rendimiento energético como al cumplimiento de normativas ambientales.

La ciudad de Cuenca registra un parque automotor diésel del 18.5% (INEC, 2023), siendo esta fracción significativa en la generación de emisiones que superan los límites establecidos por la NTE INEN 2202. Estudios como los de Guzzella & Onder (2010) sostienen que la reducción de la densidad del aire en altitudes elevadas disminuye la eficiencia de la combustión, provocando un mayor consumo y una producción incrementada de partículas contaminantes. La Organización Mundial de la Salud ha señalado que estos contaminantes son responsables de enfermedades respiratorias en zonas andinas (OMS, 2021).

Sin embargo, se carece de estudios técnicos locales que midan experimentalmente estas diferencias bajo condiciones controladas. Esta carencia genera incertidumbre en los diagnósticos vehiculares y en las estrategias de mantenimiento en regiones altas, lo que motiva la necesidad de evaluar, con equipos especializados, cómo varían el consumo y las emisiones en función de la altitud geográfica.

Antecedentes

El desarrollo tecnológico de los sistemas de inyección diésel, particularmente el sistema Common Rail Direct Injection (CRDi), ha permitido una mejora sustancial en el rendimiento de los motores, el ahorro de combustible y la reducción de emisiones contaminantes. Sin embargo, el desempeño de estos sistemas se ve afectado por factores externos, como las condiciones geográficas, entre ellas la altitud. A mayor altura sobre el nivel del mar, la disminución de la densidad del aire compromete la eficiencia de la combustión, lo que incide negativamente en el consumo de combustible y en el incremento de las emisiones, especialmente de material particulado medido como opacidad (Guzzella & Onder, 2010).

Diversos estudios han evidenciado que los motores diésel en zonas de gran altitud presentan un aumento en el consumo de combustible debido a la menor disponibilidad de oxígeno, lo cual repercute en una combustión incompleta (Caiza, 2021). De igual manera, se ha observado un aumento en la opacidad de los gases de escape, un parámetro directamente asociado a las partículas sólidas en suspensión, y utilizado como criterio normativo para la evaluación ambiental de vehículos (INEN, 2013).

Estudios recientes como el de Muñoz & Sarango (2023) evaluaron la opacidad generada por un motor Hyundai Santa Fe CRDi 2.0 utilizando biodiésel de microalgas en comparación con diésel Premium. En dicho análisis, se observó que la mezcla con biodiésel redujo la opacidad en condiciones controladas, destacando la sensibilidad del parámetro frente a cambios del combustible. Esto valida la opacidad como una variable técnica clave para medir la eficiencia de la combustión y la calidad ambiental de los vehículos diésel.

Por otro lado, investigaciones como la de Caiza (2021), al estudiar el consumo de combustible en condiciones de altitud variable, reportaron un aumento del 12.6% en consumo al operar en zonas de altura, en comparación con nivel del mar. Este comportamiento fue atribuido directamente a la menor presión atmosférica, afectando negativamente la relación aire-combustible y provocando una combustión incompleta.

En el contexto ecuatoriano, aun son escasos los estudios experimentales que comparen de forma directa el comportamiento de motores CRDi en distintas altitudes utilizando equipamiento especializado. Por ello, resulta pertinente profundizar en esta

temática, particularmente en ciudades como Cuenca (2.560 msnm), donde una proporción significativa del parque automotor funciona con diésel.

Importancia y Alcances

El presente estudio cobra relevancia al considerar que el 18.5% del parque automotor de la ciudad de Cuenca utiliza motores diésel (INEC, 2023), y que la calidad del aire ha sido identificada como un factor determinante en la salud respiratoria de la población urbana (MSP, 2022). La opacidad de gases y el consumo de combustible son indicadores claves no solo de desempeño energético del motor, sino también del cumplimiento ambiental, según lo establecido por normas como la NTE INEN 2022 y el reglamento europeo Euro 4 (Unión Europea, 2010).

Este trabajo tiene un doble propósito: experimental y aplicado. Por un lado, busca generar evidencia técnica confiable sobre el comportamiento del motor CRDi ante cambios de altitud; por otro, contribuir a la optimización de estrategias de mantenimiento, operación y diagnóstico de vehículos diésel en zonas andinas. Además, los resultados permitirán alimentar líneas de investigación sobre la eficiencia energética y contaminación vehicular, en beneficio tanto de la academia como del sector automotriz local.

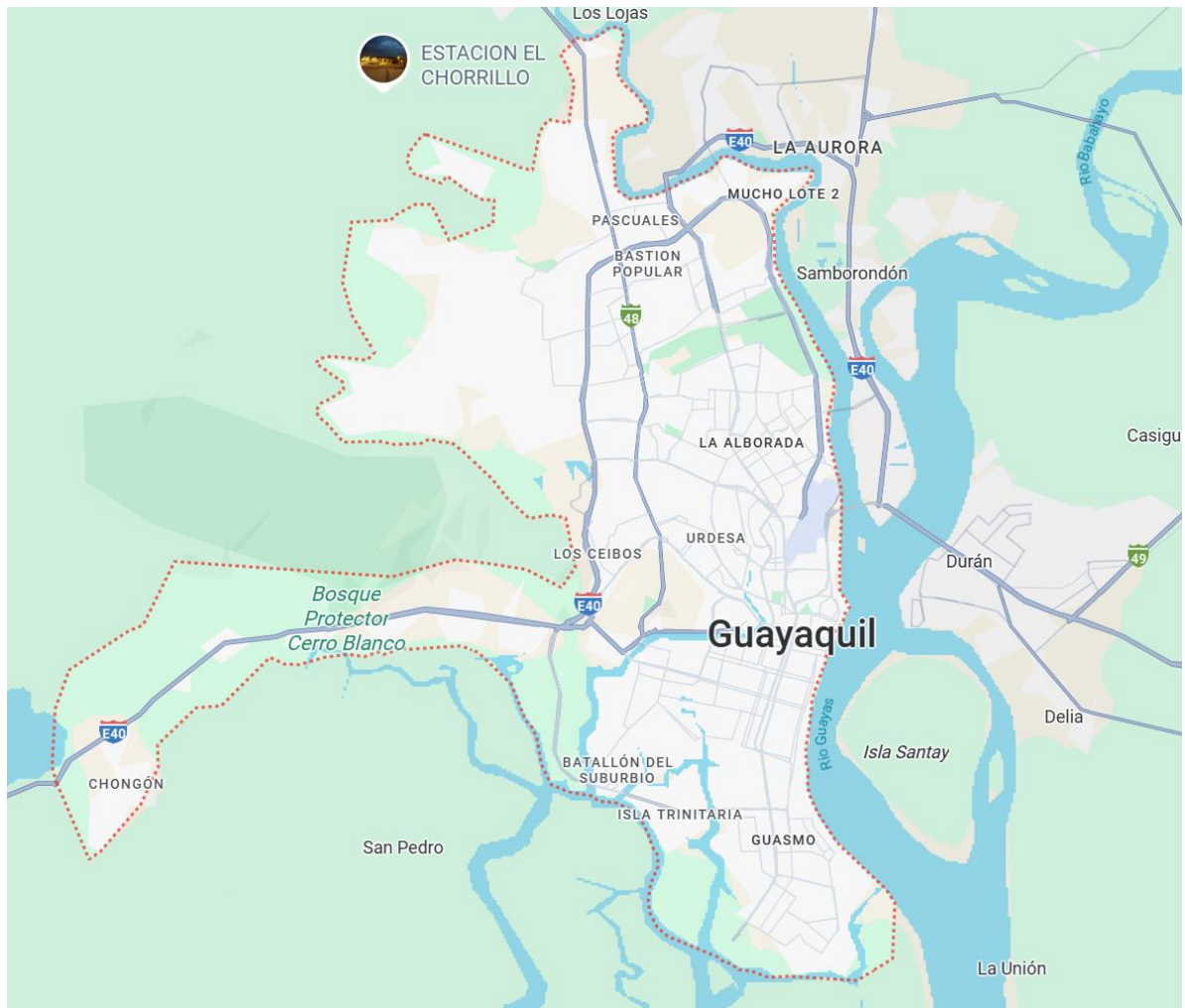
En cuanto a los alcances, el análisis se centrará en un vehículo en específico con sistema CRDi (Mitsubishi L200), y se realizarán pruebas en dos niveles de altitud: Cuenca (2.560 msnm) y una ciudad costera representativa como lo es Guayaquil. El estudio contempla la medición de consumo en L/h mediante el AIC 5004 Fuelflowmaster, y estimaciones de opacidad a partir de parámetros capturados por un escáner automotriz OBD-II.

Delimitación

El proyecto de trabajo se centra en la evaluación del comportamiento de un motor diésel con tecnología CRDi, mediante la realización de pruebas dinámicas de ruta en dos entornos geográficos contrastantes del Ecuador: la ciudad de Cuenca, ubicada a 2560 msnm como representante de una ciudad andina de altura, y una ciudad costera como Guayaquil, situada al nivel del mar. Las pruebas experimentales se realizarán sobre un vehículo específico: Mitsubishi L200, año 2020, motor diésel CRDi 4N15.

Figura 2

Mapa de la ciudad de Guayaquil



Fuente: (Google Maps)

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis comparativo del consumo de combustible y opacidad de gases en un motor diésel CRDi con respecto a la altura geográfica de la ciudad de Cuenca y a nivel del mar, mediante el uso de la AIC 5000 y escáner automotriz para establecer diferencias técnicas con el uso de herramientas estadísticas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer el estado del arte sobre el comportamiento de motores diésel CRDi en distintas altitudes geográficas, mediante una revisión bibliográfica de artículos y documentos técnicos.
- Determinar experimentalmente el consumo de combustible (L/h) y la opacidad de gases (HSU) de un motor CRDi en dos altitudes: Cuenca (2560 msnm) y a nivel del mar (0–100 msnm), utilizando el equipo AIC 5004 y un escáner automotriz para la recolección y análisis de datos.
- Analizar los resultados obtenidos del consumo de combustible y opacidad, mediante el uso de herramientas estadísticas para conocer el impacto de la altura geográfica en dichos factores

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1 Introducción al sistema CRDi

Los motores diésel han experimentado una evolución significativa en sus sistemas de inyección desde mediados del siglo XX, pasando de sistemas mecánicos simples a configuraciones electrónicas complejas y altamente eficientes. Dentro de estas innovaciones, el sistema Common Rail Direct Injection (CRDi) se ha consolidado como una de las tecnologías más importantes para cumplir con las exigencias actuales de rendimiento, economía de combustible y control de emisiones contaminantes (Tschöke et al., 2018).

El sistema CRDi se basa en un principio de funcionamiento fundamental: separar la generación de presión de combustible de la inyección propiamente dicha. A diferencia de los sistemas convencionales, donde la presión y la inyección se producen simultáneamente por un mismo componente (como en las bombas rotativas), en el CRDi el combustible es acumulado a alta presión en un riel común, desde donde es distribuido electrónicamente a cada inyector en el momento y cantidad exactos según las condiciones de operación del motor (Kitchen, n.d.).

Esta independencia permite que el sistema CRDi realice múltiples inyecciones por ciclo, ajustando con gran precisión el tiempo y la cantidad de combustible que entra a cada cilindro, o que mejora la atomización, reduce el consumo específico y disminuye emisiones como óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (Tschöke et al., 2018). Además, la incorporación de sensores y una unidad de control electrónica (ECU) sofisticada ha permitido adaptar este sistema a condiciones de operación exigentes, como lo puede ser las que se encuentran en condiciones de gran altitud.

En el caso de vehículos modernos como la Mitsubishi L200 CRDi, el sistema actúa en conjunto con componentes como el turbo de geometría variable, la recirculación de gases de escape (EGR) y el sistema de tratamiento de partículas diésel (DPF), configurando un conjunto integral de tecnologías que permite mantener el rendimiento y la eficiencia en distintos entornos geográficos.

Como se indicará en las secciones siguientes, el diseño del CRDi ha sido clave para enfrentar los desafíos técnicos que implica la operación en zonas de altura, donde la disminución de la densidad del aire afecta directamente el proceso de combustión y, en consecuencia, el consumo de combustible y la opacidad de gases de escape.

1.2 Breve historia del sistema y evolución

El desarrollo de los motores diésel ha sido resultado de más de un siglo de avances técnicos orientados a mejorar la eficiencia energética, aumentar la fiabilidad mecánica y reducir las emisiones contaminantes. Este proceso inicia con el ingeniero alemán Rudolf Diésel, quien patentó el primer diseño funcional de un motor de combustión interna por compresión en 1892 y logró su primera versión operativa en 1897 (Moreno et al., 2022). Su principal objetivo era superar el bajo rendimiento térmico de los motores a gasolina, y aprovechar combustibles pesados más accesibles como el fuel oil.

Durante gran parte del siglo XX, los motores diésel utilizaron sistemas de inyección mecánica, operando con bombas en línea y bombas rotativas, caracterizados por su robustez, pero también por su limitada precisión en el control de la cantidad, presión y momento de inyección. Estos sistemas resultaban adecuados para aplicaciones industriales y de carga pesada, pero su eficiencia en vehículos de uso urbano era reducida (Tschöke et al., 2018).

Durante las décadas siguientes, los sistemas de inyección evolucionaron gradualmente para ofrecer mayor precisión, especialmente en aplicaciones de alta exigencia como transporte de carga y maquinaria pesada. Sin embargo, fue a partir de los años 80 y 90 cuando, debido a la entrada en vigor de normativas ambientales más estrictas (como Euro I en Europa), que generó un impulso en el desarrollo de sistemas de inyección electrónica, dando paso a la introducción de los primeros motores con inyección directa controlada electrónicamente. No obstante, estos primeros avances aun dependían de bombas mecánicas de alta presión (Moreno et al., 2022).

El verdadero punto de inflexión se produjo con la aparición del sistema Common Rail Direct Injection (CRDi). Este sistema fue desarrollado conceptualmente por Magneti Marelli en los años 80 y comercializado masivamente por Bosch en 1997, inicialmente en vehículos Alfa Romeo y Mercedes Benz. A diferencia de los sistemas convencionales, donde la generación de presión y la inyección se producen simultáneamente en un solo componente, el CRDi separa ambos procesos.

El combustible se acumula a alta presión en un riel común (Common rail), desde donde es inyectado electrónicamente a cada cilindro en el momento y cantidad exactos según las condiciones operativas del motor (Kitchen, n.d.).

Gracias a su arquitectura electrónica, el sistema CRDi permite realizar múltiples inyecciones por ciclo, lo que mejora la atomización del combustible y redundancia en mejor rendimiento térmico, menor consumo específico, disminuye el ruido del motor y reducción de emisiones contaminantes, especialmente de NOx y material particulado. Además, permite la integración de sensores inteligentes y sistemas de diagnóstico, lo que facilita su adaptación a entornos operativos exigentes (Tschöke et al., 2018).

Desde su adopción inicial, el sistema CRDi ha evolucionado en diversas generaciones, incorporando:

- Inyectores piezoeléctricos (mayor velocidad y precisión).
- Sensores inteligentes: MAF, MAP, ECT, CKP.
- Gestión electrónica integrada con sistemas EGR, DPF, y catalizadores SCR.
- Compatibilidad con normativas ambientales internacionales como Euro VI y nacionales como la NTE INEN 2202.

Esta evolución tecnológica ha permitido que los motores CRDi sean actualmente los más utilizados en vehículos diésel modernos, tanto en automóviles ligeros como en vehículos comerciales, manteniendo su eficiencia incluso en condiciones operativas adversas como la altitud geográfica, donde los sistemas convencionales presentan mayores pérdidas de rendimiento.

La siguiente tabla resume la evolución de los sistemas de inyección diésel desde sus inicios hasta la actualidad:

Tabla 1

Evolución de los sistemas de inyección de diésel

Año / Periodo	Evento técnico
1927	Primera bomba inyectora en línea de serie
1962	Primer bomba inyectora distribuidora de pistón axial EP – VM

1986	Primera bomba inyectora distribuidora de pistón axial con regulación electrónica
1994	Primer sistema de unidad inyectora (UIS)
1995	Primer sistema de bomba unitaria (UPS)
1996	Primera bomba inyectora distribuidora de pistón radial
1997	Primer sistema de inyección de presión modulada Common rail
1998	Primer sistema de unidad inyectora (UIS) para automóviles
2003	CRDi de tercera generación con inyectores piezoeléctricos
2005-hoy	Presiones de inyección superiores a 2.000 bar. Múltiples inyecciones por ciclo

Fuente: Adaptado de Moreno, Pineda & Santos (2022); (Tschöke et al., 2018).

1.3 Comparación con sistemas de inyección diésel anteriores

La evolución de los sistemas de inyección en motores diésel refleja una transición gradual desde soluciones mecánicas robustas hacia tecnologías electrónicas de alta precisión. Antes de la adopción masiva del sistema Common Rail Direct Injection (CRDi), los vehículos diésel utilizaban principalmente dos configuraciones: sistemas de inyección mecánica en línea y bombas rotativas. Estos sistemas fueron la base del desarrollo automotor durante el siglo XX, pero presentaban limitaciones significativas en términos de control, eficiencia y emisiones (Tschöke et al., 2018).

Los sistemas en línea operan mediante una bomba inyectora que contiene un embolo por cada cilindro. La presión se genera de forma simultánea al momento de inyección, sin posibilidad de modular la duración ni el momento exacto del suministro de combustible. Si bien son sistemas robustos, especialmente en motores de trabajo pesado, su incapacidad para adaptarse a condiciones variables de carga y altitud limita su eficiencia (Mollenhauer & Tschöke, 2010).

Por otro lado, los sistemas de bomba rotativa fueron una evolución mecánica más compacta y económica. Utilizan un único embolo rotativo que distribuye el combustible a todos los cilindros, generando la presión necesaria y ejecutando la inyección en un solo

conjunto. Aunque ofrecen mayor simplicidad y menor peso, su desempeño aun es altamente dependiente del régimen del motor. A bajas revoluciones, sufren pérdidas significativas de presión, afectando la atomización y aumentando el consumo y las emisiones (Moreno et al., 2022).

El sistema CRDi, en cambio, representa una ruptura tecnológica. Se caracteriza por desacoplar la generación de presión de la inyección misma. El combustible es acumulado a alta presión en un riel común, desde donde es distribuido electrónicamente a cada inyector. Esto permite operar con presiones superiores a 2.000 bar, ejecutar múltiples inyecciones por ciclo (pre, principal y post inyección) y ajustar con alta precisión el tiempo y volumen de cada evento de inyección, incluso bajo condiciones cambiantes como las que se presentan en altitud (Kitchen, n.d.; Tschöke et al., 2018).

Además, el sistema CRDi se integra con sensores como MAF, MAP, CKP Y ECT, y sistemas de control de emisiones como EGR Y DPF, lo que permite cumplir con normativas ambientales estrictas como la Euro VI o la NTE INEN 2202 (Moreno et al., 2022).

Tabla 2

Comparación de sistemas de inyección diésel

Criterio técnico	Sistema en línea	Bomba rotativa	Sistema CRDi
Tipo de control	Totalmente mecánico	Mecánico con regulación limitada	Electrónico avanzado mediante ECU
Presión de inyección (bar)	Hasta 800	300- 600	1.200- 2.500
Inyecciones por ciclo	Única inyección	Única inyección	Múltiples inyecciones
Precisión en la dosificación	Baja	Media	Alta (microsegundos y volúmenes exactos)
Respuesta a cambios de carga	Lenta	Lenta	Rápida y adaptativa

Compatibilidad con sensores	Nula	Limitada	Total (MAF, MAP, CKP, ECT, etc.)
Nivel de emisiones	Alto	Medio- alto	Bajo (cumple normativas ambientales)
Mantenimiento	Frecuente y mecánico	Medio- alto	Técnico especializado, pero menos frecuente

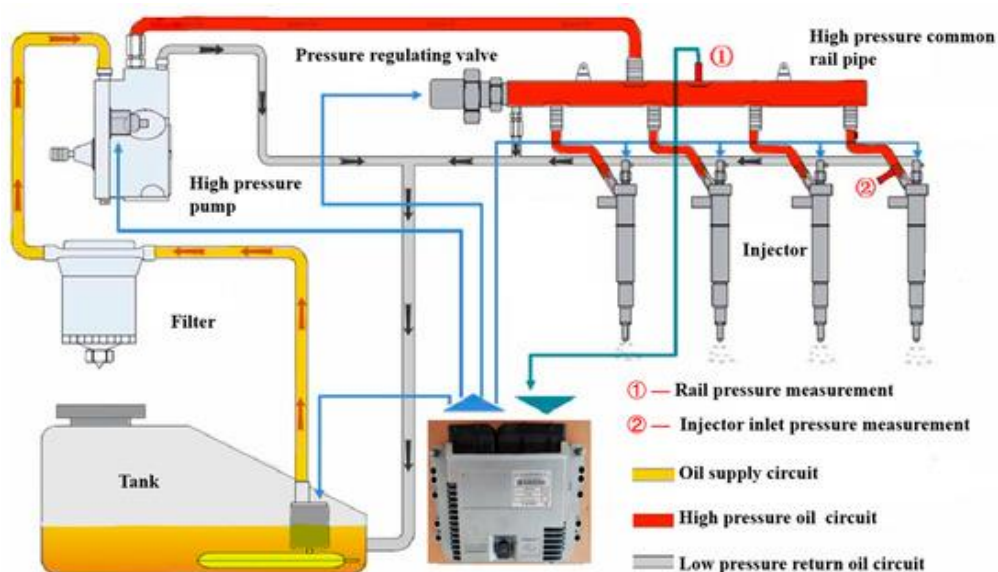
Fuente: Adaptado de Tschöke et al. (2018); Mollenhauer & Tschöke (2010); Moreno et al. (2022).

1.4 Componentes clave del sistema CRDi

El sistema Common Rail Direct Injection (CRDi) se distingue por su capacidad para controlar con alta precisión, el momento y la cantidad de combustible inyectado en cada cilindro, independientemente del régimen de funcionamiento del motor. Esta eficiencia es resultado de la interacción entre varios componentes que, de manera coordinada, permiten una atomización fina, una combustión más completa y una considerable reducción de emisiones.

Figura 3

Diagrama de un sistema de inyección Common rail



Fuente: (Ruichuan Li, 2023)

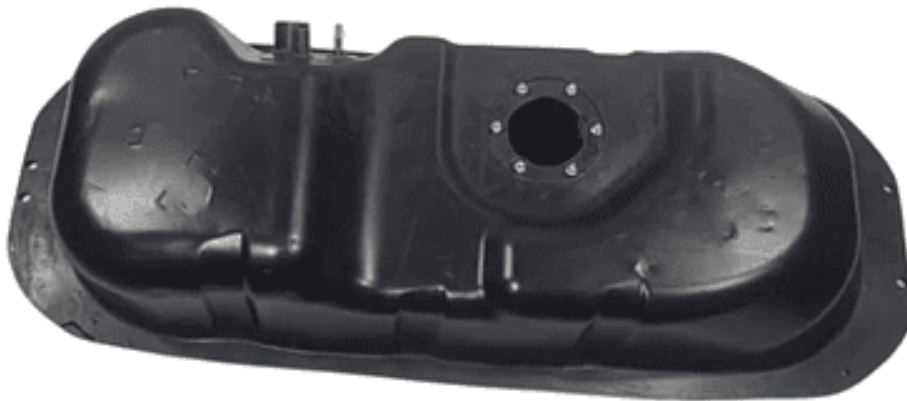
En este sistema, se distinguen diferentes tipos de componentes clave como:

1.4.1 Depósito de combustible

El depósito almacena el diésel en condiciones seguras y estables. Su diseño influye en la presión de aspiración inicial, la formación de burbujas de aire y la temperatura del combustible.

Figura 4

Tanque de combustible



Fuente: (Ruichuan Li, 2023)

1.4.2 Bomba de alimentación

Este componente traslada el combustible desde el tanque hacia el sistema de filtrado y la bomba de alta presión. Opera a presiones moderadas (usualmente entre 4-6 bar) y garantiza un flujo continuo, incluso en condiciones de arranque o baja carga. El caudal y la presión que entrega deben ser estrictamente calibrados, ya que un suministro inestable puede provocar variaciones en la presión del riel y afectar el desempeño del sistema. Según Li et al. (2023) una relación equilibrada entre la presión de alimentación y la presión del riel común contribuye a la estabilidad operativa, a la eficiencia térmica y a la reducción de acumulación térmica en los inyectores.

Figura 5

Bomba de combustible diésel de baja presión



Fuente: (eBay, 2021)

1.4.3 Filtro de combustible

El filtro tiene la función de eliminar impurezas sólidas y agua del combustible antes de que alcance la bomba de alta presión. Los inyectores CRDi operan con tolerancias de apenas unas micras, por lo que una mínima contaminación puede provocar fallos o desgaste prematuro.

Figura 6

Filtro de combustible



Fuente: (eBay, 2021)

1.4.4 Bomba de alta presión

Este componente es el encargado de generar presiones que superan los 2.000 bar, por lo que se considera uno de los componentes más críticos del sistema. Está compuesta por uno o más pistones que comprimen el combustible y lo envían al riel común. Su función es independiente del régimen del motor y está regulado por una válvula de dosificación que limita el volumen de diésel presurizado en cada ciclo. Su diseño depende del fabricante, existiendo variantes axiales y radiales (Mollenhauer & Tschöke, 2010).

Figura 7

Bomba de alta presión



Fuente: (Ruichuan Li, 2023)

1.4.5 Riel común

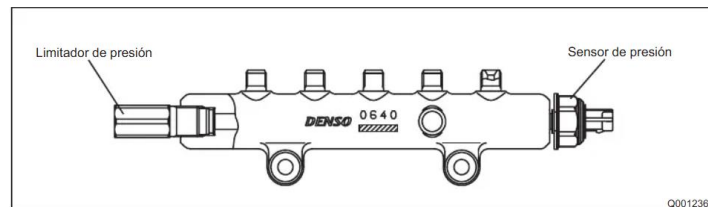
También conocido como acumulador de alta presión, funciona como un acumulador hidráulico que mantiene el combustible a alta presión y lo distribuye de forma uniforme a todos los inyectores. Su principal ventaja es la desaceleración de las fluctuaciones de presión que se producen durante los ciclos de apertura de los inyectores. El riel incorpora un sensor de presión y una válvula reguladora, ambos gestionados por la ECU para mantener la presión deseada en tiempo real.

Estudios realizados con bancos de pruebas en condiciones simuladas de altitud han demostrado un aumento significativo en los niveles de CO y hollín cuando disminuye

la presión atmosférica, principalmente debido a reducciones en la presión del riel y el flujo de combustible hacia la cámara de combustión (Zhao et al., 2021).

Figura 8

Riel común



Fuente: (Ruichuan Li, 2023)

1.4.6 Inyectores

Los inyectores son actuadores que funcionan con extrema precisión, se encargan de inyectar el combustible directamente en la cámara de combustión. Están diseñados para realizar múltiples inyecciones por ciclo, lo que permite optimizar la combustión en términos de eficiencia energética, reducción de ruido y control de emisiones.

Una de las tecnologías más avanzadas en esta área son los inyectores piezoeléctricos, que poseen ventajas en velocidad de respuesta, exactitud del control del volumen inyectado y repetibilidad del patrón de pulverización. De acuerdo con d'Ambrosio & Ferrari (2018), esta tecnología ha demostrado beneficios en la reducción de las emisiones de NOx y partículas finas, especialmente bajo condiciones de carga parcial.

Figura 9

Inyector Denso



Fuente: (Autores)

1.4.7 Sistema de retorno y válvula de alivio

El combustible que no es inyectado en la cámara de combustión ya sea por la bomba de alta presión o por los inyectores, es redirigido mediante un sistema de retorno hacia el depósito de combustible. Este retorno no solo cumple una función de recirculación, sino también de enfriamiento del combustible y de protección frente a aumentos excesivos de presión dentro del sistema.

Está equipado, asimismo, con una válvula de alivio, que actúa como un dispositivo de seguridad, descargando el exceso de presión hacia el retorno para evitar daños en el riel o los inyectores.

Figura 10

Válvula de alivio



Fuente: (Mercado Libre)

1.5 Ventajas del sistema CRDi

Como se ha evidenciado a lo largo del capítulo, el sistema Common Rail Direct Injection (CRDi) ha sustituido a las tecnologías de inyección diésel tradicionales y revolucionado el diseño y control de la inyección de combustible en motores diésel modernos, gracias a su capacidad de operar con presiones elevadas, control electrónico independiente de la velocidad del motor, una atomización más fina del combustible, el control electrónico preciso del momento y duración de la inyección, y la capacidad de realizar múltiples eventos por ciclo.

Su implementación ha permitido alcanzar mejoras notables en términos de desempeño como una combustión más eficiente, con menor consumo específico y una reducción considerable de emisiones contaminantes.

También ha influido en la mejora sustancial de aspectos como el confort, ya que, situaciones como el control de la preinyección en los primeros grados de giro del cigüeñal contribuye a suavizar el inicio de la combustión, reduciendo el clásico golpeteo diésel. Esto mejora la experiencia de conducción, especialmente en vehículos de pasajeros, sin sacrificar potencia ni eficiencia.

1.6 Gestión electrónica del motor: ECU, sensores y actuadores relevantes

En los motores diésel modernos equipados con sistemas Common Rail, la unidad de control electrónico (ECU) desempeña un papel fundamental en el proceso de inyección, permitiendo una gestión eficiente, dinámica y adaptativa. A diferencia de los sistemas mecánicos tradicionales, donde la sincronización dependía exclusivamente del giro del cigüeñal o del árbol de levas, en el CRDi la ECU toma decisiones en milisegundos basándose en variables medidas por múltiples sensores distribuidos a lo largo del motor y tren de potencia.

La ECU (Engine Control Unit) se encarga de ejecutar mapas que determinan la cantidad, duración, presión y momento exacto de inyección del combustible según condiciones reales de operación. Estos mapas están calibrados para diferentes estados del motor, como arranque en frío, ralentí, aceleración, frenado y cambios de altitud.

También coordina la apertura y cierre de válvulas solenoides o piezoeléctricas en los inyectores, regula la presión en el riel común y activa estrategias complementarias como la recirculación de gases (EGR), inyecciones múltiples por ciclo o regeneración del filtro de partículas.

Como se mencionó anteriormente, la ECU depende de un conjunto de sensores clave que monitorean en tiempo real variables internas y externas al motor. Entre los más relevantes se encuentran:

1.6.1 Sensor de masa de aire (MAF): Mide la cantidad o flujo de aire que entra al motor, esencial para calcular la relación aire- combustible.

1.6.2 Sensor de presión absoluta del múltiple (MAP): Registra la presión en la admisión, útil para detectar cargas elevadas o altitud.

1.6.3 Sensor de temperatura del refrigerante (ECT): Permite ajustar la estrategia de inyección durante el arranque en frío.

1.6.4 Sensor de posición del cigüeñal (CKP) y del árbol de levas (CMP):

Determinan la fase y ciclo de sincronización del motor

1.6.5 Sensor de presión del riel (RPS): Garantiza que la presión de inyección se mantenga dentro de los parámetros establecidos

1.6.6 Sensor de temperatura del combustible: Ayuda a compensar la densidad del diésel ante variaciones térmicas

1.6.7 Sensor de oxígeno (O2) o sonda lambda: Permite controlar la eficiencia de la combustión y verificar la función del catalizador.

1.6.8 Sensor de presión del turbo (BPS): En un turbo cargador de geometría variable, mide la presión del aire comprimido.

Estos sensores trabajan de manera integrada, enviando señales eléctricas a la ECU. El sistema responde ajustando los actuadores, cerrando el bucle de control necesario para optimizar el funcionamiento del motor en condiciones reales, incluyendo situaciones de altitud variable. Se Algunos de los actuadores más relevantes son:

1.6.9 Inyectores electromagnéticos o piezoeléctricos: Dosifican con alta precisión el combustible hacia la cámara de combustión.

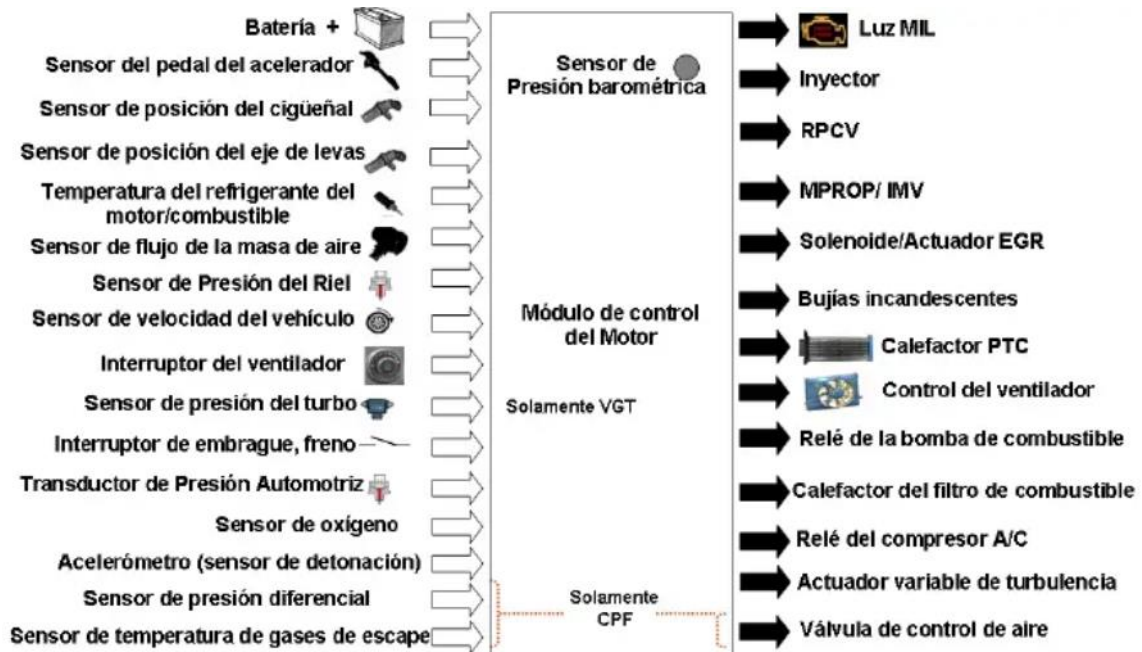
1.6.10 Válvula de dosificación de la bomba de alta presión (IMV): Modula el caudal de combustible comprimido.

1.6.11 Válvula de recirculación de gases de escape (EGR): Disminuye la formación de NOx.

1.6.12 Actuador del turbocompresor de geometría variable (VGT): Ajusta la presión de sobrealimentación según la demanda.

Figura 11

Sensores y actuadores del sistema Common Rail



Fuente: (Parra, 2024)

La ECU también cumple funciones de diagnóstico a bordo (OBD), registrando fallos, parámetros fuera de rango y eventos críticos. Esto facilita la detección temprana de fallas en el sistema de inyección, sensores o emisiones.

1.7 Factores que influyen en el consumo y emisiones en motores diésel

El rendimiento energético y ambiental de un motor diésel no depende únicamente de su diseño o configuración electrónica, sino también de un conjunto amplio de factores operativos y ambientales que afectan el consumo específico de combustible y los niveles de emisiones contaminantes. Estas variables, en su mayoría externas al control del fabricante, explican por qué los resultados de laboratorio suelen diferir notablemente de los obtenidos en condiciones reales de uso.

Entre los principales factores identificados se encuentran las condiciones de operación como la carga, la temperatura ambiente o la altitud, la calidad del combustible y el estado mecánico y electrónico del motor. La interacción entre estos elementos determina no solo la eficiencia térmica del motor, sino también su capacidad para cumplir

con normativas de emisiones y su desempeño en escenarios geográficos diversos, como los que se presentan en Ecuador.

1.8 Condiciones de operación: carga, temperatura, altitud

Las condiciones de operación influyen de forma directa en el consumo de combustible y la formación de emisiones contaminantes, al modificar los parámetros básicos del proceso de combustión. Una de las más determinantes es la carga del motor, ya que una demanda elevada requiere más inyección de combustible, lo que incrementa el consumo específico y eleva las temperaturas internas. Estudios como el de Moreno, Pineda y Santos (2022) han demostrado que, en condiciones de tráfico urbano, donde las cargas varían constantemente, se presentan los picos más altos de opacidad y consumo, debido a aceleraciones frecuentes y tiempos prolongados de ralentí.

La temperatura ambiente es otro factor clave. A bajas temperaturas, el combustible diésel presenta mayor densidad y menor volatilidad, lo que retrasa la ignición y provoca combustión incompleta. Esto incrementa las emisiones de hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y partículas (PM). Además, en motores con postratamiento de gases, como los equipados con DPF, las bajas temperaturas dificultan alcanzar las condiciones necesarias para la regeneración del filtro, lo que puede agravar la emisión de opacidad en el corto plazo.

Por último, la altitud geográfica tiene un impacto considerable en la eficiencia volumétrica del motor. A medida que se asciende, la presión barométrica disminuye, lo que reduce la densidad del aire y con ello el oxígeno disponible para la combustión. Esto obliga al sistema CRDi a ajustar la cantidad de combustible inyectado para evitar mezclas ricas, pero aun así suele generarse un retraso en la ignición, pérdida de potencia y aumento de las emisiones de hollín (Ghazikhani et al., 2013; Liu et al., 2022). En ciudades como Cuenca o Quito, ubicadas por encima de los 2.500 msnm, estos efectos pueden ser especialmente notorios.

El estudio de Valdes-Montenegro et al. (2024), realizado en condiciones reales en Panamá, corrobora que las variables dinámicas como la aceleración repentina, frenado frecuente y pendiente vial son más relevantes en el comportamiento de la opacidad y emisiones que las variables estáticas del motor. Por ello, el análisis de consumo y emisiones debe considerar siempre el contexto operativo específico.

1.9 Calidad del Combustible

La calidad del combustible diésel es un factor determinante en el consumo y en la generación de emisiones contaminantes, especialmente en sistemas de inyección de alta presión como el CRDi, que requieren una especificación precisa en términos de pureza, lubricidad y composición química. Combustibles fuera de norma pueden comprometer la eficiencia del motor, acelerar el desgaste de componentes y aumentar significativamente la opacidad y otros contaminantes.

Uno de los parámetros más críticos es el contenido de azufre. Los combustibles con alto contenido de este elemento generan mayores cantidades de dióxido de azufre (SO₂) y contribuyen a la formación de partículas sólidas (PM), además de dañar progresivamente los sistemas de postratamiento como los catalizadores de oxidación diésel (DOC) y los filtros de partículas (DPF). En Ecuador, según la NTE INEN 2202, el diésel debe tener un máximo de 50 ppm de azufre para vehículos automotores, pero en la práctica se han registrado valores más altos, especialmente fuera de las zonas urbanas, lo que compromete la eficiencia ambiental del parque automotor.

Otro aspecto clave es la presencia de impurezas físicas, como agua, sedimentos o partículas metálicas, que pueden afectar gravemente la operación de componentes sensibles del sistema CRDi, como los inyectores y la bomba de alta presión. Estas impurezas provocan una pulverización deficiente, aumento de la opacidad y fallas prematuras. El estudio de Gong et al. (2021) menciona que los vehículos operando con combustible contaminado mostraron hasta un 12% más de consumo específico debido a inyectores irregulares y pérdidas de presión en el riel.

Finalmente, la variación en el índice de etano también influye en la calidad de la combustión. Un índice bajo retrasa el inicio de la ignición, lo que puede derivar en ciclos incompletos, mayor generación de hollín y menor eficiencia térmica. Aunque los motores CRDi pueden adaptarse parcialmente a estas variaciones mediante correcciones en la ECU, no pueden compensar completamente una mala calidad de combustible.

1.10 Estado mecánico y electrónico del motor

El estado general del motor influye directamente en el consumo de combustible y en la cantidad de emisiones que genera. Tanto los sistemas mecánicos como la compresión, la inyección y la admisión como los sistemas electrónicos como sensores,

actuadores y la ECU deben operar dentro de parámetros óptimos para mantener la eficiencia del motor y reducir la opacidad de los gases de escape.

Desde el punto de vista mecánico, uno de los elementos más críticos es la compresión de los cilindros. Un desgaste en los aros, válvulas o cilindros reduce la presión máxima alcanzada, lo que disminuye la temperatura de combustión, retrasa la ignición y causa una combustión incompleta. Esto incrementa tanto el consumo específico como las emisiones de hollín y CO. Asimismo, defectos en los inyectores, como fugas internas o goteo, afectan la atomización del diésel, lo que altera la relación estequiometría y aumenta la opacidad.

En el plano electrónico, fallos en sensores como el MAF, MAP, CKP o el sensor de presión del riel afectan la capacidad de la ECU para calcular con precisión el volumen y momento de inyección. Por ejemplo, un sensor MAF subestimado puede incluir una mezcla rica, generando mayor consumo y emisiones de partículas. Moreno, Pineda y Santos (2022) destacan que errores acumulativos en sensores de admisión y presión conducen a inyecciones incorrectas incluso en condiciones normales de operación.

Además, el estado de la gestión electrónica y la calibración de la ECU determina en gran medida la capacidad del sistema para adaptarse a cambios de carga, temperatura o altitud. La falta de mantenimiento puede causar retrasos en la respuesta del sistema, afectando la eficiencia de la combustión. En pruebas de emisiones en vía realizadas por Valdés-Montenegro et al. (2024) se observó que vehículos con fallas electrónicas latentes, aunque sin códigos de error activos presentaron niveles de opacidad hasta un 18% mayores frente a unidades en condiciones electrónicas óptimas.

1.11 Influencia de la altitud geográfica

En motores diésel de inyección directa, como los equipados con tecnología CRDi, el rendimiento y la eficiencia de combustión están estrechamente ligados a las condiciones ambientales, especialmente a la presión barométrica. A medida que un vehículo asciende a zonas de mayor altitud, la densidad del aire disminuye, lo que afecta directamente la cantidad de oxígeno disponible en la cámara de combustión. Esta variación impone desafíos técnicos que no solo alteran el desempeño del motor, sino que también influyen significativamente en el consumo de combustible y en la formación de contaminantes como el hollín, CO y NOx.

1.12 Efecto de la presión atmosférica sobre la combustión

Una menor presión atmosférica reduce la masa de aire disponible por ciclo de admisión, lo que deteriora la relación aire- combustible y puede provocar una combustión incompleta. Esto se traduce en una disminución de la eficiencia térmica, pérdida de potencia, mayor retraso en el inicio de la combustión e incremento de emisiones. Estudios como el de Liu et al. (2022) han demostrado que, al comparar el desempeño de un motor diésel en ciudades con diferente altitud (Hangzhou, Kunming y Lhasa), la eficiencia disminuye hasta en un 6.5% y el consumo específico aumenta considerablemente a medida que la altitud supera los 3.000 msnm.

Resultados similares fueron obtenidos por Ghazikhani et al. (2013), quienes observaron un aumento del 40% en la emisión de hollín y una disminución de hasta el 15% en la presión máxima de combustión al comparar pruebas a 350 m y 975 m. Este efecto es aún más crítico en el arranque en frío, donde el retraso de ignición se ve alterado por la baja temperatura y presión, generando mayores emisiones de HC y CO, como lo confirman los ensayos de Kan et al. (2018) realizados a distintas alturas simuladas (0, 3000 y 45000 m).

En el contexto ecuatoriano, Caiza (2021) analizó el consumo de combustible de un vehículo diésel operando a diferentes altitudes, concluyendo que en zonas por encima de los 2.500 msnm el motor presenta un incremento notable en el consumo y pérdida de eficiencia volumétrica, incluso bajo condiciones de carga moderada. Este comportamiento valida la necesidad de estudiar comparativamente regiones como Cuenca y Guayaquil, donde los efectos de altitud son marcadamente contrastantes.

1.13 Modificaciones de rendimiento en altura

Para mitigar los efectos negativos de la altitud, los motores modernos incorporan estrategias de compensación. En sistemas CRDi, la unidad de control electrónica (ECU) ajusta de forma automática la presión de inyección, el tiempo de preinyección y la relación aire- combustible en función de la presión barométrica detectada por sensores MAP o barométricos.

Xia & Zhang (2020) propusieron un modelo de optimización basado en lógica difusa para motores turboalimentados operando a gran altitud. Su estudio demostró que, mediante ajustes coordinados en el turbo de geometría variable, la recirculación de gases

de escape (EGR) y los parámetros de inyección, es posible recuperar una parte significativa del par motor y reducir el consumo específico de combustible bajo condiciones de altitud simulada.

Por otro lado, Zheng et al. (2023) realizaron simulaciones experimentales a 1.900 m de altitud, observando que el uso de control dinámico sobre la presión de riel y el número de inyecciones por ciclo permitió disminuir la penalización en potencia y reducir en más de un 10% las emisiones de NOx en comparación con estrategias convencionales.

En escenarios como el de Ecuador, donde vehículos pueden operar en un mismo día desde el nivel del mar hasta zonas andinas, estas estrategias no solo son relevantes, sino imprescindibles para mantener la eficiencia del motor y cumplir con las normativas ambientales locales, como la NTE INEN 2202.

1.14 Respuesta del sistema CRDi ante variaciones de altitud

Como se ha explicado previamente, la altitud geográfica genera condiciones de operación desfavorables para los motores diésel. Ante este escenario, los sistemas modernos de inyección CRDi están diseñados no solo para detectar estas variaciones, sino para responder de forma automática y continua mediante ajustes precisos en sus componentes electrónicos e hidráulicos. Este apartado analiza como el sistema adapta sus parámetros de inyección en altura, así como las limitaciones técnicas que pueden seguir cuando se operan vehículos diésel en zonas de gran altitud.

1.15 Ajustes automáticos de inyección

Los sistemas de inyección Common Rail Direct Injection (CRDi) están diseñados para operar en una amplia gama de condiciones ambientales, incluyendo variaciones significativas de altitud. Uno de los aspectos clave que permite esta adaptabilidad es la capacidad del sistema para realizar ajustes automáticos en los parámetros de inyección a través de la unidad de control electrónica (ECU). Estos ajustes se basan en la información recopilada por sensores de presión atmosférica, temperatura y flujo de aire, lo que permite a la ECU recalibrar continuamente el momento de inyección, la cantidad de combustible y la presión del riel común.

En condiciones de mayor altitud, la reducción en la densidad del aire obliga a disminuir la masa de combustible inyectado para evitar mezclas ricas que puedan generar combustión incompleta y aumentos en las emisiones de hollín. La ECU responde

disminuyendo la duración del pulso de inyección y, en algunos casos, variando el número de inyecciones por ciclo para mantener una combustión eficiente. Según Xia & Zhang (2020), estos ajustes, combinados con estrategias de gestión del turbo compresor y EGR, permiten mantener la eficiencia del motor en altitud con penalizaciones mínimas sobre el consumo específico de combustible.

Por su parte, Zheng et al. (2023) demostraron que el ajuste dinámico de la presión en el riel común, coordinado con la demanda del motor y la altitud simulada, ayuda a mantener una presión de inyección estable, lo que contribuye a reducir tanto el retraso de encendido como la variabilidad de la combustión. Esta adaptabilidad es crucial en motores modernos, especialmente en países como Ecuador, donde un vehículo puede operar en trayectos que combinan zonas costeras y montañosas en un mismo recorrido.

En contextos reales de operación, como lo evidencia Caiza (2021), los ajustes del sistema CRDi permiten mantener un comportamiento funcionalmente estable en vehículos pickup diésel que transitan entre altitudes bajas y superiores a los 2.500 msnm. Aun así, se evidencia ligeras pérdidas de potencia y aumentos en el consumo, lo cual justifica el interés por evaluar este fenómeno en pruebas de ruta.

1.16 Limitaciones del sistema en zonas de gran altitud

A pesar de los avances tecnológicos del sistema CRDi y su capacidad para adaptarse a distintas condiciones de operación, existen limitaciones inherentes que se manifiestan especialmente en altitudes superiores a los 2.500 msnm. Estas limitaciones están relacionadas tanto a las restricciones físicas del sistema como con las capacidades del control electrónico para compensar pérdidas en la eficiencia de combustión.

Una de las principales restricciones es la capacidad del turbocompresor. En altitudes elevadas, la menor presión atmosférica limita la masa de aire que puede ser aspirada y comprimida. Aunque los sistemas modernos utilizan turbocompresor de geometría variable, estos alcanzan un umbral en el que ya no pueden compensar la pérdida de presión de entrada. Esto reduce la eficiencia volumétrica del motor, disminuye el par disponible y puede generar mezclas demasiado ricas si no se ajusta correctamente la dosificación de combustible.

Otra limitación crítica se encuentra en el sistema de alimentación diésel, en condiciones de carga transitoria o arranque en frío. Según Zheng et al. (2023), en altitudes

simuladas superiores a 1.800 m, se observan fluctuaciones en la presión del riel común y retrasos en la inyección principal, lo que afecta negativamente la estabilidad de la combustión. En casos extremos, pueden producirse ciclos incompletos o combustión irregular, lo que incrementa el consumo específico y las emisiones de HC y CO.

Además, el sistema de control electrónico (ECU) depende de sensores barométricos y de admisión para adaptar las curvas de inyección. Si estos sensores presentan degradación o calibración inadecuada, la estrategia de compensación pierde efectividad. Tal como lo documenta Caiza (2021), incluso con un sistema CRDi funcional, el motor presenta pérdidas de rendimiento y consumo elevado al operar en zonas por encima de los 2.800 msnm, lo que indica que los márgenes de compensación del sistema pueden resultar insuficientes bajo ciertas condiciones reales de conducción.

Por otro lado, algunas estrategias auxiliares como la recirculación de gases de escape (EGR) o la post- inyección para la regeneración del DPF pueden verse afectadas en altura, debido a temperaturas más bajas de combustión y una mayor proporción de oxígeno no quemado. Esto limita la eficacia de los sistemas de postratamiento, comprometiendo el cumplimiento de normativas ambientales en estas zonas.

Estas limitaciones hacen evidente la necesidad de calibraciones específicas para vehículos que operan frecuentemente en entornos de montaña, así como el uso de sistemas de diagnóstico que permitan verificar el comportamiento del motor bajo condiciones de altitud, más allá de los valores de fábrica establecidos a nivel del mar.

1.17 Normativas técnicas y ambientales

La regulación de emisiones provenientes de vehículos diésel constituye un componente esencial de las políticas ambientales en numerosos países, dado el impacto negativo que tienen los gases de escape sobre la salud pública y la calidad del aire. Entre los parámetros más controlados se encuentran las partículas sólidas (PM), los óxidos de nitrógeno (NOx), el monóxido de carbono (CO) y, en particular, la opacidad del humo, la cual es indicativa de la concentración de hollín en los gases de combustión.

Tanto en Ecuador como en otras regiones del mundo, existen normativas técnicas que establecen procedimientos para medir y controlar dichos contaminantes. Sin embargo, la rigurosidad de estas regulaciones, así como los métodos de prueba empleados, varían entre países. Este apartado analiza, por un lado, la normativa

ecuatoriana actualmente vigente, la NTE INEN 2202 y, por otro la compara con estándares internacionales como las normas euro en Europa y las regulaciones de la EPA en Estados Unidos. Esta comparación permite valorar el grado de exigencia ambiental nacional en relación con los marcos regulatorios más avanzados.

1.18 NTE INEN 2202

La Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2202:2013 establece el procedimiento oficial para a la determinación de la opacidad de los gases de escape en motores diésel, mediante la técnica de aceleración libre. Esta prueba se realiza con el vehículo en régimen estático y consiste en acelerar el motor sin carga desde el ralentí hasta su régimen máximo, registrando el valor de opacidad que se genera en ese proceso. La medición se realiza con un opacímetro calibrado, y se toma en cuenta tres aceleraciones, considerando el valor medio como resultado final.

Esta norma es de aplicación obligatoria en la Revisión Técnica Vehicular (RTV) en todo el territorio ecuatoriano y constituye uno de los principales mecanismos para controlar las emisiones y constituye uno de los principales mecanismos para controlar las emisiones de flotas diésel, tanto públicas como privadas. Su implementación se enfoca en reducir la contaminación en zonas urbanas, donde la opacidad es visualmente evidente y contribuye a la formación de material particulado respirable (PM10 Y PM2,5).

Aunque la NTE INEN 2202 no establece explícitamente un límite numérico fijo para la opacidad válido a nivel nacional; si no que define el método de medición en la práctica, los municipios y centros de RTV aplican rangos de referencia que suelen oscilar entre 1.5 y 2.5 m^{-1} , dependiendo del tipo y año del vehículo. Es importante mencionar que, desde su publicación en el año 2013, esta norma no ha sido actualizada, lo cual ha generado debate en torno a su vigencia y capacidad para alinearse con estándares más exigentes a nivel internacional.

En ciudades de altitud como Quito o Cuenca, donde la combustión puede verse afectada por la menor densidad del aire, esta prueba estática puede no relejar completamente el comportamiento del motor en condiciones dinámicas reales, lo que representa una limitación técnica de método. No obstante, la NTE INEN 2202 sigue siendo el referente legal vigente para la evaluación de opacidad en Ecuador.

1.19 Normativa Euro 4 y otras referencias internacionales

En el contexto europeo, la regulación de emisiones de vehículos diésel ha evolucionado significativamente desde la implementación de las normas Euro, que han establecido límites cada vez más estrictos sobre gases contaminantes y material particulado. En especial, la norma Euro IV, vigente desde el 2005 para vehículos ligeros y desde 2006 para vehículos pesados, representa un punto de referencia técnico comparable a la normativa ecuatoriana NTE INEN 2202:2013, ya que ambas incluyen evaluaciones sobre la opacidad de los gases de escape.

La Unión Europea, mediante la Directiva 2010/47/UE, complementó las normas euro estableciendo límites de opacidad específicos durante las inspecciones técnicas periódicas (ITV) para vehículos diésel. En este contexto, se determinó que el valor máximo permitido de opacidad es de $1.5 m^{-1}$, medido bajo condiciones de aceleración libre, lo cual permite una comparación directa con el método descrito en la norma ecuatoriana. Esta directiva introdujo un enfoque más riguroso al incluir valores límite explícitos y homologados a nivel comunitario, promoviendo una mayor homogeneidad en la evaluación técnica de vehículos en circulación (Unión Europea, 2010).

A diferencia de Ecuador, donde el valor límite no está normado de forma centralizada en la NTE INEN 2202, sino que varía según el municipio o RTV, Europa establece un criterio uniforme, lo que facilita el control y la fiscalización ambiental. Además, en etapas posteriores como Euro 5 y Euro 6, se incorporaron tecnologías de postratamiento (DPF, SCR), lo que ha permitido reducir significativamente las emisiones de partículas sólidas y óxidos de nitrógeno (DieselNet, 2024).

Por su parte, en estados Unidos, la regulación de emisiones está a cargo de la Environmental Protection Agency (EPA), la cual no establece límites de opacidad como tal, sino que regula directamente el material particulado (PM) y otros contaminantes mediante ciclos dinámicos de prueba en banco de ensayos (FTP- 75). El estándar Tier Bin 5, vigente desde 2004 para vehículos livianos, establece un límite máximo de PM de 0.01 g/min., lo cual se considera técnicamente equivalente al Euro 4 en términos de severidad, aunque basado en metodologías diferentes (EPA, 2004).

La comparación entre estos marcos normativos evidencia que la regulación ecuatoriana, aunque funcional, presenta márgenes de mejora tanto en términos de actualización como de estandarización técnica. La incorporación de límites numéricos

definidos y adaptar el sistema de evaluación a condiciones dinámicas; como lo hacen las normas europeas y estadounidenses, podrían mejorar la eficacia del control ambiental y garantizar mayor uniformidad en su aplicación.

Tabla 3

Comparativa técnica de normativas de emisiones y opacidad

Aspecto técnico	NTE INEN 2202:2013	Euro 4 + Directiva 2010/47/UE	EPA Tier 2 Bin 5
Vigencia	Desde 2013	Desde 2005 (Euro 4) / 2010 (opacidad en ITV)	Desde 2004
Método de prueba	Aceleración libre (estática)	Aceleración libre (ITV)	Ciclo FTP-75 en banco dinámico
Parámetro de control	Opacidad (medida en m^{-1})	Opacidad (m^{-1}) y límites de NO _x , PM, HC, CO	PM, NO _x , NMHC, CO (no se mide opacidad directamente)
Valor límite de opacidad	No definido explícitamente a nivel nacional	$\leq 1.5 m^{-1}$	No aplica (se mide PM en g/mi)
Límite de partículas (PM)	No especificado	$\leq 0.025 g/km$	$\leq 0.01 g/mi$
Nivel de exigencia ambiental	Medio / variable según municipio	Alto (estandarizado en la UE)	Alto (metodología estricta y valores exigentes)
Actualización normativa	No actualizada desde 2013	Evolución continua hasta Euro 6	Vigente, evolucionada hacia Tier 3 y Tier 4

Nota: Con base en la INEN, 2013; Unión Europea, 2010; Diésel Net, 2024; EPA 2000. Esta tabla fue realizada por los Autores.

CAPÍTULO II

RECOLECCIÓN EXPERIMENTAL DE DATOS DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y OPACIDAD DE GASES EN DIFERENTES ALTITUDES

2.1 Instrumentos y equipos utilizados

Durante el desarrollo del presente estudio, se empleó una combinación de instrumentos de medición especializados, equipos automotrices de diagnóstico, y materiales auxiliares que permitieron instalar y operar correctamente los sistemas de evaluación de consumo de combustible y opacidad de gases. La correcta selección y configuración de estos elementos fue crucial para garantizar la validez de los datos recolectados en las diferentes altitudes geográficas.

A continuación, se detalla cada uno de los elementos utilizados, clasificándolos en: instrumentos de medición, equipos electrónicos de diagnóstico, y materiales complementarios para la instalación.

2.1.1 Medidor de Flujo de Combustible AIC 5004 Fuelflowmaster

Este equipo fue el principal instrumento para la determinación experimental del consumo de combustible del vehículo diésel. El modelo AIC 5004 Fuelflowmaster está diseñado específicamente para sistemas de inyección diésel de alta presión, como los sistemas Common Rail Direct Injection (CRDi).

Permite una medición precisa del flujo volumétrico de diésel (expresado en L/h), tanto en líneas de ida como de retorno, gracias a su doble sensor de desplazamiento positivo. Es compatible con motores de hasta seis cilindros y presenta una tolerancia mínima de ± 0.2 %, lo que lo convierte en una herramienta ideal para ensayos comparativos entre distintas condiciones de altitud.

2.1.2 Opacímetro MAHA MDO (Maschinenbau Haldenwang)

El MAHA MDO es un opacímetro digital utilizado para medir el grado de opacidad de los gases emitidos por vehículos diésel. La medición se expresa en unidades

HSU (Hartridge Smoke Units) y es realizada a través de la absorción de luz en un tubo óptico de paso directo.

Este instrumento cumple con los estándares establecidos por las normativas europeas y ecuatorianas (Euro IV / INEN 2202 y INEN 2207), permitiendo determinar el grado de contaminación atmosférica producida por el vehículo en función de la altitud.

2.2 Equipos Electrónicos de Diagnóstico

2.2.1 Escáner Automotriz LAUNCH X431 PRO

El Launch X431 PRO es un escáner profesional de diagnóstico automotriz, utilizado para la lectura en tiempo real de datos del sistema de control electrónico del motor (ECU).

Durante la presente investigación, este equipo permitió monitorear variables como: temperatura del refrigerante, presión del riel común, avance de inyección, régimen de giro del motor, posición del pedal del acelerador, entre otros.

Esta información fue esencial para correlacionar el comportamiento del motor con los resultados de consumo y opacidad en distintos entornos geográficos.

2.3 Materiales Complementarios para la Instalación

Para asegurar una conexión segura, estanca y funcional entre los sistemas de medición y el circuito de combustible del vehículo, fue necesario emplear una serie de materiales auxiliares.

Estos elementos permitieron adecuar el flujo del combustible hacia el medidor AIC 5004, filtrar impurezas, asegurar conexiones y prevenir fugas.

Tabla 4*Materiales complementarios utilizados para la instalación de los equipos*

N°	Materiales	Descripción técnica	Cantidad utilizada
1	Manguera de caucho 3/4"	Manguera de alta resistencia para transporte de diésel, compatible con CRDi	8 metros
2	Abrazaderas metálicas ajustables	Elementos de fijación para asegurar las mangueras a los acoples	12 unidades
3	Filtro de diésel	Elemento filtrante que retiene impurezas antes del ingreso al medidor	1 unidad
4	Acoples de cobre de 3/4" a 1/2"	Reductores metálicos para adaptar diámetros entre mangueras y sensores	2 unidades
5	Amarras plásticas de sujeción (bridas)	Elementos de sujeción para ordenamiento de cables, mangueras y sensores	10 unidades
6	Filtro tipo Whatman	Su función es capturar las partículas de hollín (carbonilla) emitidas por el escape del motor diésel durante la medición	8 unidades

Nota: Los materiales listados fueron seleccionados por su compatibilidad con sistemas diésel CRDi y su función en una instalación segura y eficiente de los equipos de medición. Fuente: (Autores)

2.4 Procesos y protocolos de medición

Durante la ejecución del presente trabajo experimental, se implementó un sistema de medición integrado por el equipo AIC 5004 Fuelflowmaster, el opacímetro MAHA MDO, y un escáner automotriz LAUNCH X431 Pro.

La correcta instalación y calibración de estos instrumentos fue fundamental para obtener datos precisos sobre el consumo de combustible y la emisión de gases contaminantes del motor CRDi bajo condiciones variables de altitud.

2.5 Preparación Previa de Equipos y Materiales

Antes de intervenir el sistema del vehículo, se organizó todo el instrumental necesario:

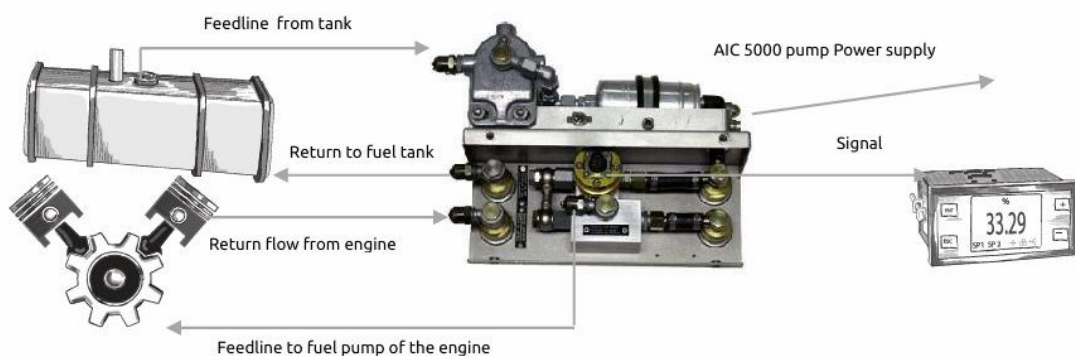
- El medidor AIC 5004 fue verificado, encendido y configurado.
- Se cortó una manguera de caucho de $\frac{3}{4}$ " en cuatro tramos iguales de aproximadamente 2 metros cada uno.
- Se alistaron 12 abrazaderas metálicas, filtros universales, acoples de cobre y amarras plásticas.
- Se conectó el escáner automotriz LAUNCH para verificar las condiciones iniciales del motor y descartar fallas previas.

2.6 Instalación del Sistema AIC 5004 Fuelflowmaster

Con base en el esquema de referencia, el equipo AIC 5004 fue integrado al sistema de combustible del vehículo de la siguiente manera:

Figura 12

Esquema de instalación del AIC 5004



Nota. (Systems, 2024)

2.6.1 Conexión del circuito de alimentación (ida):

Manguera 1: Desde el tanque de combustible hacia la entrada del AIC 5004 ("Feedline from tank").

Manguera 2: Desde la salida del AIC 5004 hacia la bomba de alta presión del motor ("Feedline to fuel pump of the engine").

2.6.2 Conexión del circuito de retorno:

Manguera 3: Desde el retorno del riel de inyectores hacia la entrada de retorno del AIC 5004 ("Return flow from engine").

Manguera 4: Desde la salida de retorno del equipo hacia el tanque ("Return to fuel tank").

Cada unión fue fijada con abrazaderas para evitar fugas y mantener el flujo controlado. La energía del AIC fue suministrada por una fuente externa de 12V, y su señal fue enviada al panel de lectura digital.

2.7 Instalación del Opacímetro MAHA MDO 2 LON

Para medir el nivel de opacidad de los gases de escape:

- Se acopló la sonda de medición al extremo del tubo de escape, asegurándola con un adaptador cónico.
- Se colocó un filtro tipo Whatman entre el escape y el sensor para evitar la entrada de impurezas.
- Se ejecutó el procedimiento de auto calibración para establecer la lectura base cero.
- El equipo registró las emisiones en unidades HSU (Hartridge Smoke Units) durante pruebas en vacío, ralentí y aceleración controlada.

2.8 Conexión y Lectura con Escáner Automotriz LAUNCH

- El escáner se conectó al conector OBD-II del vehículo ubicado bajo el tablero. Este dispositivo permitió:
- Leer parámetros como presión de riel, avance de inyección, RPM, carga del motor, temperatura del refrigerante y posición del pedal.
- Verificar que no existieran fallos activos en la ECU.
- Sincronizar datos electrónicos con los registros del AIC 5004 y el opacímetro.

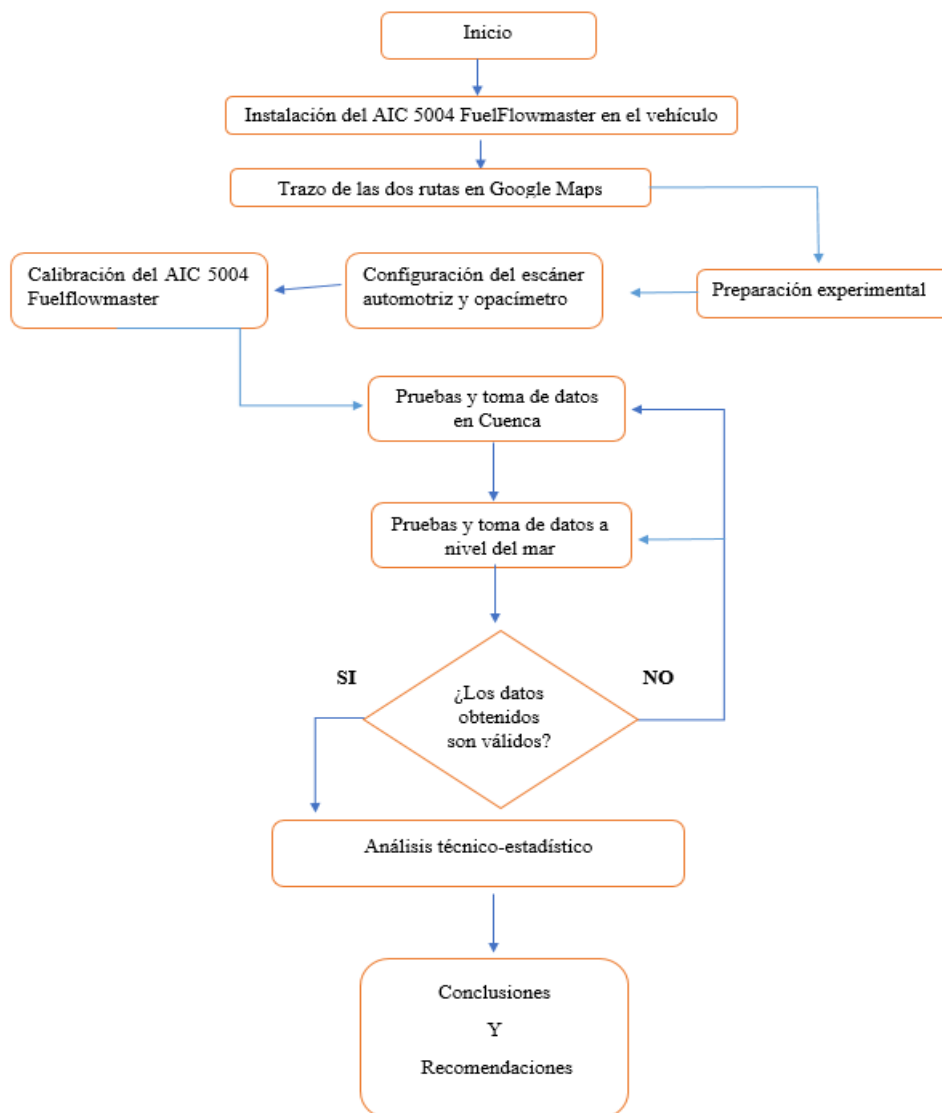
2.9 Validación Final del Sistema

- Tras conectar todos los componentes:
- Se revisó que no existieran fugas de combustible.
- Se confirmó que los equipos entregaban lecturas estables.
- Se ejecutaron pruebas preliminares a ralentí para validar el sistema antes del inicio formal de las pruebas comparativas de altitud.

2.10 Diagrama de flujo del proceso experimental para la recolección de datos de consumo y opacidad en motor CRDi a distintas altitudes

Figura 13

Diagrama de flujo del proceso experimental



Fuente: (Autores)

2.11 Vehículo utilizado para las pruebas de consumo y opacidad

2.11.1 Mitsubishi L200 2022 4x2 MT

La Mitsubishi L200 2022 4x2 MT es una pickup de construcción robusta, orientada a labores utilitarias y desplazamientos diarios. Incorpora un motor diésel de 2.4 litros con inyección directa Common Rail (CRDi), que optimiza la relación entre potencia, consumo y emisiones.

Su transmisión manual de 6 velocidades y tracción trasera le permiten una conducción eficiente con alta capacidad de carga. El sistema CRDi ajusta electrónicamente la inyección según las condiciones del entorno, manteniendo un desempeño estable incluso en zonas de altitud elevada.

Figura 14

Mitsubishi L200 4x2 TM



Fuente: (Autores)

Tabla 5*Ficha técnica de la Mitsubishi L200 2022*

Parámetro	Especificación técnica
Motor	2.4 L DOHC, 4 cilindros en línea, turbodiesel CRDi
Potencia máxima	178 HP @ 3.500 rpm
Torque máximo	430 Nm @ 2.500 rpm
Sistema de inyección	Common Rail Direct Injection (CRDi), control electrónico
Cilindrada	2.442 cm ³
Transmisión	Manual de 6 velocidades
Tracción	Trasera (4×2)
Consumo promedio (combinado)	8,5 – 9,0 L / 100 km (según altitud y carga)
Suspensión delantera	Doble horquilla con barra estabilizadora
Suspensión trasera	Eje rígido con hojas de resorte
Sistema de frenos	Disco ventilado adelante / tambor atrás
Capacidad del tanque	75 litros
Capacidad de carga útil	Aproximadamente 1.060 kg
Dimensiones (L × A × A)	5.095 × 1.815 × 1.655 mm
Distancia entre ejes	3.000 mm
Altura libre al suelo	200 mm
Peso bruto vehicular (GVWR)	2.650 kg aproximadamente

Fuente: (Mitsubishi Motors, 2020)

2.12 Determinación de rutas

Para el análisis comparativo del comportamiento vehicular, se definieron dos rutas de prueba ubicadas en zonas con marcada diferencia altitudinal: Cuenca y Guayaquil.

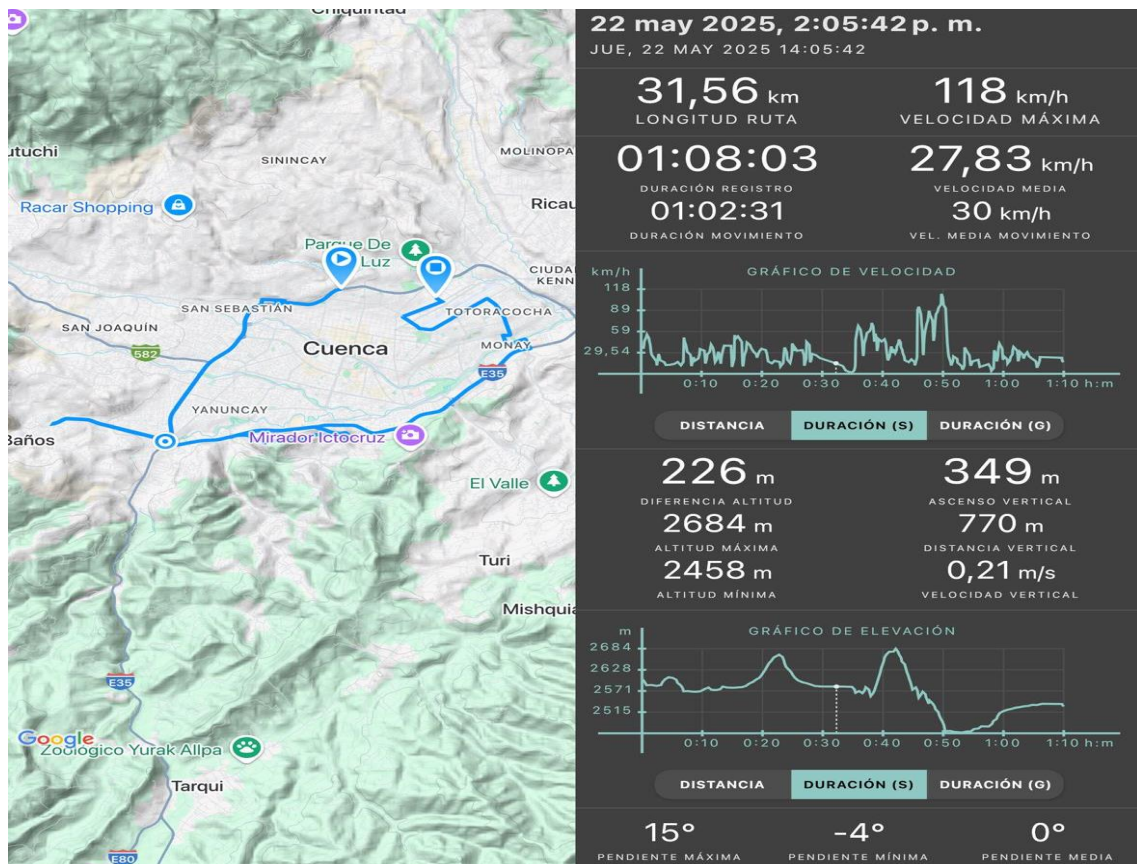
La selección respondió a la necesidad de evaluar el desempeño del motor bajo distintas condiciones de presión atmosférica y topografía.

Los ensayos se realizaron alrededor del mediodía, horario determinado como óptimo tras observaciones previas por su estabilidad en el flujo vehicular. Se estableció

una duración aproximada de una hora por recorrido, con el fin de garantizar homogeneidad en las condiciones operativas y permitir una comparación técnica consistente entre ambos entornos.

Figura 15

Ruta 1 Ciudad de Cuenca



Fuente: (Geo Tracker Google)

El trayecto correspondiente a la ciudad de Cuenca fue estructurado abarcando sectores tanto urbanos como periféricos, entre los cuales se encuentran San Sebastián, Yanuncay, Monay, Totoracocha y Baños.

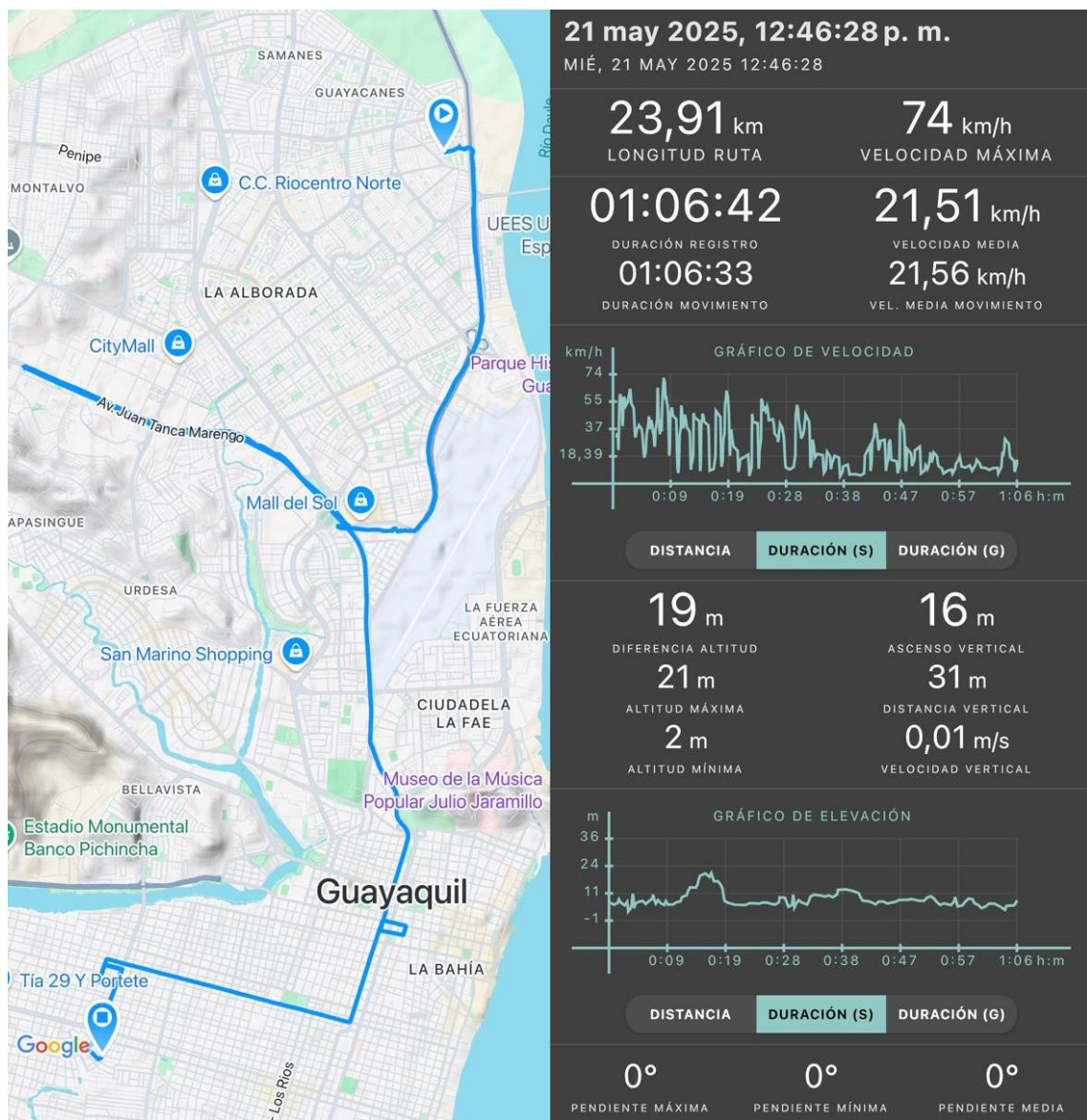
La selección de esta ruta obedeció a la necesidad de contar con un recorrido variado, que incluya superficies planas, tramos curvos y pendientes leves, lo cual permite evaluar de manera más precisa el comportamiento del vehículo en una zona de altura considerable. La distancia recorrida fue de aproximadamente 31,5 kilómetros, y la duración total del recorrido se mantuvo ligeramente por encima de una hora.

El recorrido se realizó en horas del mediodía, horario escogido en función de un análisis previo del tránsito urbano, que identificó este periodo como óptimo para realizar pruebas con un flujo vehicular estable, evitando tanto congestiones intensas como calles completamente despejadas.

La ruta se diseñó con el objetivo de reflejar fielmente las condiciones propias del entorno urbano cuencano, incluyendo sus variaciones geográficas.

Figura 16

Ruta 2 Ciudad de Guayaquil



Fuente: (Geo Tracker Google)

La segunda ruta fue desarrollada en la ciudad de Guayaquil, abarcando un circuito urbano que comprendió zonas como Urdesa, el sector del Mall del Sol, la Ciudadela La FAE, la avenida Tía 29 y áreas del norte de la ciudad en dirección a Samanes. El trayecto se llevó a cabo durante el mediodía, al igual que en Cuenca, con la finalidad de mantener condiciones similares en cuanto al flujo vehicular.

El recorrido totalizó cerca de 24 kilómetros y tuvo una duración cercana a una hora. Este itinerario se estableció sobre terreno llano, característico de las ciudades costeras, y atravesó calles típicas de zonas metropolitanas con tránsito moderado a alto.

Estas condiciones permitieron evaluar el desempeño del vehículo en situaciones de conducción frecuentes en centros urbanos, marcadas por constantes detenciones y arranques.

2.13 Recolección de datos

En las siguientes tablas se detallan los datos registrados por el medidor de consumo AIC 5004 durante las pruebas dinámicas en ruta. Las variables reflejadas corresponden a mediciones directas de consumo de combustible en un sistema de inyección Common Rail Direct Injection (CRDi), bajo condiciones reales de operación.

Esta información fue recopilada durante los recorridos previamente definidos y permite evaluar el comportamiento del sistema de inyección en función de las condiciones geográficas y operativas presentes en cada ruta.

2.13.1 Datos del consumo de combustible a 2.560 msnm

Tabla 6

Datos obtenidos del consumo de combustible en la Ciudad de Cuenca

	Current	Total,	Ø	Current	Total,
Time:	Consumption:	Consumption:	Consumption:	Emission:	Emission:
	L/H	L	L/H	kg/h CO2	t CO2
14:07:40	1.046	0.740	1.039	2.771	0.002
14:07:49	14.965	0.820	1.273	39.657	0.002
14:07:54	3.741	0.820	1.273	9.913	0.002
14:07:59	19.505	0.830	1.278	51.688	0.002
14:08:04	12.076	0.840	1.278	32.001	0.002

14:08:09	1.803	0.840	1.285	4.777	0.002
14:08:14	0.867	0.840	1.285	2.297	0.002
14:08:19	10.557	0.850	1.298	27.976	0.002
14:08:24	1.552	0.860	1.298	4.112	0.002
14:08:29	5.154	0.860	1.319	13.658	0.002
14:08:34	4.246	0.870	1.319	11.251	0.002
14:08:39	21.906	0.890	1.403	58.050	0.002
14:08:49	22.801	1.030	1.576	60.422	0.003
14:08:54	2.623	1.030	1.576	6.950	0.003
14:08:59	3.110	1.040	1.588	8.241	0.003
14:09:04	3.110	1.040	1.588	8.241	0.003
14:09:09	0.777	1.040	1.591	2.059	0.003
14:09:14	0.378	1.040	1.591	1.001	0.003
14:09:19	1.402	1.040	1.597	3.715	0.003
14:09:24	3.265	1.040	1.597	8.652	0.003
14:09:29	3.265	1.040	1.609	8.652	0.003
14:09:34	0.816	1.040	1.609	2.162	0.003
14:09:39	0.816	1.040	1.613	2.162	0.003
14:09:44	0.204	1.040	1.613	0.540	0.003
14:09:49	0.204	1.040	1.613	0.540	0.003
14:09:54	0.051	1.040	1.613	0.135	0.003
14:09:59	0.051	1.040	1.614	0.135	0.003
14:10:04	0.012	1.040	1.614	0.031	0.003
14:10:09	8.964	1.050	1.649	23.754	0.003
14:10:14	4.780	1.060	1.649	12.667	0.003
14:10:19	9.938	1.080	1.688	26.335	0.003
14:10:24	2.484	1.080	1.688	6.582	0.003
14:10:29	2.484	1.080	1.697	6.582	0.003
14:10:34	0.378	1.080	1.697	1.001	0.003
14:10:39	9.150	1.100	1.756	24.247	0.003
14:10:44	6.272	1.110	1.756	16.620	0.003
14:10:49	16.089	1.130	1.801	42.635	0.003
14:10:54	20.373	1.150	1.801	53.988	0.003

14:11:04	32.477	1.250	2.049	86.064	0.003
14:11:09	37.287	1.290	2.195	98.810	0.003
14:11:14	2.330	1.290	2.195	6.174	0.003
14:11:19	10.415	1.310	2.253	27.599	0.003
14:11:24	11.298	1.320	2.253	29.939	0.003
14:11:29	73.200	1.390	2.465	193.980	0.004
14:11:34	9.243	1.390	2.465	24.493	0.004
14:11:39	2.310	1.390	2.474	6.121	0.004
14:11:44	2.310	1.390	2.474	6.121	0.004
14:11:49	4.869	1.400	2.491	12.902	0.004
14:11:54	6.554	1.410	2.491	17.368	0.004
14:11:59	1.638	1.410	2.497	4.340	0.004
14:12:04	1.638	1.410	2.497	4.340	0.004
14:12:09	0.409	1.410	2.499	1.083	0.004
14:12:14	0.409	1.410	2.499	1.083	0.004
14:12:19	1.433	1.410	2.504	3.797	0.004
14:12:24	1.576	1.410	2.504	4.176	0.004
14:12:29	0.840	1.410	2.508	2.226	0.004
14:12:34	1.716	1.420	2.508	4.547	0.004
14:12:39	1.242	1.420	2.512	3.291	0.004
14:12:44	1.242	1.420	2.512	3.291	0.004
14:12:49	0.389	1.420	2.514	1.030	0.004
14:12:54	2.058	1.420	2.514	5.453	0.004
14:12:59	2.424	1.420	2.523	6.423	0.004
14:13:04	2.773	1.430	2.523	7.348	0.004
14:13:09	3.794	1.440	2.538	10.054	0.004
14:13:14	3.362	1.440	2.538	8.909	0.004
14:13:19	3.362	1.440	2.551	8.909	0.004
14:13:24	0.840	1.440	2.551	2.226	0.004
14:13:29	0.840	1.440	2.554	2.226	0.004
14:13:34	0.210	1.440	2.554	0.556	0.004
14:13:39	0.210	1.440	2.555	0.556	0.004
14:13:44	0.052	1.440	2.555	0.137	0.004

14:13:49	0.052	1.440	2.555	0.137	0.004
14:13:54	0.013	1.440	2.555	0.034	0.004
14:13:59	0.013	1.440	2.556	0.034	0.004
14:14:04	0.003	1.440	2.556	0.007	0.004
14:14:09	0.003	1.440	2.556	0.007	0.004
14:14:14	3.725	1.440	2.556	9.871	0.004
14:14:24	26.347	1.550	2.688	69.819	0.004
14:14:29	1.646	1.550	2.695	4.361	0.004
14:14:34	1.646	1.550	2.695	4.361	0.004
14:14:39	0.411	1.550	2.696	1.089	0.004
14:14:44	11.022	1.560	2.696	29.208	0.004
14:14:49	1.329	1.570	2.705	3.521	0.004
14:14:54	27.208	1.600	2.705	72.101	0.004
14:15:09	2.773	1.760	2.879	7.348	0.005
14:15:14	2.773	1.760	2.879	7.348	0.005
14:15:19	0.693	1.760	2.890	1.836	0.005
14:15:24	0.693	1.760	2.890	1.836	0.005
14:15:29	0.173	1.760	2.893	0.458	0.005
14:15:34	0.173	1.760	2.893	0.458	0.005
14:15:39	0.043	1.760	2.894	0.113	0.005
14:15:44	0.043	1.760	2.894	0.113	0.005
14:15:49	0.010	1.760	2.894	0.026	0.005
14:15:54	0.010	1.760	2.894	0.026	0.005
14:15:59	0.068	1.770	2.894	0.180	0.005
14:16:04	15.913	1.790	2.894	42.169	0.005
14:16:09	3.943	1.800	2.909	10.448	0.005
14:16:14	3.943	1.800	2.909	10.448	0.005
14:16:19	0.985	1.800	2.913	2.610	0.005
14:16:24	0.985	1.800	2.913	2.610	0.005
14:16:29	0.246	1.800	2.914	0.651	0.005
14:16:34	0.246	1.800	2.914	0.651	0.005
14:16:39	0.061	1.800	2.914	0.161	0.005
14:16:44	8.491	1.810	2.914	22.501	0.005

14:16:49	8.490	1.820	2.953	22.498	0.005
14:16:54	2.122	1.820	2.953	5.623	0.005
14:16:59	2.122	1.820	2.961	5.623	0.005
14:17:04	0.530	1.820	2.961	1.404	0.005
14:17:09	6.193	1.830	2.962	16.411	0.005
14:17:14	5.591	1.830	2.962	14.816	0.005
14:17:19	7.344	1.840	2.982	19.461	0.005
14:17:24	2.837	1.850	2.982	7.518	0.005
14:17:29	2.067	1.850	2.990	5.477	0.005
14:17:34	1.083	1.860	2.990	2.869	0.005
14:17:39	22.277	1.880	3.034	59.034	0.005
14:17:44	18.694	1.910	3.034	49.539	0.005
14:17:49	7.107	1.920	3.068	18.833	0.005
14:17:54	1.504	1.930	3.068	3.985	0.005
14:17:59	1.504	1.930	3.074	3.985	0.005
14:18:04	0.376	1.930	3.074	0.996	0.005
14:18:09	0.376	1.930	3.075	0.996	0.005
14:18:14	1.464	1.930	3.075	3.879	0.005
14:18:19	1.847	1.940	3.095	4.894	0.005
14:18:24	7.258	1.950	3.095	19.233	0.005
14:18:29	4.038	1.950	3.111	10.700	0.005
14:18:34	2.539	1.950	3.111	6.728	0.005
14:18:39	2.539	1.950	3.121	6.728	0.005
14:18:44	0.408	1.960	3.121	1.081	0.005
14:18:49	1.766	1.960	3.128	4.679	0.005
14:18:54	1.766	1.960	3.128	4.679	0.005
14:18:59	19.082	1.970	3.130	50.567	0.005
14:19:04	19.844	1.990	3.130	52.586	0.005
14:19:09	18.474	2.020	3.230	48.956	0.005
14:19:14	1.495	2.030	3.230	3.961	0.005
14:19:19	0.863	2.030	3.233	2.286	0.005
14:19:24	1.512	2.030	3.233	4.006	0.005
14:19:29	1.472	2.030	3.239	3.900	0.005

14:19:34	1.472	2.030	3.239	3.900	0.005
14:19:39	0.368	2.030	3.240	0.975	0.005
14:19:44	0.275	2.040	3.240	0.728	0.005
14:19:49	3.923	2.040	3.256	10.395	0.005
14:19:54	3.923	2.040	3.256	10.395	0.005
14:19:59	1.333	2.040	3.261	3.532	0.005
14:20:04	1.333	2.040	3.261	3.532	0.005
14:20:09	0.323	2.050	3.262	0.855	0.005
14:20:14	3.849	2.060	3.262	10.199	0.005
14:20:19	9.083	2.080	3.353	24.069	0.006
14:20:24	20.854	2.090	3.353	55.263	0.006
14:20:34	3.525	2.150	3.565	9.341	0.006
14:20:39	3.525	2.150	3.579	9.341	0.006
14:20:44	0.881	2.150	3.579	2.334	0.006
14:20:49	21.072	2.170	3.661	55.840	0.006
14:20:54	11.590	2.180	3.661	30.713	0.006
14:20:59	15.058	2.190	3.688	39.903	0.006
14:21:04	27.411	2.220	3.688	72.639	0.006
14:21:09	11.952	2.230	3.734	31.672	0.006
14:21:14	7.915	2.240	3.734	20.974	0.006
14:21:19	6.815	2.250	3.759	18.059	0.006
14:21:29	12.260	2.320	3.807	32.489	0.006
14:21:34	3.065	2.320	3.807	8.122	0.006
14:21:39	3.065	2.320	3.819	8.122	0.006
14:21:44	0.766	2.320	3.819	2.029	0.006
14:21:49	4.849	2.330	3.833	12.849	0.006
14:21:54	1.795	2.330	3.833	4.756	0.006
14:21:59	1.795	2.330	3.840	4.756	0.006
14:22:04	0.448	2.330	3.840	1.187	0.006
14:22:09	0.448	2.330	3.842	1.187	0.006
14:22:14	0.112	2.330	3.842	0.296	0.006
14:22:19	0.112	2.330	3.842	0.296	0.006
14:22:24	0.028	2.330	3.842	0.074	0.006

14:22:29	0.028	2.330	3.842	0.074	0.006
14:22:34	0.007	2.330	3.842	0.018	0.006
14:22:39	0.007	2.330	3.842	0.018	0.006
14:22:44	0.001	2.330	3.842	0.002	0.006
14:22:49	13.806	2.340	3.897	36.585	0.006
14:22:54	19.340	2.370	3.897	51.251	0.006
14:22:59	32.146	2.400	3.944	85.186	0.006
14:23:09	34.736	2.540	4.080	92.050	0.007
14:23:14	2.817	2.550	4.080	7.465	0.007
14:23:19	1.874	2.550	4.087	4.966	0.007
14:23:24	1.874	2.550	4.087	4.966	0.007
14:23:29	0.381	2.560	4.089	1.009	0.007
14:23:34	3.761	2.560	4.089	9.966	0.007
14:23:39	2.621	2.570	4.104	6.945	0.007
14:23:44	2.829	2.570	4.104	7.496	0.007
14:23:49	1.141	2.570	4.108	3.023	0.007
14:23:54	8.476	2.590	4.108	22.461	0.007
14:23:59	5.539	2.600	4.156	14.678	0.007
14:24:04	1.634	2.600	4.156	4.330	0.007
14:24:09	1.634	2.600	4.163	4.330	0.007
14:24:14	0.788	2.600	4.163	2.088	0.007
14:24:19	0.788	2.600	4.166	2.088	0.007
14:24:24	0.197	2.600	4.166	0.522	0.007
14:24:29	0.197	2.600	4.167	0.522	0.007
14:24:34	41.401	2.660	4.167	109.712	0.007
14:24:44	4.249	2.780	4.527	11.259	0.007
14:24:49	1.794	2.780	4.533	4.754	0.007
14:24:54	1.357	2.790	4.533	3.596	0.007
14:24:59	10.097	2.790	4.540	26.757	0.007
14:25:04	13.903	2.810	4.540	36.842	0.007
14:25:09	1.767	2.820	4.567	4.682	0.007
14:25:14	7.349	2.830	4.567	19.474	0.007
14:25:24	2.094	2.880	4.742	5.549	0.008

14:25:29	2.498	2.880	4.752	6.619	0.008
14:25:34	7.627	2.890	4.752	20.211	0.008
14:25:39	23.252	2.920	4.813	61.617	0.008
14:25:44	18.661	2.940	4.813	49.451	0.008
14:25:49	11.106	2.960	4.857	29.430	0.008
14:25:54	10.621	2.980	4.857	28.145	0.008
14:25:59	1.557	2.990	4.866	4.126	0.008
14:26:04	18.165	3.010	4.866	48.137	0.008
14:26:09	26.615	3.050	4.971	70.529	0.008
14:26:14	6.835	3.060	4.971	18.112	0.008
14:26:19	10.540	3.070	5.003	27.931	0.008
14:26:24	2.635	3.070	5.003	6.982	0.008
14:26:29	5.023	3.080	5.012	13.310	0.008
14:26:34	3.542	3.080	5.012	9.386	0.008
14:26:39	2.219	3.080	5.021	5.880	0.008
14:26:44	3.053	3.090	5.021	8.090	0.008
14:26:49	3.053	3.090	5.033	8.090	0.008
14:26:54	0.508	3.090	5.033	1.346	0.008
14:26:59	2.747	3.100	5.044	7.279	0.008
14:27:04	16.553	3.120	5.044	43.865	0.008
14:27:09	26.167	3.170	5.196	69.342	0.008
14:27:14	1.842	3.170	5.196	4.881	0.008
14:27:19	1.842	3.170	5.203	4.881	0.008
14:27:24	5.916	3.180	5.203	15.677	0.008
14:27:29	1.613	3.190	5.228	4.274	0.008
14:27:34	0.851	3.190	5.228	2.255	0.008
14:27:39	9.671	3.200	5.243	25.628	0.008
14:27:44	11.575	3.210	5.243	30.673	0.009
14:27:49	4.006	3.210	5.258	10.615	0.009
14:27:54	2.116	3.220	5.258	5.607	0.009
14:27:59	23.802	3.230	5.265	63.075	0.009
14:28:04	14.372	3.250	5.265	38.085	0.009
14:28:14	15.208	3.380	5.713	40.301	0.009

14:28:19	2.512	3.390	5.752	6.656	0.009
14:28:24	4.333	3.390	5.752	11.482	0.009
14:28:29	3.663	3.400	5.768	9.706	0.009
14:28:34	4.035	3.400	5.768	10.692	0.009
14:28:39	4.035	3.400	5.783	10.692	0.009
14:28:44	1.008	3.400	5.783	2.671	0.009
14:28:49	0.448	3.410	5.785	1.187	0.009
14:29:04	10.088	3.630	6.199	26.733	0.010
14:29:09	2.758	3.630	6.204	7.308	0.010
14:29:14	4.550	3.640	6.204	12.057	0.010
14:29:19	1.970	3.640	6.209	5.220	0.010
14:29:24	1.970	3.640	6.209	5.220	0.010
14:29:29	9.519	3.650	6.246	25.225	0.010
14:29:34	5.353	3.650	6.246	14.185	0.010
14:29:39	1.860	3.650	6.268	4.929	0.010
14:29:44	61.155	3.730	6.268	162.060	0.010
14:29:54	27.929	3.910	6.588	74.011	0.010
14:29:59	16.343	3.930	6.652	43.308	0.010
14:30:04	2.046	3.930	6.652	5.421	0.010
14:30:09	2.046	3.930	6.661	5.421	0.010
14:30:14	0.511	3.930	6.661	1.354	0.010
14:30:19	0.511	3.930	6.663	1.354	0.010
14:30:24	0.127	3.930	6.663	0.336	0.010
14:30:29	0.127	3.930	6.663	0.336	0.010
14:30:34	0.031	3.930	6.663	0.082	0.010
14:30:39	0.031	3.930	6.663	0.082	0.010
14:30:44	0.089	3.930	6.663	0.235	0.010
14:30:49	0.089	3.930	6.663	0.235	0.010
14:30:54	37.793	3.960	6.663	100.151	0.010
14:30:59	14.759	3.980	6.706	39.111	0.011
14:31:04	3.689	3.980	6.706	9.775	0.011
14:31:09	2.360	3.980	6.711	6.254	0.011
14:31:14	2.360	3.980	6.711	6.254	0.011

14:31:19	0.590	3.980	6.721	1.563	0.011
14:31:24	0.371	3.990	6.721	0.983	0.011
14:31:29	0.371	3.990	6.722	0.983	0.011
14:31:34	0.092	3.990	6.722	0.243	0.011
14:31:39	0.092	3.990	6.722	0.243	0.011
14:31:44	0.023	3.990	6.722	0.060	0.011
14:31:49	0.023	3.990	6.723	0.060	0.011
14:31:54	0.005	3.990	6.723	0.013	0.011
14:31:59	0.005	3.990	6.723	0.013	0.011
14:32:04	8.985	4.000	6.723	23.810	0.011
14:32:09	6.018	4.010	6.746	15.947	0.011
14:32:14	1.504	4.010	6.746	3.985	0.011
14:32:19	1.504	4.010	6.752	3.985	0.011
14:32:24	0.376	4.010	6.752	0.996	0.011
14:32:29	0.376	4.010	6.754	0.996	0.011
14:32:34	0.150	4.010	6.754	0.397	0.011
14:32:39	54.986	4.070	6.947	145.712	0.011
14:32:44	18.361	4.130	6.947	48.656	0.011
14:32:49	3.526	4.140	6.960	9.343	0.011
14:32:54	1.575	4.140	6.960	4.173	0.011
14:32:59	1.575	4.140	6.967	4.173	0.011
14:33:04	0.393	4.140	6.967	1.041	0.011
14:33:09	0.393	4.140	6.968	1.041	0.011
14:33:14	0.098	4.140	6.968	0.259	0.011
14:33:19	1.839	4.140	6.969	4.873	0.011
14:33:24	2.868	4.150	6.969	7.600	0.011
14:33:29	1.774	4.150	6.976	4.701	0.011
14:33:34	1.774	4.150	6.976	4.701	0.011
14:33:39	0.443	4.150	6.977	1.173	0.011
14:33:44	0.443	4.150	6.977	1.173	0.011

Fuente. (Autores)

La Tabla 6 muestra una porción representativa de los datos obtenidos con el equipo de medición AIC 5004 durante ensayos dinámicos efectuados en la ciudad de

Cuenca. Esta muestra forma parte de un conjunto más amplio de registros, cuya totalidad será analizada de manera detallada en la sección de resultados, mientras que las tablas completas se incluirán en los anexos del presente documento.

Los datos reflejan el comportamiento del sistema de inyección Common Rail Direct Injection (CRDi) en condiciones reales de circulación urbana, lo cual permite observar de forma preliminar el consumo de combustible en distintos momentos de carga y demanda del motor.

Dado que Cuenca se encuentra a una altitud considerable, los valores obtenidos también ofrecen una referencia inicial sobre el impacto de la altura sobre la eficiencia del motor y su desempeño en términos de consumo específico.

Cabe resaltar que esta tabla no presenta todos los registros recolectados, sino una muestra seleccionada con fines ilustrativos. El análisis integral se realizará una vez procesado el total de los datos, lo que permitirá obtener conclusiones más sólidas y representativas del comportamiento del sistema CRDi en distintos entornos geográficos.

2.13.2 Recolección de los datos del consumo de combustible en Guayaquil

Tabla 7

Datos obtenidos del consumo de combustible a nivel del mar

Time:	Current Consumption: L/H	Total, Consumption: L	Ø Consumption: L/H	Current Emission: kg/h CO2	Total, Emission: t CO2
12:48:18	1.994	0.030	0.051	5.284	0.000
12:48:22	1.722	0.030	0.058	4.563	0.000
12:48:27	3.784	0.040	0.058	10.027	0.000
12:48:32	10.615	0.050	0.098	28.129	0.000
12:48:37	2.322	0.060	0.098	6.153	0.000
12:48:42	2.322	0.060	0.107	6.153	0.000
12:48:47	34.083	0.080	0.107	90.319	0.000
12:48:52	9.755	0.090	0.120	25.850	0.000
12:48:57	5.507	0.090	0.120	14.593	0.000
12:49:02	1.376	0.090	0.125	3.646	0.000

12:49:07	1.174	0.100	0.125	3.111	0.000
12:49:12	17.899	0.120	0.196	47.432	0.000
12:49:17	9.332	0.140	0.196	24.729	0.000
12:49:22	22.439	0.180	0.284	59.463	0.000
12:49:27	10.974	0.190	0.284	29.081	0.001
12:49:32	9.051	0.200	0.324	23.985	0.001
12:49:37	9.140	0.210	0.324	24.221	0.001
12:49:42	1.622	0.220	0.331	4.298	0.001
12:49:47	1.622	0.220	0.331	4.298	0.001
12:49:52	0.405	0.220	0.332	1.073	0.001
12:49:57	20.841	0.250	0.332	55.228	0.001
12:50:02	13.926	0.300	0.551	36.903	0.001
12:50:07	7.580	0.310	0.551	20.087	0.001
12:50:12	6.372	0.320	0.591	16.885	0.001
12:50:17	5.412	0.330	0.591	14.341	0.001
12:50:22	3.854	0.330	0.608	10.213	0.001
12:50:27	3.685	0.340	0.608	9.765	0.001
12:50:32	8.382	0.350	0.645	22.212	0.001
12:50:37	7.921	0.360	0.645	20.990	0.001
12:50:42	6.838	0.370	0.672	18.120	0.001
12:50:47	11.106	0.380	0.672	29.430	0.001
12:50:52	7.188	0.390	0.702	19.048	0.001
12:50:57	11.093	0.410	0.702	29.396	0.001
12:51:02	6.312	0.420	0.727	16.726	0.001
12:51:07	8.470	0.440	0.727	22.445	0.001
12:51:12	8.207	0.450	0.759	21.748	0.001
12:51:17	15.002	0.460	0.759	39.755	0.001
12:51:22	9.256	0.470	0.803	24.528	0.001
12:51:27	2.302	0.480	0.803	6.100	0.001
12:51:32	1.905	0.490	0.811	5.048	0.001
12:51:37	1.905	0.490	0.811	5.048	0.001
12:51:42	0.476	0.490	0.813	1.261	0.001
12:51:47	0.476	0.490	0.813	1.261	0.001

12:51:52	4.246	0.490	0.829	11.251	0.001
12:51:57	3.655	0.500	0.829	9.685	0.001
12:52:02	9.562	0.510	0.864	25.339	0.001
12:52:07	15.786	0.530	0.864	41.832	0.001
12:52:12	11.311	0.550	0.932	29.974	0.001
12:52:17	11.388	0.570	0.932	30.178	0.002
12:52:22	3.754	0.570	0.946	9.948	0.002
12:52:27	3.754	0.570	0.946	9.948	0.002
12:52:32	0.938	0.570	0.950	2.485	0.002
12:52:37	17.141	0.590	0.950	45.423	0.002
12:52:42	3.410	0.590	0.963	9.036	0.002
12:52:47	8.647	0.610	0.963	22.914	0.002
12:52:52	6.704	0.610	0.990	17.765	0.002
12:52:57	1.200	0.620	0.990	3.180	0.002
12:53:02	1.550	0.620	0.996	4.107	0.002
12:53:07	1.550	0.620	0.996	4.107	0.002
12:53:12	0.387	0.620	0.997	1.025	0.002
12:53:17	9.997	0.620	0.997	26.492	0.002
12:53:22	13.312	0.640	1.049	35.276	0.002
12:53:27	3.328	0.640	1.049	8.819	0.002
12:53:32	1.149	0.640	1.062	3.044	0.002
12:53:37	7.456	0.650	1.062	19.758	0.002
12:53:42	1.390	0.650	1.070	3.683	0.002
12:53:47	6.495	0.680	1.070	17.211	0.002
12:53:52	1.081	0.680	1.074	2.864	0.002
12:53:57	11.029	0.690	1.074	29.226	0.002
12:54:02	8.959	0.700	1.093	23.741	0.002
12:54:07	4.294	0.710	1.093	11.379	0.002
12:54:12	6.650	0.730	1.198	17.622	0.002
12:54:17	7.112	0.750	1.198	18.846	0.002
12:54:22	1.778	0.750	1.205	4.711	0.002
12:54:27	10.959	0.760	1.205	29.041	0.002
12:54:32	4.613	0.770	1.223	12.224	0.002

12:54:37	3.690	0.770	1.223	9.778	0.002
12:54:42	3.404	0.780	1.236	9.020	0.002
12:54:47	1.522	0.780	1.236	4.033	0.002
12:54:52	25.253	0.800	1.282	66.920	0.002
12:54:57	8.475	0.810	1.282	22.458	0.002
12:55:02	7.823	0.820	1.311	20.730	0.002
12:55:07	1.378	0.830	1.311	3.651	0.002
12:55:12	0.989	0.830	1.317	2.620	0.002
12:55:17	19.738	0.850	1.317	52.305	0.002
12:55:22	14.207	0.860	1.345	37.648	0.002
12:55:27	6.411	0.880	1.345	16.989	0.002
12:55:32	5.355	0.890	1.373	14.190	0.002
12:55:37	3.446	0.890	1.373	9.131	0.002
12:55:42	3.446	0.890	1.386	9.131	0.002
12:55:47	0.861	0.890	1.386	2.281	0.002
12:55:52	0.861	0.890	1.390	2.281	0.002
12:55:57	0.215	0.890	1.390	0.569	0.002
12:56:02	0.181	0.890	1.391	0.479	0.002
12:56:07	6.084	0.900	1.391	16.122	0.002
12:56:12	21.656	0.920	1.443	57.388	0.002
12:56:17	7.226	0.940	1.443	19.148	0.002
12:56:22	19.860	0.970	1.525	52.629	0.003
12:56:27	19.433	0.990	1.525	51.497	0.003
12:56:32	12.768	1.000	1.576	33.835	0.003
12:56:37	12.205	1.020	1.576	32.343	0.003
12:56:42	5.038	1.030	1.596	13.350	0.003
12:56:47	7.759	1.040	1.596	20.561	0.003
12:56:52	7.483	1.040	1.625	19.829	0.003
12:56:57	7.970	1.060	1.625	21.120	0.003
12:57:02	7.572	1.070	1.653	20.065	0.003
12:57:07	6.725	1.080	1.653	17.821	0.003
12:57:12	1.817	1.080	1.681	4.815	0.003
12:57:17	1.817	1.080	1.681	4.815	0.003

12:57:22	0.454	1.080	1.689	1.203	0.003
12:57:27	0.454	1.080	1.689	1.203	0.003
12:57:32	24.706	1.090	1.785	65.470	0.003
12:57:37	21.455	1.120	1.785	56.855	0.003
12:57:42	12.903	1.130	1.797	34.192	0.003
12:57:47	18.699	1.150	1.797	49.552	0.003
12:57:52	5.332	1.160	1.851	14.129	0.003
12:57:57	6.138	1.170	1.851	16.265	0.003
12:58:02	6.115	1.180	1.857	16.204	0.003
12:58:07	8.054	1.180	1.857	21.343	0.003
12:58:12	2.013	1.180	1.864	5.334	0.003
12:58:17	2.013	1.180	1.864	5.334	0.003
12:58:22	0.503	1.180	1.866	1.332	0.003
12:58:27	0.503	1.180	1.866	1.332	0.003
12:58:32	0.125	1.180	1.867	0.331	0.003
12:58:37	0.125	1.180	1.867	0.331	0.003
12:58:42	0.109	1.190	1.867	0.288	0.003
12:58:47	0.524	1.190	1.867	1.388	0.003
12:58:52	3.106	1.200	1.916	8.230	0.003
12:58:57	9.548	1.210	1.916	25.302	0.003
12:59:02	2.387	1.210	1.925	6.325	0.003
12:59:07	2.387	1.210	1.925	6.325	0.003
12:59:12	3.803	1.220	1.940	10.077	0.003
12:59:17	22.628	1.240	1.940	59.964	0.003
12:59:22	32.773	1.270	2.069	86.848	0.003
12:59:27	5.728	1.270	2.069	15.179	0.003
12:59:32	12.261	1.300	2.122	32.491	0.003
12:59:37	5.040	1.300	2.122	13.356	0.003
12:59:42	1.260	1.310	2.127	3.339	0.003
12:59:47	1.260	1.310	2.127	3.339	0.003
12:59:52	0.342	1.310	2.129	0.906	0.003
12:59:57	3.029	1.310	2.129	8.026	0.003
13:00:02	10.796	1.330	2.170	28.609	0.004

13:00:07	5.764	1.340	2.170	15.274	0.004
13:00:12	9.986	1.360	2.221	26.462	0.004
13:00:17	1.195	1.360	2.221	3.166	0.004
13:00:22	1.195	1.360	2.226	3.166	0.004
13:00:27	0.298	1.360	2.226	0.789	0.004
13:00:32	0.298	1.360	2.227	0.789	0.004
13:00:37	0.074	1.360	2.227	0.196	0.004
13:00:42	0.074	1.360	2.227	0.196	0.004
13:00:47	0.140	1.360	2.227	0.371	0.004
13:00:52	0.554	1.360	2.230	1.468	0.004
13:00:57	1.750	1.370	2.230	4.637	0.004
13:01:02	1.192	1.370	2.237	3.158	0.004
13:01:07	22.875	1.390	2.237	60.618	0.004
13:01:12	15.694	1.410	2.284	41.589	0.004
13:01:17	1.814	1.410	2.284	4.807	0.004
13:01:22	12.386	1.440	2.332	32.822	0.004
13:01:27	2.975	1.450	2.332	7.883	0.004
13:01:32	9.692	1.470	2.370	25.683	0.004
13:01:37	2.423	1.470	2.370	6.420	0.004
13:01:42	1.038	1.470	2.374	2.750	0.004
13:01:47	0.704	1.470	2.374	1.865	0.004
13:01:52	0.704	1.470	2.377	1.865	0.004
13:01:57	0.176	1.470	2.377	0.466	0.004
13:02:02	0.273	1.470	2.378	0.723	0.004
13:02:07	0.855	1.480	2.378	2.265	0.004
13:02:12	0.855	1.480	2.381	2.265	0.004
13:02:17	1.015	1.480	2.381	2.689	0.004
13:02:22	1.015	1.480	2.385	2.689	0.004
13:02:27	0.671	1.480	2.385	1.778	0.004
13:02:32	0.752	1.480	2.388	1.992	0.004
13:02:37	25.318	1.500	2.388	67.092	0.004
13:02:42	21.265	1.520	2.415	56.352	0.004
13:02:47	1.283	1.520	2.415	3.399	0.004

13:02:52	22.546	1.550	2.494	59.746	0.004
13:02:57	3.143	1.580	2.494	8.328	0.004
13:03:02	9.211	1.590	2.580	24.409	0.004
13:03:07	1.958	1.600	2.580	5.188	0.004
13:03:12	8.374	1.610	2.593	22.191	0.004
13:03:17	2.270	1.610	2.593	6.015	0.004
13:03:22	2.270	1.610	2.602	6.015	0.004
13:03:27	0.567	1.610	2.602	1.502	0.004
13:03:32	0.567	1.610	2.604	1.502	0.004
13:03:37	0.141	1.610	2.604	0.373	0.004
13:03:42	0.151	1.610	2.604	0.400	0.004
13:03:47	1.943	1.620	2.604	5.148	0.004
13:03:52	1.943	1.620	2.612	5.148	0.004
13:03:57	0.485	1.620	2.612	1.285	0.004
13:04:02	0.485	1.620	2.614	1.285	0.004
13:04:07	0.121	1.620	2.614	0.320	0.004
13:04:12	20.918	1.630	2.615	55.432	0.004
13:04:17	28.715	1.650	2.615	76.094	0.004
13:04:22	1.794	1.650	2.622	4.754	0.004
13:04:27	1.794	1.650	2.622	4.754	0.004
13:04:32	0.448	1.650	2.623	1.187	0.004
13:04:37	0.448	1.650	2.623	1.187	0.004
13:04:42	0.163	1.650	2.624	0.431	0.004
13:04:47	0.741	1.650	2.624	1.963	0.004
13:04:52	7.747	1.660	2.644	20.529	0.004
13:04:57	23.978	1.680	2.644	63.541	0.004
13:05:02	29.426	1.710	2.680	77.978	0.005
13:05:07	23.710	1.740	2.680	62.831	0.005
13:05:12	4.879	1.750	2.699	12.929	0.005
13:05:17	3.874	1.750	2.699	10.266	0.005
13:05:22	5.160	1.760	2.720	13.674	0.005
13:05:27	3.848	1.760	2.720	10.197	0.005
13:05:32	3.848	1.760	2.735	10.197	0.005

13:05:37	0.531	1.760	2.735	1.407	0.005
13:05:42	0.531	1.760	2.737	1.407	0.005
13:05:47	0.132	1.760	2.737	0.349	0.005
13:05:52	0.132	1.760	2.737	0.349	0.005
13:05:57	0.212	1.770	2.737	0.561	0.005
13:06:02	0.683	1.770	2.740	1.809	0.005
13:06:07	25.331	1.780	2.740	67.127	0.005
13:06:12	6.516	1.790	2.842	17.267	0.005
13:06:17	1.629	1.790	2.842	4.316	0.005
13:06:22	0.709	1.800	2.845	1.878	0.005
13:06:27	13.208	1.810	2.845	35.001	0.005
13:06:32	10.607	1.840	2.960	28.108	0.005
13:06:37	2.265	1.850	2.960	6.002	0.005
13:06:42	8.629	1.860	2.993	22.866	0.005
13:06:47	6.005	1.870	2.993	15.913	0.005
13:06:52	3.375	1.880	3.007	8.943	0.005
13:06:57	14.197	1.890	3.007	37.622	0.005
13:07:02	14.739	1.910	3.065	39.058	0.005
13:07:07	2.632	1.920	3.065	6.974	0.005
13:07:12	2.632	1.920	3.076	6.974	0.005
13:07:17	0.658	1.920	3.076	1.743	0.005
13:07:22	0.658	1.920	3.078	1.743	0.005
13:07:27	0.164	1.920	3.078	0.434	0.005
13:07:32	0.164	1.920	3.079	0.434	0.005
13:07:37	25.010	1.950	3.079	66.276	0.005
13:07:42	10.631	1.960	3.169	28.172	0.005
13:07:47	1.876	1.960	3.169	4.971	0.005
13:07:52	1.876	1.960	3.176	4.971	0.005
13:07:57	0.396	1.970	3.176	1.049	0.005
13:08:02	3.720	1.970	3.191	9.858	0.005
13:08:07	1.397	1.970	3.191	3.702	0.005
13:08:12	1.397	1.970	3.197	3.702	0.005
13:08:17	0.349	1.970	3.197	0.924	0.005

13:08:22	0.333	1.970	3.198	0.882	0.005
13:08:27	0.740	1.970	3.198	1.961	0.005
13:08:32	0.831	1.970	3.201	2.202	0.005
13:08:37	1.163	1.980	3.201	3.081	0.005
13:08:42	0.798	1.980	3.204	2.114	0.005
13:08:47	0.959	1.980	3.204	2.541	0.005
13:08:52	1.620	1.980	3.207	4.293	0.005
13:08:57	1.142	1.990	3.207	3.026	0.005
13:09:02	2.736	2.010	3.233	7.250	0.005
13:09:07	4.232	2.010	3.233	11.214	0.005
13:09:12	4.232	2.010	3.249	11.214	0.005
13:09:17	1.058	2.010	3.249	2.803	0.005
13:09:22	1.058	2.010	3.253	2.803	0.005
13:09:27	0.434	2.010	3.253	1.150	0.005
13:09:32	0.434	2.010	3.255	1.150	0.005
13:09:37	0.108	2.010	3.255	0.286	0.005
13:09:42	0.108	2.010	3.255	0.286	0.005
13:09:47	0.027	2.010	3.255	0.071	0.005
13:09:52	0.027	2.010	3.256	0.071	0.005
13:09:57	0.006	2.010	3.256	0.015	0.005
13:10:02	0.006	2.010	3.256	0.015	0.005
13:10:07	0.078	2.010	3.256	0.206	0.005
13:10:12	0.595	2.010	3.256	1.576	0.005
13:10:17	0.946	2.020	3.256	2.506	0.005
13:10:22	2.479	2.020	3.260	6.569	0.005
13:10:27	2.479	2.020	3.260	6.569	0.005
13:10:32	1.044	2.020	3.264	2.766	0.005
13:10:37	0.845	2.020	3.264	2.239	0.005
13:10:42	6.664	2.030	3.272	17.659	0.005
13:10:47	10.283	2.040	3.272	27.249	0.005
13:10:52	9.109	2.060	3.308	24.138	0.005
13:10:57	12.481	2.080	3.308	33.074	0.006
13:11:02	1.977	2.080	3.320	5.239	0.006

13:11:07	26.647	2.110	3.320	70.614	0.006
13:11:12	17.001	2.120	3.387	45.052	0.006
13:11:17	2.211	2.120	3.387	5.859	0.006
13:11:22	2.211	2.120	3.395	5.859	0.006
13:11:27	11.942	2.140	3.395	31.646	0.006
13:11:32	2.569	2.140	3.405	6.807	0.006
13:11:37	2.569	2.140	3.405	6.807	0.006
13:11:42	0.996	2.140	3.409	2.639	0.006
13:11:47	0.996	2.140	3.409	2.639	0.006
13:11:52	0.249	2.140	3.410	0.659	0.006
13:11:57	1.479	2.140	3.410	3.919	0.006
13:12:02	1.440	2.150	3.416	3.816	0.006
13:12:07	0.813	2.150	3.416	2.154	0.006
13:12:12	0.813	2.150	3.419	2.154	0.006
13:12:17	28.289	2.170	3.419	74.965	0.006
13:12:22	19.008	2.180	3.476	50.371	0.006
13:12:27	16.464	2.200	3.476	43.629	0.006
13:12:32	18.744	2.230	3.549	49.671	0.006
13:12:37	15.430	2.250	3.549	40.889	0.006
13:12:42	8.074	2.270	3.599	21.396	0.006
13:12:47	4.870	2.280	3.599	12.905	0.006
13:12:52	2.629	2.280	3.613	6.966	0.006
13:12:57	1.917	2.290	3.613	5.080	0.006
13:13:02	1.917	2.290	3.620	5.080	0.006
13:13:07	3.200	2.290	3.620	8.480	0.006
13:13:12	14.088	2.300	3.637	37.333	0.006

Fuente: (Autores)

La Tabla 7 presenta una muestra representativa de los datos recolectados a nivel del mar mediante el equipo de medición AIC 5004 Fuel Flow Master, el cual fue instalado en un vehículo Mitsubishi L200, año 2022, tracción 4x2, con tecnología de inyección Common Rail Direct Injection (CRDi). Esta información fue obtenida durante una prueba dinámica en condiciones operativas reales, lo que permite observar parcialmente el comportamiento del sistema de inyección en ambientes con mayor presión atmosférica.

Cabe aclarar que los valores mostrados no representan el total de datos recolectados, sino únicamente una parte de la base de datos general. Esta selección se incluye con fines ilustrativos para facilitar la interpretación de los primeros resultados.

El análisis completo, incluyendo la totalidad de registros, será desarrollado posteriormente y acompañado con tablas y gráficas detalladas, las cuales estarán disponibles en los anexos del presente trabajo. Esta estrategia permitirá evaluar con mayor precisión el rendimiento energético y las variaciones en el consumo de combustible en función de la altitud.

2.14 Gráficas obtenidas de la opacidad según la altura geográfica

Con el propósito de analizar las emisiones contaminantes provenientes de un motor diésel, se llevaron a cabo pruebas de opacidad del humo utilizando el equipo Maha Maschinenbau Haldenwang EUROSYSYSTEM, instalado en el banco dinamométrico de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca.

La metodología consistió en acelerar gradualmente el motor, partiendo desde el régimen de ralentí hasta alcanzar el límite máximo establecido por el fabricante. Durante este proceso, el dispositivo registró datos como el porcentaje de opacidad de los gases, la velocidad del motor expresada en revoluciones por minuto (RPM) y la temperatura del aceite.

Las pruebas se efectuaron en dos ubicaciones con diferentes altitudes geográficas: Cuenca y Guayaquil, con la finalidad de evaluar el efecto de la altura sobre los niveles de opacidad emitidos por el motor.

2.15 Gráfica de opacidad en la ciudad de Cuenca

En los resultados obtenidos para la ciudad de Cuenca, ubicada a una altitud aproximada de 2560 metros sobre el nivel del mar, se observó que el motor diésel CRDi alcanzó un índice máximo de opacidad del 4,6 % a unas 3680 revoluciones por minuto (RPM), cuando la temperatura del lubricante era de 86 °C.

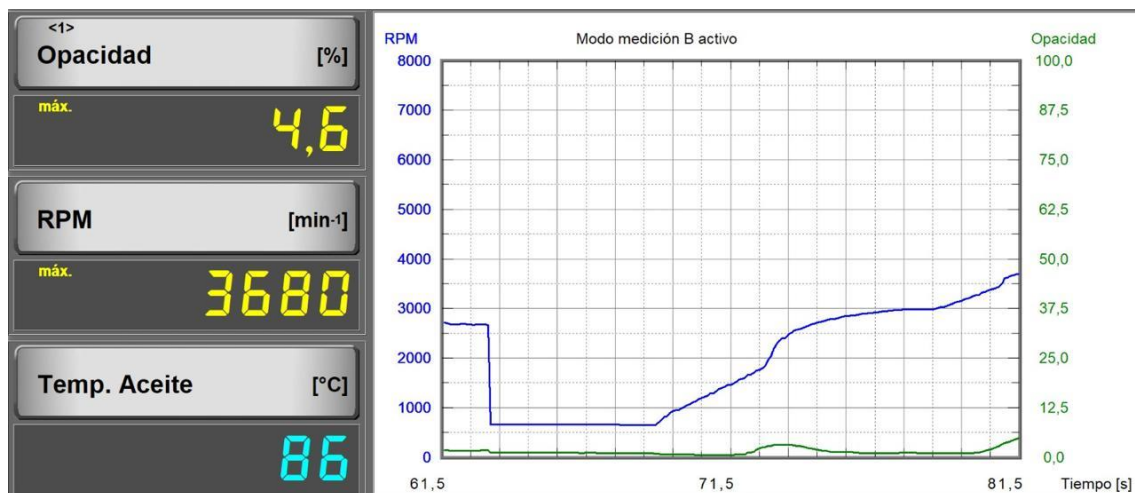
Este comportamiento puede asociarse a los efectos típicos que se presentan en zonas de altitud elevada, donde la presión atmosférica disminuye significativamente, lo cual provoca una reducción en la densidad del aire disponible para la combustión.

Dicha disminución de oxígeno en la mezcla aire-combustible conlleva a una combustión menos completa, situación que favorece la formación de partículas contaminantes no quemadas. Estas partículas se reflejan en un mayor nivel de opacidad en los gases de escape, ya que indican una mayor cantidad de materia particulado visible suspendida en los gases emitidos por el motor.

Estos resultados ponen en evidencia cómo la altitud afecta negativamente la eficiencia de la combustión, y cómo esa condición se ve reflejada en un aumento moderado de la opacidad de los gases, incluso bajo un régimen de trabajo elevado del motor.

Figura 17

Opacidad en la ciudad de Cuenca



Nota: En la figura 17 se muestra la gráfica de la opacidad en la ciudad de Cuenca la prueba realizada en la camioneta Mitsubishi l200. *Fuente:* (Autores)

2.16 Gráfica de la opacidad a nivel del mar

Durante las mediciones realizadas en la ciudad de Guayaquil, localizada a nivel del mar, se registró un valor máximo de opacidad del 3,5 %, tal como se aprecia en la figura 18. Este resultado se obtuvo a un régimen de motor cercano a las 3300 revoluciones por minuto (RPM), con una temperatura del aceite lubricante de aproximadamente 85 °C.

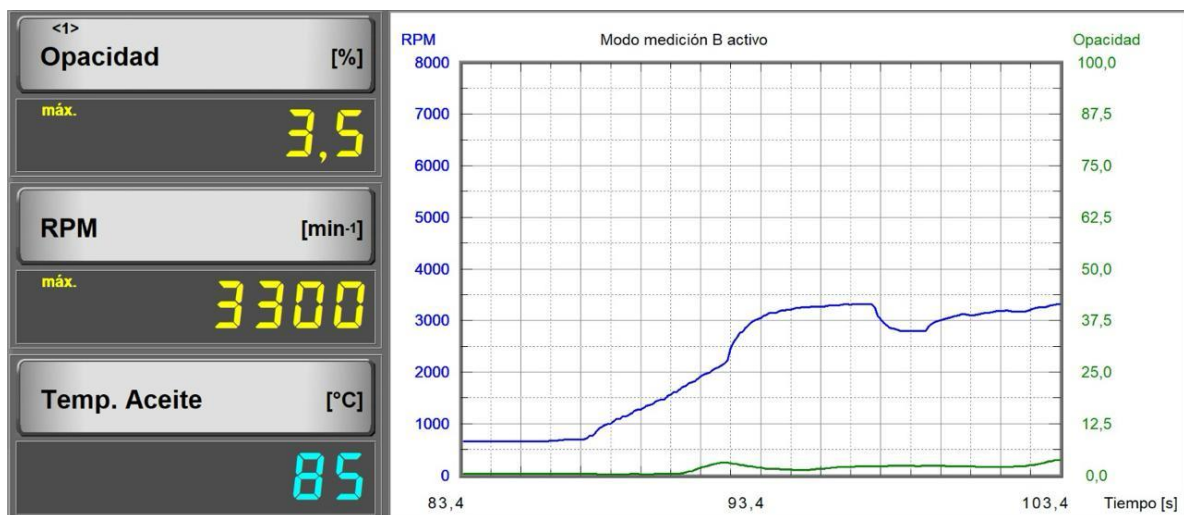
Este menor nivel de opacidad, en comparación con los valores obtenidos en altitudes mayores, se relaciona directamente con las condiciones ambientales características de las zonas costeras. En estos entornos, la presión atmosférica es mayor

debido a la altitud cercana a los 0 msnm, lo cual se traduce en una mayor concentración de oxígeno por volumen de aire. Esta mayor disponibilidad de oxígeno mejora la mezcla aire-combustible, lo que permite que el proceso de combustión interna se desarrolle de manera más completa y eficiente.

Como efecto de esta combustión optimizada, la formación de partículas no quemadas se reduce notablemente, lo que se refleja en menores niveles de emisiones visibles, particularmente en la opacidad de los gases de escape. Por lo tanto, estos valores evidencian que operar un motor CRDi en condiciones de baja altitud puede tener un efecto positivo sobre el rendimiento ambiental del motor, reduciendo la cantidad de contaminantes sólidos expulsados al ambiente.

Figura 18

Opacidad en nivel del mar



Nota: Se muestra la gráfica de la opacidad realizada a la Mitsubishi L200 en la ciudad de Guayaquil. *Fuente:* (Autores)

CAPÍTULO III

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y OPACIDAD EN RELACIÓN CON LA ALTURA GEOGRÁFICA

3. 1 Análisis comparativo entre las altitudes geográficas entre las dos ciudades

La altitud y topografía influyen directamente en el desempeño de los motores diésel CRDi. En Cuenca, la presión atmosférica reducida y las pendientes pronunciadas demandan mayor esfuerzo del motor, incrementando potencialmente el consumo de combustible y la opacidad de los gases. La velocidad vertical (0,21 m/s) y el ascenso acumulado (349 m) evidencian este entorno exigente.

En contraste, Guayaquil, al nivel del mar, ofrece condiciones óptimas para la combustión: presión más alta, oxigenación adecuada y superficie plana, con velocidad vertical casi nula (0,01 m/s) y pendientes de 0 %, lo que reduce la carga del motor y mejora la eficiencia.

La siguiente tabla ha sido elaborada a partir de los datos extraídos de las Figuras 15 y 16, correspondientes a los recorridos realizados en la ciudad de Cuenca y Guayaquil.

Tabla 8

Diferencia de datos entre las dos ciudades

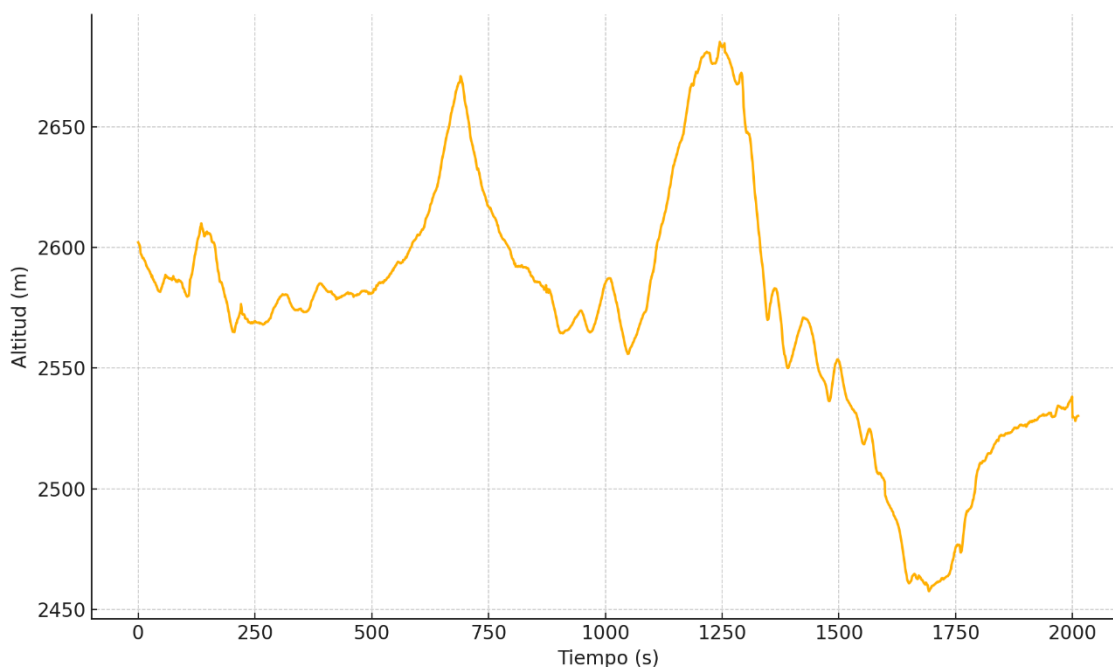
Parámetro	Cuenca	Guayaquil	Cajas
Longitud del recorrido (km)	31,56	23,91	88,92
Duración total	1h 08m 03s	1h 06m 42s	1,4
Velocidad máxima (km/h)	118	74	138,12
Velocidad media (km/h)	30	21,56	62,27
Altitud máxima (m)	2684	21	4152,03

Altitud mínima (m)	2458	2	74,34
Diferencia altitudinal (m)	226	19	4077,69
Ascenso vertical (m)	349	31	1140,62
Distancia vertical (m)	770	31	5621,22
Velocidad vertical media (m/s)	0,21	0,01	1,116
Pendiente máxima (%)	15	0	32,37
Pendiente mínima (%)	-4	0	-63,44
Pendiente media (%)	0	0	-3,7

Fuente: (Autores)

Figura 19

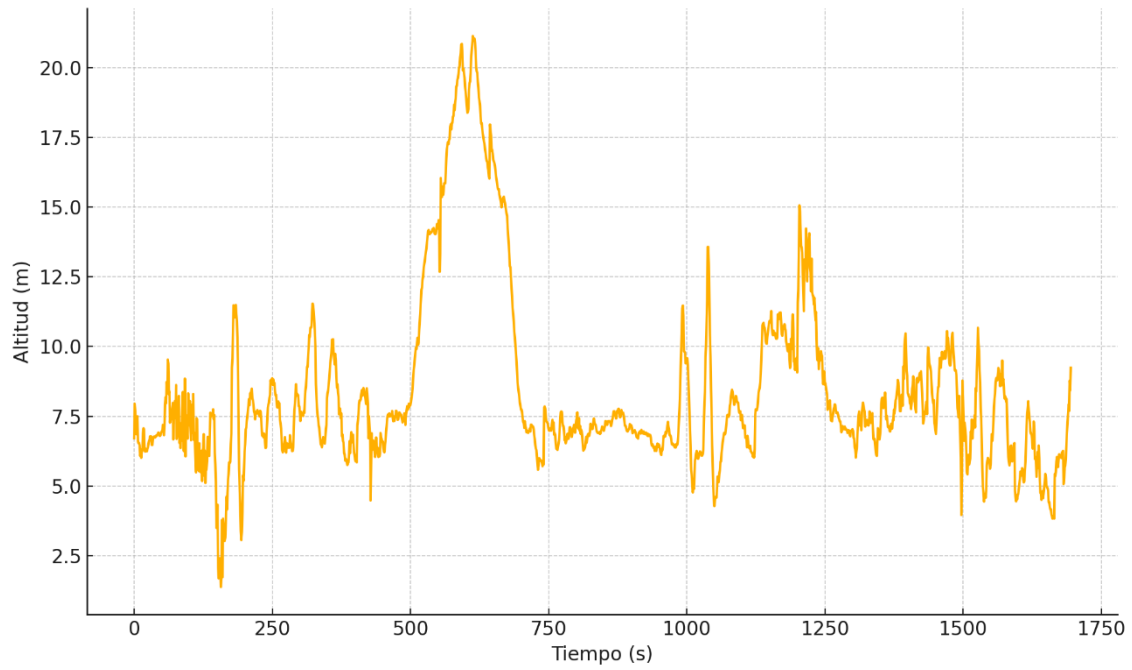
Gráfico de las diferentes altitudes en la prueba tomada en la ciudad de Cuenca.



Fuente: (Autores)

Figura 20

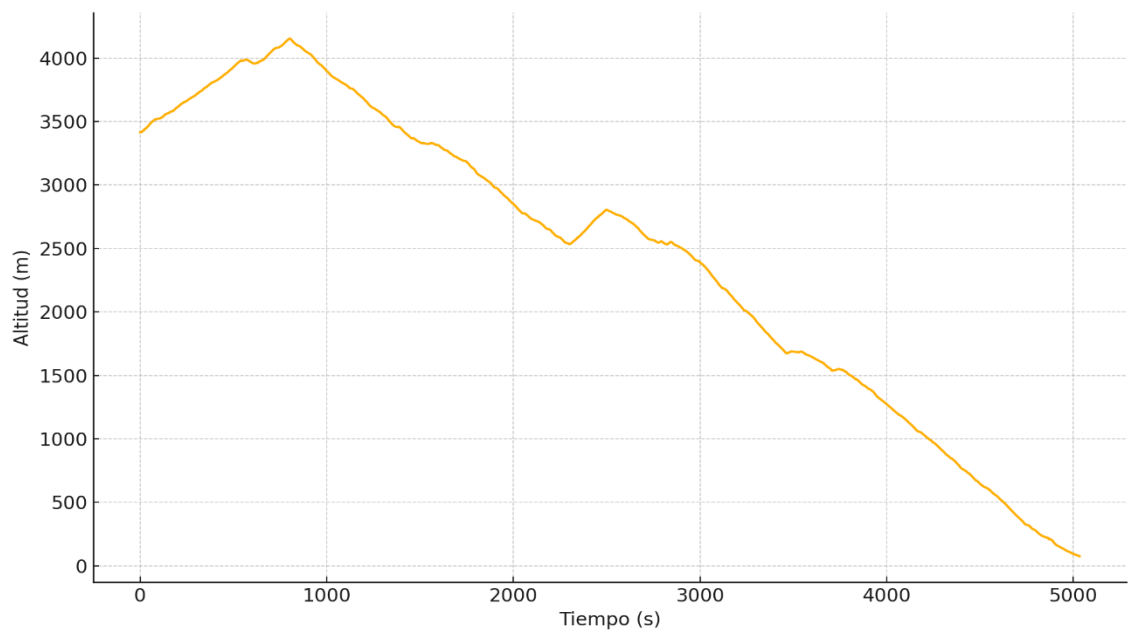
Gráfico de las diferentes altitudes en la prueba tomada en la ciudad de Guayaquil



Fuente: (Autores)

Figura 21

Gráfico de las diferentes altitudes en la prueba tomada en el Cajas



Fuente: (Autores)

Al comparar la altitud de las tres ciudades —Guayaquil (≈ 7 m.s.n.m.), Cuenca (≈ 2600 m.s.n.m.) y Cajas (con variaciones entre ≈ 3400 y más de 4100 m.s.n.m.). Se evidencia que las diferencias geográficas tienen un impacto directo en el rendimiento del vehículo.

Este fenómeno es particularmente relevante en motores diésel con sistemas CRDi (Common Rail Direct Injection), donde las variaciones de altitud implican una disminución de la presión atmosférica, lo que a su vez afecta la relación aire-combustible.

Para mantener la eficiencia operativa, el sistema debe ajustar dinámicamente los parámetros de inyección, compensando la pérdida de oxígeno disponible. Por lo tanto, a mayor altitud, como ocurre en Cajas, el motor requiere más correcciones electrónicas para sostener su desempeño, en contraste con Guayaquil, donde la densidad del aire es mayor y la carga del motor es más estable.

3.2 Análisis de las variaciones de las velocidades

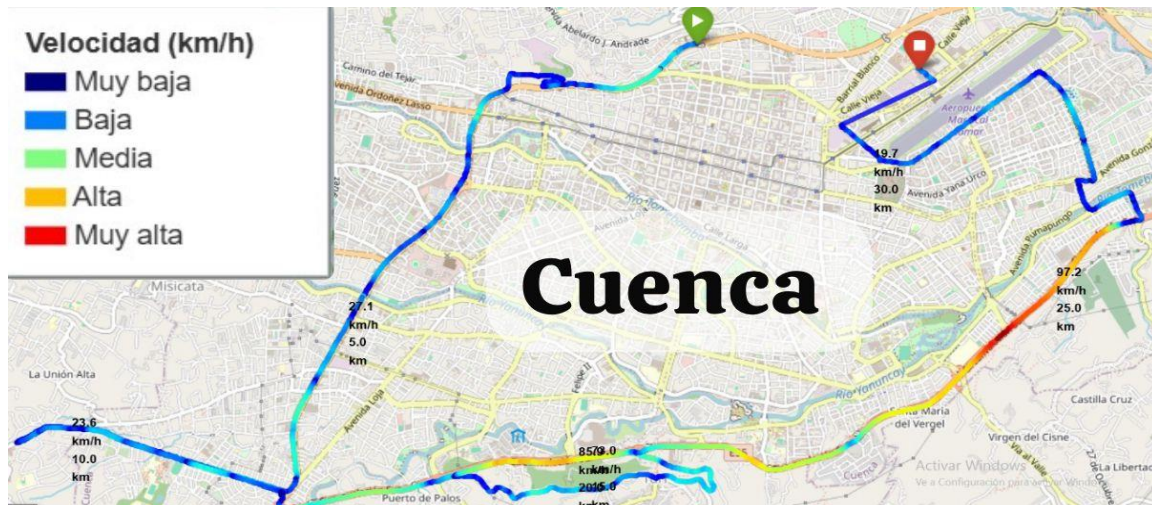
El presente estudio se enfoca en comparar las velocidades vehiculares registradas en recorridos urbanos realizados en las ciudades de Cuenca y Guayas. A partir de los datos geoespaciales extraídos de archivos GPX, se calcularon las velocidades instantáneas mediante la distancia recorrida entre puntos consecutivos y el tiempo transcurrido entre ellos.

Los resultados evidencian una diferencia notable en los patrones de velocidad de ambas ciudades. En términos generales:

- En **Cuenca** se evidenció una mayor variabilidad en las velocidades durante la conducción, lo cual está estrechamente relacionado con la configuración geográfica de la ciudad.
- Su terreno montañoso propicia zonas de descenso donde se alcanzan aceleraciones elevadas, pero también obliga a reducir la velocidad de forma considerable en sectores con inclinaciones pronunciadas o tráfico más denso.

Figura 22

Mapa de las velocidades de Cuenca



Fuente: (Autores)

Por otro lado, **Guayaquil**, al estar asentada sobre una superficie predominantemente plana, presenta un comportamiento más uniforme en cuanto a la velocidad vehicular. Las variaciones son menos marcadas y reflejan una circulación más constante, influida principalmente por la presencia de semáforos e intersecciones típicas del entorno urbano.

Figura 23

Mapa de las velocidades en la ciudad de Guayaquil



Fuente: (Autores)

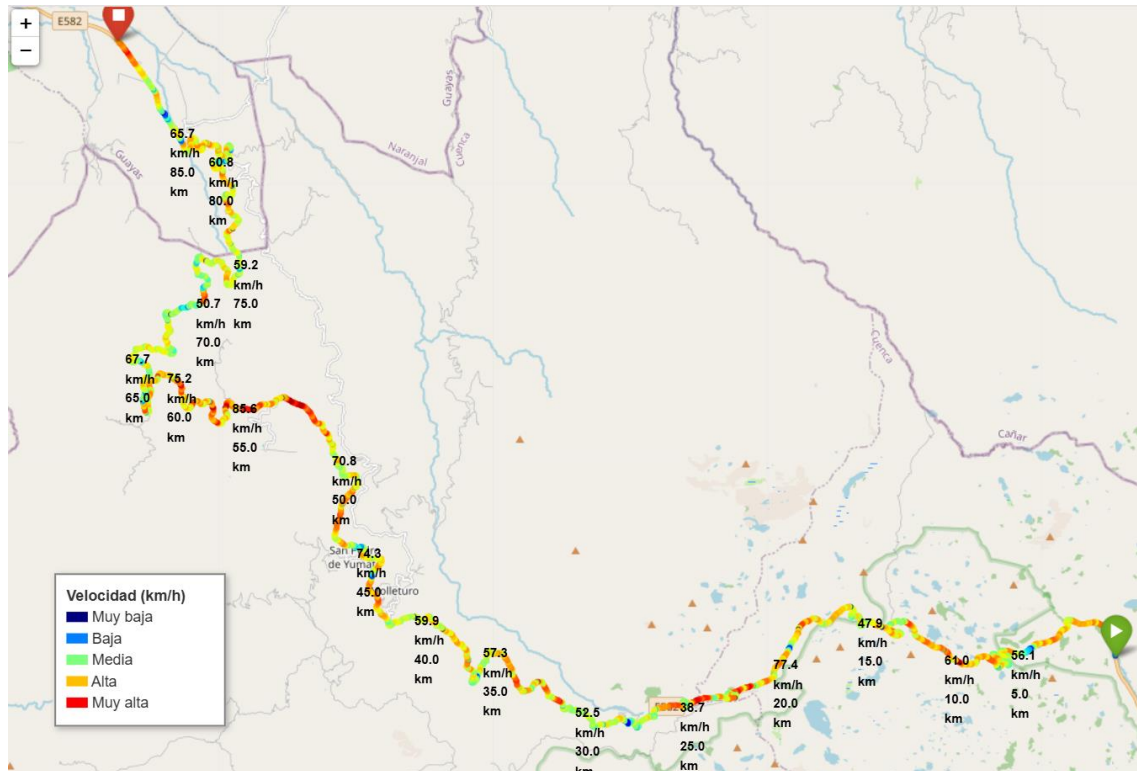
Este patrón de conducción tiene consecuencias claras sobre el consumo de combustible y la emisión de gases opacos. En escenarios como el de Cuenca, con fluctuaciones constantes en la velocidad, el sistema de inyección del motor debe adaptarse con mayor frecuencia, lo que incrementa el consumo puntual de combustible.

En cambio, en contextos como el de Guayaquil, donde predominan velocidades bajas y estables, el motor puede no alcanzar su temperatura ideal de operación,

favoreciendo procesos de combustión incompleta y, en consecuencia, un aumento en la opacidad de los gases emitidos.

Figura 24

Mapa de las velocidades de la ruta del Cajas Hasta Puerto Inca



Fuente: (Autores)

3.3 Análisis comparativo del consumo de combustible

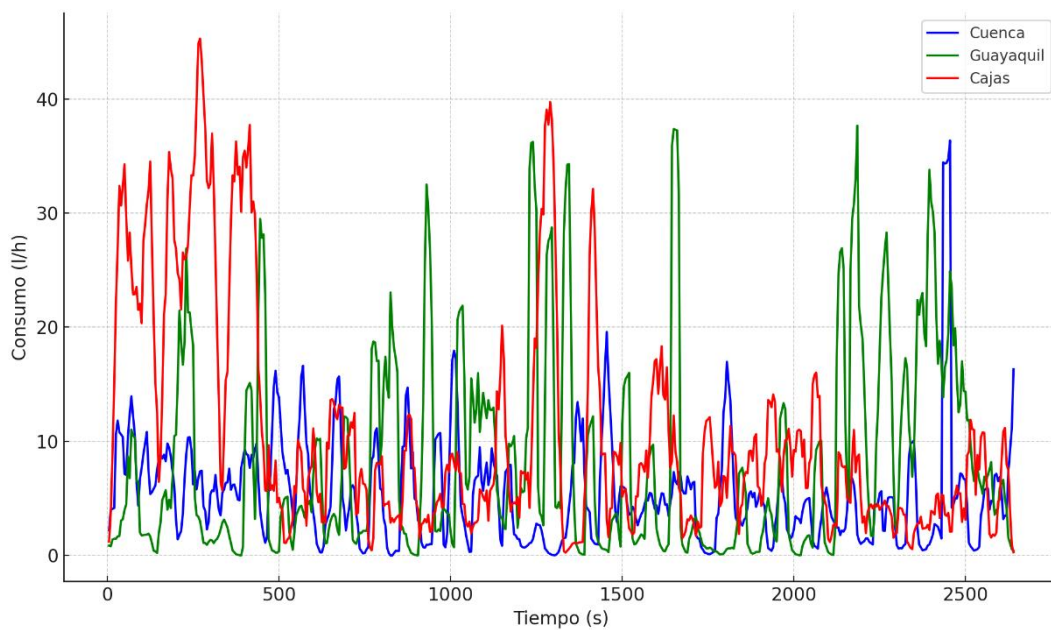
La media del consumo de combustible presenta diferencias marcadas entre las rutas Guayaquil, Cuenca y Cajas, influenciadas principalmente por la altitud y las condiciones de tráfico. En Guayaquil, con una altitud promedio de apenas 4 metros sobre el nivel del mar, el consumo medio es de 1.59 litros por hora, lo que refleja una conducción en terreno plano, con tráfico urbano que, si bien puede ser denso, permite mantener velocidades moderadas y estables.

En Cuenca, ubicada a aproximadamente 2.560 metros de altitud, el consumo aumenta a 3.90 litros por hora, debido a una combinación de pendientes pronunciadas, mayor altitud (que reduce la eficiencia volumétrica del motor) y tráfico urbano más irregular, con frenadas, arranques frecuentes y variación de carga.

Por su parte, la ruta Cajas, situada en una zona montañosa que supera los 4.000 metros sobre el nivel del mar, presenta el mayor consumo con 5.63 litros por hora, explicado por la elevada exigencia del motor al enfrentar pendientes prolongadas, curvas cerradas, aire menos denso y posibles condiciones de tráfico lento en tramos estrechos. En conjunto, estos factores muestran cómo tanto la altitud como la dinámica del tránsito influyen directamente en el rendimiento del vehículo y su consumo energético.

Figura 25

Comparación del Consumo de Combustible en Rutas: Guayaquil, Cuenca y Cajas



Fuente: (Autores)

3.4 Análisis comparativo de la opacidad de gases

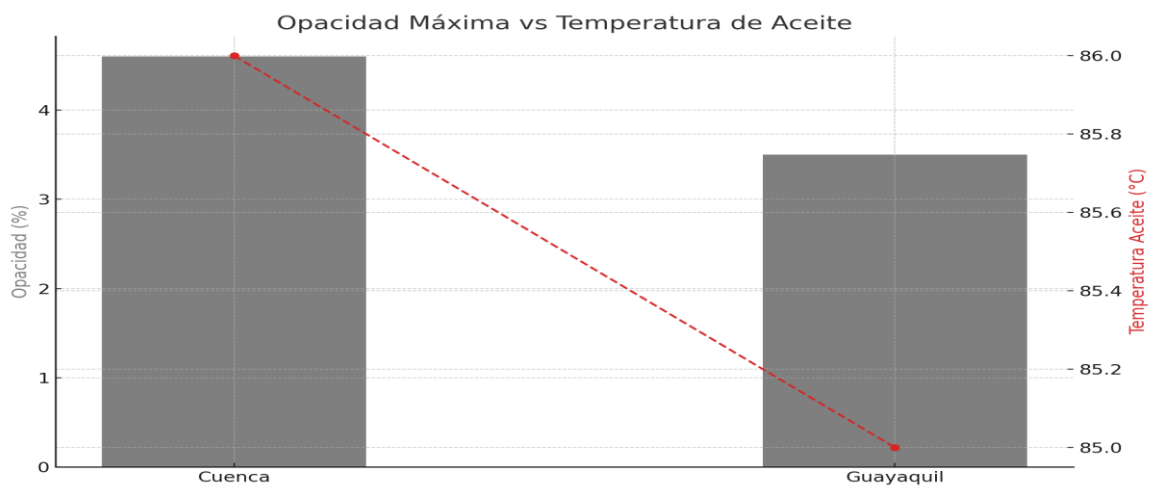
El presente estudio realiza una comparación de los niveles máximos de opacidad registrados durante ensayos efectuados en dos localidades con altitudes significativamente diferentes: Cuenca (2560 m s. n. m.) y Guayaquil (ubicada al nivel del mar). Se analiza la influencia de la altitud sobre la generación de emisiones visibles, considerando como variables complementarias la temperatura del lubricante y el régimen operativo del motor.

3.4.1 Opacidad vs temperatura del aceite

La figura 26 se muestra la relación entre la opacidad y la temperatura del aceite del motor en las dos ciudades evaluadas. Aunque las temperaturas del lubricante fueron prácticamente iguales 86 °C en Cuenca y 85 °C en Guayaquil, se evidenció una variación significativa en los niveles de opacidad. Esta diferencia se atribuye principalmente a los efectos de la altitud, más que a la condición térmica del motor.

Figura 26

Opacidad vs Temperatura del Aceite



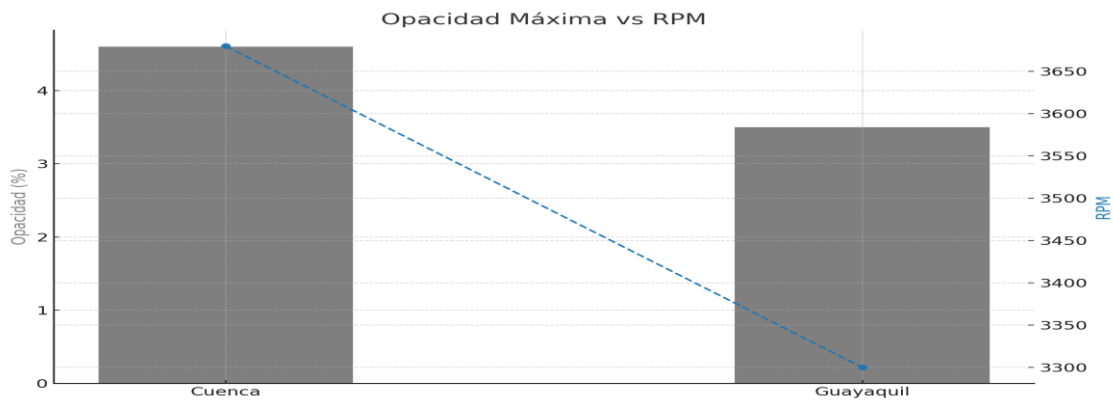
Fuente: (Autores)

3.4.2 Opacidad vs RPM

En la figura 27 muestra la relación entre el régimen máximo del motor (RPM) y la opacidad medida. En Cuenca, el motor alcanzó 3680 RPM con una opacidad del 4.6 %, mientras que en Guayaquil se alcanzaron 3300 RPM con una opacidad de 3.5 %. La diferencia en la densidad del aire debido a la altitud influyó directamente en la eficiencia de la combustión, lo cual explica el mayor nivel de emisiones visibles en la ciudad de mayor altitud.

Figura 27

Opacidad vs RPM



Fuente: (Autores)

Los datos obtenidos indican que la altitud influye de manera significativa en el desempeño de la combustión en motores CRDi. En zonas elevadas como Cuenca, la disminución en la disponibilidad de oxígeno conduce a un proceso de combustión menos eficiente, lo que incrementa la formación de partículas visibles.

En cambio, en regiones ubicadas al nivel del mar, como Guayaquil, la mayor densidad del aire permite una combustión más completa, lo que se traduce en niveles más bajos de opacidad. Estos resultados subrayan la relevancia de incorporar la variable altitudinal en los estudios sobre emisiones contaminantes de motores diésel.

Tabla 9

Efectos de la altura geográfica con respecto a la opacidad

Variable / Condición	Cuenca (2560 m s. n. m.)	Guayaquil (0 m s. n. m.)	Observaciones Técnicas
Altitud	Alta	Baja (nivel del mar)	La altitud afecta directamente la disponibilidad de oxígeno en el proceso de combustión.
Densidad del aire	Menor	Mayor	A menor presión atmosférica, el contenido de oxígeno en el aire

Eficiencia de combustión	Reducida	Mejorada	disminuye, afectando la eficiencia de combustión. En Cuenca, la combustión es menos completa debido a la menor concentración de oxígeno, mientras que en Guayaquil se logra una combustión más eficiente.
Formación de partículas visibles (opacidad)	Alta	Baja	En condiciones de altura, se incrementa la producción de emisiones visibles como resultado de una combustión incompleta.
Temperatura promedio del aceite	86 °C	85 °C	A pesar de temperaturas similares en el lubricante, se observaron diferencias notables en los niveles de opacidad entre ambas ciudades.
Implicaciones en estudios de emisiones	Necesaria inclusión de la variable altitud	Ídem	Los resultados refuerzan la necesidad de considerar la altitud como un factor clave en el análisis de emisiones de motores diésel, especialmente en zonas andinas.

Fuente: (Autores)

3.5 Relación Altitud – Velocidad

La figura 28 correspondiente al recorrido en Cuenca permite visualizar e interpretar de manera integral la relación entre la posición geográfica (latitud y longitud), la altitud del terreno y la velocidad del vehículo durante el trayecto. A través del uso de un mapa de calor, se representa la velocidad en escala de color, donde los tonos más oscuros indican velocidades bajas y los tonos más claros velocidades más altas.

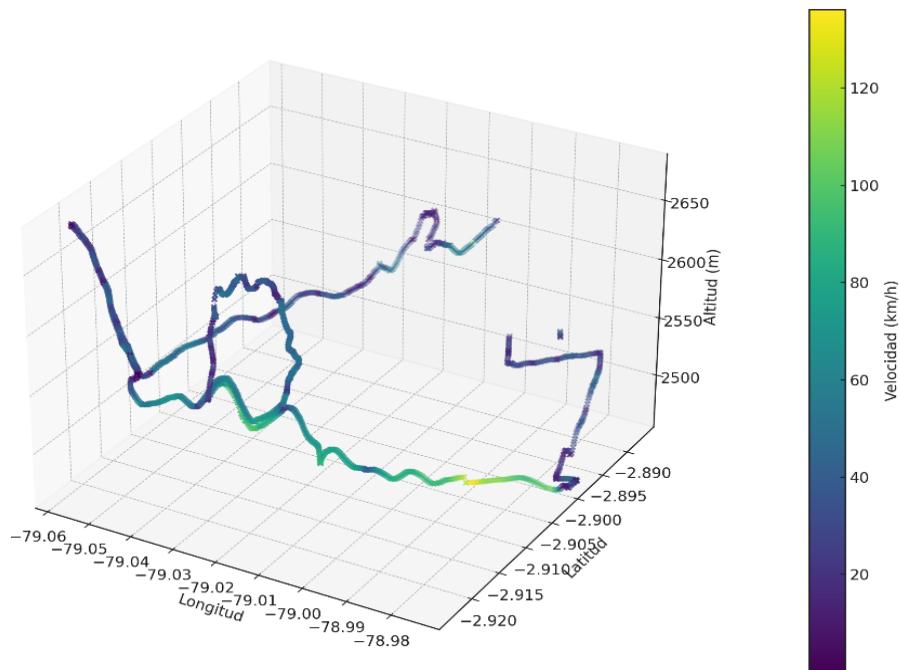
Al analizar el comportamiento de la trayectoria, se evidencia que el recorrido se desarrolla en una zona de menor altitud en comparación con Cajas, con valores entre aproximadamente 2600 y 2610 metros sobre el nivel del mar. Esta menor altitud sugiere condiciones atmosféricas más densas, lo que favorece el rendimiento del motor diésel y, por tanto, una conducción más eficiente desde el punto de vista del consumo.

Los puntos de velocidad elevada (colores claros) se concentran en sectores donde la pendiente parece leve o descendente, lo que permite al vehículo alcanzar mayores velocidades sin requerir un esfuerzo excesivo del motor. En contraste, los tramos con velocidades bajas (colores oscuros) podrían estar asociados a zonas con tráfico urbano, intersecciones, o pendientes ascendentes.

Este tipo de visualización tridimensional permite identificar los sectores críticos del trayecto en términos de demanda energética, facilitando una evaluación técnica del consumo de combustible y del comportamiento dinámico del vehículo.

Figura 28

Análisis tridimensional de la trayectoria vehicular en Cuenca: correlación entre velocidad, altitud y posición geoespacial



Fuente: (Autores)

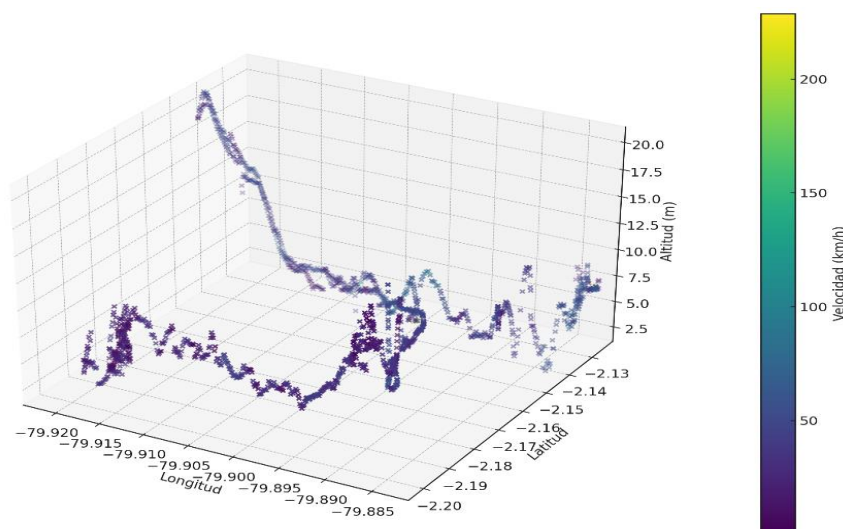
El gráfico 3D del recorrido en Guayaquil revela un patrón claro de conducción en un entorno urbano y plano. Al analizar la trayectoria, se observa que el vehículo opera a una altitud constante, entre 6 y 8 metros sobre el nivel del mar, lo cual indica una topografía completamente llana, típica de zonas costeras. Este aspecto es fundamental, ya que elimina el efecto de pendientes sobre el esfuerzo del motor y el consumo de combustible.

La distribución de la velocidad, representada por la escala de color, muestra zonas de tránsito a velocidades moderadas, con valores que oscilan entre 15 y 40 km/h, y con algunos tramos que alcanzan velocidades más elevadas. Este comportamiento permite inferir que el recorrido se realizó en calles con posibles restricciones urbanas, semáforos, tráfico o intersecciones.

Al evaluar la eficiencia energética, este tipo de trayecto favorece un menor consumo en comparación con rutas de montaña, debido a que el motor trabaja en condiciones de baja carga y sin la necesidad de vencer elevaciones. Además, el flujo de velocidad más uniforme y la altitud constante reducen las variaciones de par motor, lo cual es ideal para una operación eficiente de motores diésel como el de la Mitsubishi L200

Figura 29

Análisis tridimensional de la trayectoria vehicular en Guayaquil: correlación entre velocidad, altitud y posición geoespacial



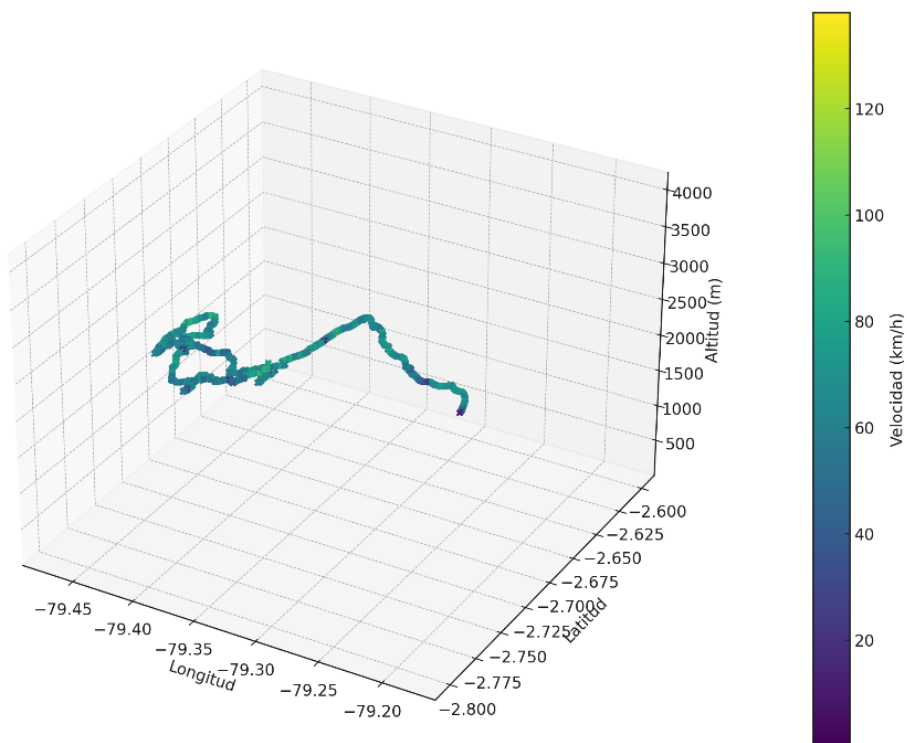
Fuente: (Autores)

Al evaluar la figura 30, se aprecia que el trayecto tiene una distribución geográfica compacta, típica de rutas sinuosas de montaña. Los tramos con colores más oscuros (azules y verdes) indican velocidades bajas, lo cual puede estar asociado a curvas pronunciadas, pendientes ascendentes o condiciones de manejo que exigen mayor control. Por el contrario, los colores más claros (amarillos) corresponden a tramos donde se alcanzaron velocidades más altas, posiblemente en descensos o sectores más rectos.

Al analizar la relación entre la altitud y la velocidad, se observa que los cambios bruscos en elevación tienden a coincidir con una disminución en la velocidad, lo que evidencia el impacto de la topografía en el comportamiento dinámico del vehículo. En este sentido, el motor diésel de la Mitsubishi L200 debe compensar el esfuerzo adicional al ascender, lo que puede traducirse en un mayor consumo de combustible.

Figura 30

Análisis tridimensional de la trayectoria vehicular en el Cajas: correlación entre velocidad, altitud y posición geoespacial



Fuente: (Autores)

3.6 Emisiones contaminantes

El gráfico 3D obtenido permite analizar e interpretar la interacción entre la altitud se mantiene en un rango estrecho entre 6 y 12 metros sobre el nivel del mar. Esta característica geográfica facilita una operación más estable del motor diésel, permitiendo una combustión más homogénea al no existir afectaciones por baja presión atmosférica.

La velocidad del vehículo (0 a 58 km/h) y las emisiones instantáneas de dióxido de carbono (CO₂) expresadas en kg/h, en un recorrido urbano. Mediante interpolación cúbica y suavizado gaussiano, se ha generado una superficie continua que revela zonas críticas de operación desde el punto de vista energético y ambiental.

En primer lugar, al identificar el comportamiento de las emisiones en función de la altitud, se observa que las mayores emisiones de CO₂ (hasta 3.95 kg/h) ocurren dentro de un rango altitudinal relativamente estable (entre 2590 y 2620 m), cuando la velocidad del vehículo se encuentra entre 5 y 15 km/h, lo cual es característico de arranques, detenciones frecuentes y conducción en tráfico denso.

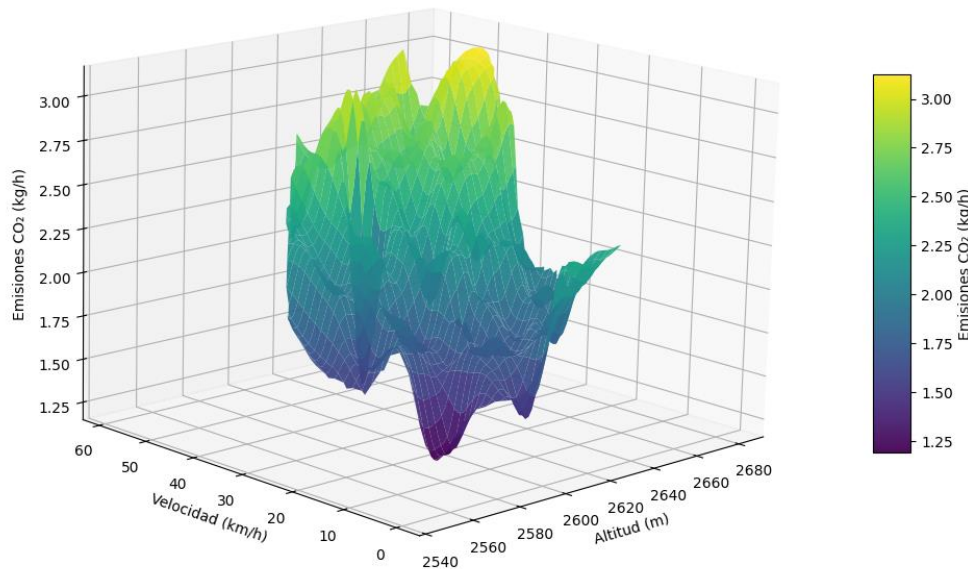
En estos tramos, el motor diésel experimenta regímenes de combustión incompleta debido a cargas transitorias y baja eficiencia volumétrica, lo que incrementa la formación de productos intermedios y eleva la cantidad de CO₂ emitido por unidad de tiempo.

Por otro lado, al relacionar emisiones con velocidad, se observa que cuando el vehículo mantiene velocidades moderadas y constantes, especialmente entre 35 y 45 km/h, las emisiones se reducen a valores promedio de 1.80 a 2.30 kg/h, lo que sugiere que el motor opera en un régimen de mejor eficiencia térmica. Este rango coincide con las condiciones óptimas de carga parcial donde el sistema de inyección CRDi puede mantener relaciones aire-combustible más cercanas a la ideal y aprovechar adecuadamente el ciclo termodinámico.

En síntesis, este gráfico permite evaluar con precisión cómo la topografía, el estilo de conducción y el desempeño del motor interactúan directamente con las emisiones de CO₂. La zona de operación más eficiente se localiza entre 2600–2650 m, con velocidades constantes entre 30 y 45 km/h, donde las emisiones se mantienen por debajo de 2.5 kg/h.

Figura 31

Evaluación de emisiones de CO₂ en recorridos urbanos mediante variables de altitud y velocidad en la ciudad de Cuenca



Fuente: (Autores)

La figura 31 permite analizar y comprender la relación funcional entre la altitud del terreno (3410 a 3550 m.s.n.m.), la velocidad del vehículo (0 a 60 km/h) y las emisiones instantáneas de CO₂ (entre 2.0 y 6.5 kg/h) durante el recorrido por la zona montañosa de Cajás. Al interpretar esta superficie suavizada, se evidencia un patrón característico de condiciones operativas exigentes para el motor diésel, propio de entornos de alta altitud.

Al evaluar la influencia de la altitud sobre las emisiones, se observa que estas aumentan progresivamente con la elevación. Esto se debe a que la menor presión atmosférica reduce la densidad del aire, obligando al motor a compensar mediante una mayor inyección de combustible para mantener el rendimiento, lo cual eleva el consumo específico y la generación de CO₂. En la zona alta de la gráfica (>3500 m), las emisiones pueden superar los 6 kg/h, especialmente cuando el vehículo opera en regímenes inestables o bajo carga.

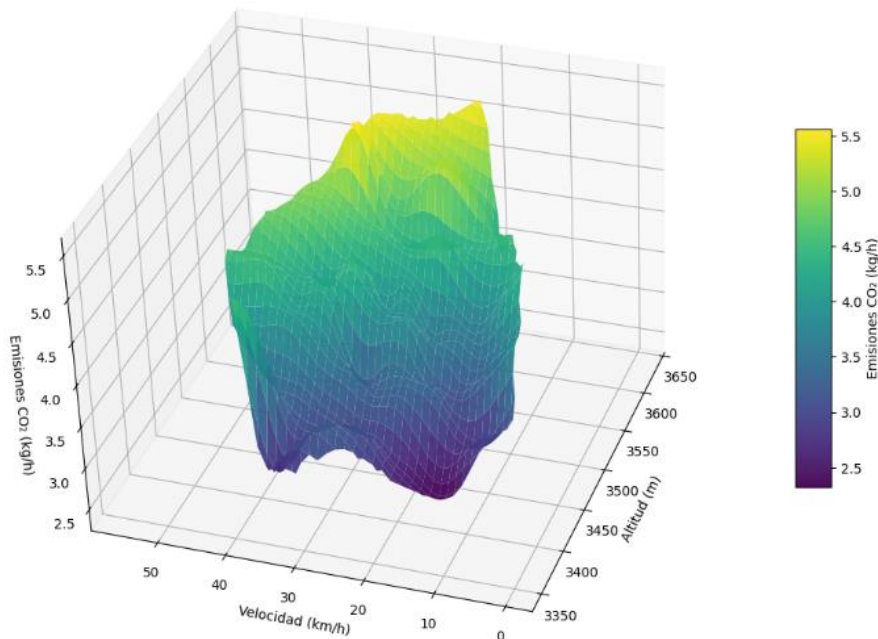
Asimismo, al relacionar la velocidad con las emisiones, se distingue un comportamiento dual: a bajas velocidades (0–15 km/h), los niveles de CO₂ se incrementan debido a arranques frecuentes y alta carga transitoria, mientras que a velocidades altas (>45 km/h), el esfuerzo necesario para vencer pendientes prolongadas incrementa las emisiones por requerimientos de par. Por tanto, los niveles más bajos de CO₂ se

concentran en velocidades moderadas (25–35 km/h), donde el motor opera en condiciones más estables y dentro de su rango de eficiencia térmica.

Este comportamiento coincide con el funcionamiento típico de motores CRDi en altitud, donde el sistema de control electrónico ajusta presión del rail, avance de inyección y EGR para estabilizar la combustión. Sin embargo, estos ajustes no son suficientes para evitar la sobrecarga en escenarios de topografía accidentada, lo cual explica los picos de emisiones observados.

Figura 32

Evaluación de emisiones de CO₂ en recorridos urbanos mediante variables de altitud y velocidad en el Cajas.



Fuente: (Autores)

La figura 32 representa la relación entre altitud, velocidad y emisiones de CO₂ (kg/h) en un recorrido urbano realizado en la ciudad de Cuenca donde la altitud esta, cercana a los 2600 metros, representa una condición crítica para motores diésel, ya que la presión atmosférica disminuye aproximadamente un 25 % respecto al nivel del mar, lo que obliga a los sistemas de sobrealimentación (turbo) e inyección a compensar esa pérdida con mayor presión del rail, tiempos de inyección prolongados o recirculación reducida de gases. Estas acciones, aunque necesarias para mantener la potencia, aumentan

el consumo específico de combustible y la producción de gases contaminantes como CO₂ y NO_x.

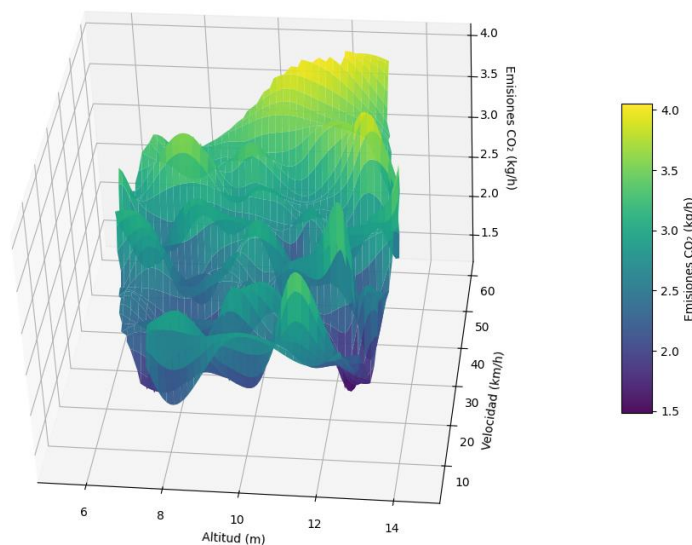
Se observa que las emisiones se mantienen en un rango operativo eficiente, variando generalmente entre 1.5 y 5.5 kg/h. A velocidades moderadas de 25 a 40 km/h, el motor trabaja dentro de su zona de mejor eficiencia térmica, donde la demanda de par es controlada y las emisiones tienden a disminuir. Sin embargo, a velocidades superiores a 45 km/h, se presenta un aumento gradual de emisiones debido al incremento de carga y la fricción aerodinámica.

Este comportamiento confirma que, en entornos urbanos costeros planos como Cuenca, el perfil operativo favorece niveles de emisión más estables. Además, se identifican zonas donde las variaciones de velocidad generan picos aislados de CO₂, atribuibles a maniobras de aceleración o congestión vehicular.

El análisis tridimensional permite visualizar las zonas de operación eficiente, así como los límites de velocidad que generan mayor impacto ambiental, constituyendo una herramienta útil para la optimización de rutas, conducción eficiente y evaluación de estrategias de reducción de emisiones en flotas urbanas.

Figura 33

Evaluación de emisiones de CO₂ en recorridos urbanos mediante variables de altitud y velocidad en la ciudad de Guayaquil.



Fuente: (Autores)

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación demuestran que la altitud geográfica influye de manera determinante en el comportamiento energético de los motores diésel con tecnología CRDi. Las pruebas realizadas evidenciaron un aumento significativo del consumo específico de combustible al operar en Cuenca (2.560 msnm) en comparación con condiciones a nivel del mar en Guayaquil. Esta diferencia, que alcanza aproximadamente un 90% más de consumo en zonas de altura, se explica por la disminución de la presión atmosférica, lo que reduce la densidad del aire y obliga al sistema de inyección a enriquecer la mezcla para sostener una combustión eficiente. Este proceso incrementa la cantidad de combustible inyectado por ciclo, comprometiendo la eficiencia volumétrica y térmica del motor.

Respecto a las emisiones, la opacidad de gases mostró una variación mínima, cercana al 1%, entre ambas altitudes. Esta diferencia fue técnicamente irrelevante dentro del contexto de la investigación, y puede atribuirse al estado óptimo de funcionamiento del vehículo y del sistema de inyección. No obstante, el análisis detallado reveló que, en zonas de gran altitud, especialmente en velocidades superiores a 45 km/h, se incrementa la carga del motor y, con ello, las emisiones de CO₂ (kg/h), las cuales superaron los 5.5 kg/h en tramos críticos, mientras que en la costa los valores se mantuvieron en un rango más bajo y estable.

RECOMENDACIONES

Optimizar la calibración electrónica de los sistemas CRDi en función de la altitud operativa del vehículo, incorporando protocolos de ajuste en tiempo real de parámetros como presión de riel, cantidad de inyección y gestión del turbo, especialmente en unidades que operan regularmente en zonas andinas.

Desarrollar planes de mantenimiento diferenciados para vehículos diésel en función de la altitud geográfica, priorizando revisiones del sistema de admisión, sensores de presión y estado del sistema de inyección, con el fin de preservar la eficiencia térmica y controlar las emisiones.

Incentivar el diseño de normativas locales complementarias a la NTE INEN 2202, que consideren condiciones reales de operación en altura y no solo pruebas en régimen estático, especialmente en ciudades sobre los 2.000 msnm, donde los motores pueden presentar comportamientos distintos a los evaluados en centros de RTV ubicados al nivel del mar.

BIBLIOGRAFÍA

- eBay. (30 de junio de 2021). *eBay*. (I. #362673843258, Editor, & eBAY) Recuperado el 05 de 07 de 2025, de <https://www.ebay.com/itm/362673843258>
- (EPA), U. S. E. P. A. (2004). Tier 2 Motor Vehicle Emissions Standards and Gasoline Sulfur Control Requirements. <https://www.epa.gov/greenvehicles/smog-vehicle-emissions>
- (INEC), I. N. de E. y C. (2023). Parque automotor por tipo de combustible. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/>
- (INEN)), I. E. de N. (2013). NTE INEN 2202: Limites de opacidad para vehículos diésel. <https://www.normalizacion.gob.ec/>
- (MSP), M. de S. P. del E. (2022). Informe anual de enfermedades respiratorias infantiles en zonas urbanas. <https://www.salud.gob.ec/>
- (OMS), O. M. de la S. (2021). Informe sobre contaminación del aire y salud en zonas andinas. <https://www.who.int/>
- Caiza, J. (2021). Análisis del consumo de combustible en un vehículo “pickup” ciclo Diesel bajo distintas condiciones altura. *INNOVATION & DEVELOPMENT IN ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES*, 3(1), 28. <https://doi.org/10.53358/ideas.v3i1.577>
- d’Ambrosio, S., & Ferrari, A. (2018). Diesel engines equipped with piezoelectric and solenoid injectors: hydraulic performance of the injectors and comparison of the emissions, noise and fuel consumption. *Applied Energy*, 211, 1324–1342. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.065>
- Denso. (2025). Denso Mitsubishi L200 COMMON RAIL PDF.

- DieselNet. (2024). EU: Light-Duty Vehicle Emissions. International Council on Clean Transportation. <https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php>
- Ebay. (2025). Bomba de combustible diésel de baja presión MITSUBISHI 30A6000200. <https://www.ebay.com/itm/362673843258>
- Ghazikhani, M., Ebrahim Feyz, M., Mahian, O., & Sabzadeh, A. (2013). Effects of altitude on the soot emission and fuel consumption of a light-duty diesel engine. *Transport*, 28(2), 130–139. <https://doi.org/10.3846/16484142.2013.798743>
- Gong, J., Shang, J., Li, L., Zhang, C., He, J., & Ma, J. (2021). A comparative study on fuel consumption prediction methods of heavy-duty diesel trucks considering 21 influencing factors. *Energies*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/en14238106>
- Google. (2025, July 9). Google Maps. <https://www.google.com/maps>
- Guzzella, L., & Onder, C. H. (2010). *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems (Second Edition)*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10775-7>
- Kan, Z., Hu, Z., Lou, D., Tan, P., Cao, Z., & Yang, Z. (2018). Effects of altitude on combustion and ignition characteristics of speed-up period during cold start in a diesel engine. *Energy*, 150, 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.103>
- Kitchen, T. (n.d.). A technical overview of Common Rail Diesel Fuel Systems. www.akautomotivetraining.co.uk
- Li, R., Yuan, W., Xu, J., Wang, L., Chi, F., Wang, Y., Liu, S., Lin, J., Zhang, Q., & Chen, L. (2023a). Study of the Optimization of Rail Pressure Characteristics in the High-Pressure Common Rail Injection System for Diesel Engines Based on the

Response Surface Methodology. Processes, 11(9).

<https://doi.org/10.3390/pr11092626>

Li, R., Yuan, W., Xu, J., Wang, L., Chi, F., Wang, Y., Liu, S., Lin, J., Zhang, Q., & Chen, L. (2023b). Study of the Optimization of Rail Pressure Characteristics in the High-Pressure Common Rail Injection System for Diesel Engines Based on the Response Surface Methodology. Processes, 11(9), 2626.

<https://doi.org/10.3390/pr11092626>

Liu, J., Li, Y., Zhang, C., & Liu, Z. (2022). The effect of high altitude environment on diesel engine performance: Comparison of engine operations in Hangzhou, Kunming and Lhasa cities. Chemosphere, 309, 136621.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136621>

mercadolibre. (2025a). Inyector Denso L200 .

mercadolibre. (2025b). Válvula de alivio turbo Mitsubishi l200.

https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-2742261786-valvula-de-alivio-turbo-mitsubishi-l200-_JM?searchVariation=179405031588

Mitsubishi Motors. (02 de 08 de 2020). *Mitsubishi-motors.com.ec*. Obtenido de

https://www.mitsubishi-motors.com.ec/wp-content/uploads/2020/08/Ficha_L200_AltaCalidad.pdf

Mollenhauer, K., & Tschöke, H. (2010). Handbook of Diesel Engines (1st ed.). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-89083-6>

Moreno, H. P., Pineda, D. P., & Santos, L. A. (2022). Evolución e historia de los motores diésel. 7, 744–760. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i10>

- Muñoz, L. A., & Sarango, A. G. (2023). Análisis comparativo de la opacidad generada por los gases de escape de un motor Hyundai Santa Fe CRDI 2.0 empleando biodiésel de microalgas y diésel Premium. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26398>
- Parra, E. A. (25 de junio de 2024). *Scribd*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/401163581/Sensores-Common-Rail>
- Renusa. (2025). FUEL FILTER MITSUBISHI L200 4D56 2007-2011 SAKURA FC1104 (23303-64010). <https://renusa.pe/product/filtro-de-combustible-mitsubishi-l200-4d56-2007-2011-sakura-fc1104-23303-64010/>
- Ruichuan Li, W. Y. (03 de septiembre de 2023). Study of the Optimization of Rail Pressure Characteristics in the High-Pressure Common Rail Injection System for Diesel Engines Based on the Response Surface Methodology. *11*. doi:<https://doi.org/10.3390/pr11092626>
- Scribd. (2025). Sensores Common Rail. <https://www.scribd.com/document/401163581/Sensores-Common-Rail>
- Systems, A. (06 de Abril de 2024). *Fuel Flow Meter AIC 5000 – Direct Measurement*. Obtenido de <https://es.flowmeter-aic.com/wp-content/uploads/2024/04/07-Fuel-Flow-Meter-AIC-5000.pdf>
- Tellotec. (2025). Estanque Deposito Combustible Mitsubishi L200 2016-2024. <https://www.tellotec.cl/estanque-deposito-combustible-mitsubishi-l200-2007-2015-copiar>

- Trakxion. (2025). Bomba de inyección diésel para Mitsubishi L200 2.5 DID 4D56 2010. <https://trakxiondiesel.com/productos/mx/inicio/49-bomba-de-inyeccion-diesel-para-mitsubishi-l200-25-did-4d56-2008-.html>
- Tschöke, H., Mollenhauer, K., & Maier, R. (2018). *Handbuch Dieselmotoren* (H. Tschöke, K. Mollenhauer, & R. Maier, Eds.; 4th ed.). Springer Vieweg Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-07697-9>
- Unión Europea. (2010). Directiva 2010/47/UE de la Comisión, de 5 de julio de 2010, por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 2000/30/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a las inspecciones técnicas en carretera de los vehículos industriales que circulan en la Comunidad. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2010-81232>
- Valdes-Montenegro, A., Gonzalez-Olivardia, F., Thepanondh, S., & Pinzon-Acosta, C. (2024). Estimation of on-road mobile emissions based on the vehicle technology in a high-traffic avenue in Panama City, Panama. *E3S Web of Conferences*, 530, 1003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453001003>
- Xia, M., & Zhang, F. (2020). Application of Multi-Parameter Fuzzy Optimization to Enhance Performance of a Regulated Two-Stage Turbocharged Diesel Engine Operating at High Altitude. *Energies*, 13(17), 4278. <https://doi.org/10.3390/en13174278>
- Zhao, W., Ge, Y., Li, J., Liu, L., & Wang, Y. (2021). Effect of altitude on the emission characteristics of a DI diesel engine. *E3S Web of Conferences*, 268, 1049. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126801049>
- Zheng, Y. M., Xie, L. B., Liu, D. Y., Ji, J. L., Li, S. F., Zhao, L. L., & Zen, X. H. (2023). Emission Characteristics of Heavy-Duty Vehicle Diesel Engines at High Altitudes. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 16(12). <https://doi.org/10.47176/jafm.16.12.1981>

ANEXOS

Anexo 1

Datos del consumo de combustible de la ruta Dos chorreras - Puerto Inca

RUTA DEL CAJAS					
TIEMPO (S)	Time:	Current Consumption:		Total, Consumption:	
0	20:40:10	1.096	l/h	0.000	1
10	20:40:20	1.186	l/h	0.010	1
20	20:40:30	1.504	l/h	0.010	1
30	20:40:40	13.613	l/h	0.040	1
40	20:40:50	27.481	l/h	0.100	1
50	20:41:00	30.839	l/h	0.190	1
60	20:41:10	37.286	l/h	0.290	1
70	20:41:20	25.135	l/h	0.370	1
80	20:41:30	41.200	l/h	0.480	1
90	20:41:40	18.892	l/h	0.540	1
100	20:41:50	39.210	l/h	0.640	1
110	20:42:00	46.923	l/h	0.740	1
120	20:42:10	1.825	l/h	0.790	1
130	20:42:20	22.299	l/h	0.870	1
140	20:42:30	31.214	l/h	0.930	1
150	20:42:40	23.732	l/h	0.980	1
160	20:42:50	35.296	l/h	1.050	1
170	20:43:00	1.911	l/h	1.100	1
180	20:43:10	25.508	l/h	1.160	1
190	20:43:20	21.133	l/h	1.210	1
200	20:43:30	26.435	l/h	1.310	1
210	20:43:40	26.821	l/h	1.360	1
220	20:43:50	37.916	l/h	1.440	1
230	20:44:00	32.580	l/h	1.550	1
240	20:44:10	29.986	l/h	1.590	1
250	20:44:20	32.736	l/h	1.700	1

260	20:44:30	39.373	l/h	1.760	1
270	20:44:40	1.077	l/h	1.780	1
280	20:44:50	0.329	l/h	1.780	1
290	20:45:00	1.883	l/h	1.790	1
300	20:45:10	19.906	l/h	1.830	1
1250	21:01:00	5.449	l/h	6.680	1
1260	21:01:10	4.082	l/h	6.690	1
1270	21:01:20	2.391	l/h	6.690	1

Fuente: (Autores)

Anexo 2

Altitud, Longitud, Velocidad y Latitud de la ruta del Cajas

TIEMPO	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Velocidad (m/s)
2025-05-21 01:38:44	-2,78695418	-79,1656834	3414,53	
2025-05-21 01:38:48	-2,78684492	-79,1656668	3414,97	3,07059926
2025-05-21 01:38:50	-2,78675266	-79,165655	3414,77	5,16839385
2025-05-21 01:38:52	-2,7866363	-79,1656456	3414,42	6,48717631
2025-05-21 01:38:54	-2,78649625	-79,1656335	3414,57	7,81169264
2025-05-21 01:38:56	-2,78634953	-79,1656146	3414,83	8,22052451
2025-05-21 01:38:58	-2,78619475	-79,165597	3415,59	8,65659966
2025-05-21 01:39:00	-2,7860314	-79,1655735	3417,56	9,17001999
2025-05-21 01:39:01	-2,78594048	-79,1655618	3417,81	10,188791
2025-05-21 01:39:02	-2,78584835	-79,1655494	3418,22	10,3309703
2025-05-21 01:39:03	-2,78575824	-79,1655384	3418,64	10,0889436
2025-05-21 01:39:04	-2,78566601	-79,1655301	3419,16	10,2921726
2025-05-21 01:39:05	-2,78557075	-79,1655256	3420,66	10,5988027
2025-05-21 01:39:07	-2,78538707	-79,1655256	3423,05	10,2070058
2025-05-21 01:39:08	-2,78528669	-79,1655274	3423,44	11,157867
2025-05-21 01:39:09	-2,78517593	-79,1655399	3424,6	12,3878999
2025-05-21 01:39:10	-2,78506842	-79,1655539	3425,59	12,0500109
2025-05-21 01:39:11	-2,78496486	-79,1655664	3426,5	11,592297
2025-05-21 01:39:12	-2,78485629	-79,16558	3427,38	12,1610759

2025-05-21 01:39:13	-2,7847348	-79,1655997	3428,2	13,6791717
2025-05-21 01:39:14	-2,78461092	-79,1656267	3429,19	14,089462
2025-05-21 01:39:15	-2,78448985	-79,1656534	3430,34	13,7791605
2025-05-21 01:39:16	-2,78435522	-79,1656779	3435,24	15,209379
2025-05-21 01:39:17	-2,78422177	-79,1657068	3436,59	15,175302
2025-05-21 01:39:18	-2,78408553	-79,1657346	3437,91	15,4535883
2025-05-21 01:39:19	-2,78394998	-79,165769	3439,17	15,5410814
2025-05-21 01:39:20	-2,78380769	-79,1658054	3440,3	16,3223887
2025-05-21 01:39:21	-2,78366365	-79,1658475	3441,33	16,6807288
2025-05-21 01:39:22	-2,7835156	-79,1658929	3442,27	17,2084371
2025-05-21 01:39:23	-2,78336289	-79,1659385	3443,11	17,7125388
2025-05-21 01:39:24	-2,78320993	-79,1659839	3444,19	17,7334588
2025-05-21 01:39:25	-2,78305695	-79,1660359	3445,03	17,9581369
2025-05-21 01:39:26	-2,78289622	-79,1660868	3446,4	18,7356881
2025-05-21 01:39:27	-2,78273703	-79,1661349	3447,71	18,4851028
2025-05-21 01:39:28	-2,78257526	-79,1661866	3449,41	18,872433
2025-05-21 01:39:29	-2,78241317	-79,1662326	3450,99	18,7259051
2025-05-21 01:39:30	-2,78224659	-79,1662793	3452,52	19,2291007
2025-05-21 01:39:31	-2,78209868	-79,1663296	3453,92	17,3613314
2025-05-21 01:39:32	-2,78195893	-79,1663813	3455,56	16,5623681
2025-05-21 01:39:33	-2,78180379	-79,1664268	3456,77	17,9671005
2025-05-21 01:39:34	-2,78163993	-79,1664769	3457,83	19,0431115

Fuente: (Autores)

Anexo 3

Datos del consumo de combustible de la ruta del Guayaquil

RUTA DE GUAYAQUIL					
TIEMPO (S)	Time:	Current Consumption:		Total, Consumption:	
5	12:48:18	1.994	l/h	0.030	1
10	12:48:22	1.722	l/h	0.030	1
15	12:48:27	3.784	l/h	0.040	1
20	12:48:32	10.615	l/h	0.050	1

25	12:48:37	2.322	l/h	0.060	1
30	12:48:42	2.322	l/h	0.060	1
35	12:48:47	34.083	l/h	0.080	1
40	12:48:52	9.755	l/h	0.090	1
45	12:48:57	5.507	l/h	0.090	1
50	12:49:02	1.376	l/h	0.090	1
55	12:49:07	1.174	l/h	0.100	1
60	12:49:12	17.899	l/h	0.120	1
65	12:49:17	9.332	l/h	0.140	1
70	12:49:22	22.439	l/h	0.180	1
75	12:49:27	10.974	l/h	0.190	1
80	12:49:32	9.051	l/h	0.200	1
85	12:49:37	9.140	l/h	0.210	1
90	12:49:42	1.622	l/h	0.220	1
95	12:49:47	1.622	l/h	0.220	1
100	12:49:52	0.405	l/h	0.220	1
105	12:49:57	20.841	l/h	0.250	1
110	12:50:02	13.926	l/h	0.300	1
115	12:50:07	7.580	l/h	0.310	1
120	12:50:12	6.372	l/h	0.320	1
125	12:50:17	5.412	l/h	0.330	1
130	12:50:22	3.854	l/h	0.330	1
135	12:50:27	3.685	l/h	0.340	1
140	12:50:32	8.382	l/h	0.350	1
145	12:50:37	7.921	l/h	0.360	1
150	12:50:42	6.838	l/h	0.370	1
155	12:50:47	11.106	l/h	0.380	1
160	12:50:52	7.188	l/h	0.390	1
165	12:50:57	11.093	l/h	0.410	1
170	12:51:02	6.312	l/h	0.420	1
175	12:51:07	8.470	l/h	0.440	1
180	12:51:12	8.207	l/h	0.450	1
185	12:51:17	15.002	l/h	0.460	1

190	12:51:22	9.256	l/h	0.470	1
195	12:51:27	2.302	l/h	0.480	1
200	12:51:32	1.905	l/h	0.490	1
205	12:51:37	1.905	l/h	0.490	1
210	12:51:42	0.476	l/h	0.490	1
215	12:51:47	0.476	l/h	0.490	1

Fuente: (Autores)

Anexo 4

Altitud, Longitud, Latitud y Velocidad de la Ruta de Guayaquil

TIEMPO	Latitud	Longitud (m)	Altitud (m)	velocidad (m/s)
2025-05-21 17:46:36	-2,12270994	- 79,8852327	6,71	
2025-05-21 17:46:39	-2,12266197	- 79,8851248	6,71	4,37690189
2025-05-21 17:46:41	-2,12262585	- 79,8850297	7,95	5,65039816
2025-05-21 17:46:43	-2,12260633	-79,884921	7,69	6,13483908
2025-05-21 17:46:45	-2,12258522	- 79,8847924	7,15	7,24681425
2025-05-21 17:46:47	-2,12256292	- 79,8846656	6,86	7,15051927
2025-05-21 17:46:48	-2,12253488	- 79,8845352	6,91	14,8237936
2025-05-21 17:46:50	-2,12250274	- 79,8844092	7,5	7,22756932
2025-05-21 17:47:01	-2,12225046	-79,883898	6,61	5,75928452
2025-05-21 17:47:02	-2,12217048	- 79,8838256	6,53	11,9951377
2025-05-21 17:47:03	-2,12227835	- 79,8837653	6,54	13,7318517
2025-05-21 17:47:04	-2,12241749	-79,883211	6,46	63,5220347

2025-05-21 17:47:05	-2,12232287	-	6,08	13,7207991
		79,8832903		
2025-05-21 17:47:09	-2,12227937	-	6,19	3,30032436
		79,8831797		
2025-05-21 17:47:11	-2,1222494	-	6,01	5,05927928
		79,8830938		
2025-05-21 17:47:13	-2,12222174	-79,882994	6,32	5,752754
2025-05-21 17:47:16	-2,1222527	-79,882886	6,26	4,16108705
2025-05-21 17:47:19	-2,12232035	-	6,88	4,90167743
		79,8827723		
2025-05-21 17:47:21	-2,12239794	-	7,07	6,63866322
		79,8826815		
2025-05-21 17:47:23	-2,12249655	-	7,02	7,18141851
		79,8825979		
2025-05-21 17:47:25	-2,12262748	-	6,34	7,33707375
		79,8825809		
2025-05-21 17:47:27	-2,12281794	-	6,23	11,1772383
		79,8826456		
2025-05-21 17:47:28	-2,12290727	-	6,33	10,8183514
		79,8826842		
2025-05-21 17:47:29	-2,12300921	-	6,25	11,349117
		79,8826902		
2025-05-21 17:47:30	-2,12316728	-	6,24	17,5778387
		79,8826849		
2025-05-21 17:47:31	-2,12329876	-	6,33	15,2311472
		79,8826462		
2025-05-21 17:47:32	-2,12343003	-	6,37	14,7027702
		79,8826298		
2025-05-21 17:47:33	-2,12357991	-	6,52	16,7711903
		79,8826123		
2025-05-21 17:47:34	-2,12372702	-79,882593	6,63	16,4893294
2025-05-21 17:47:35	-2,12386745	-	6,64	15,7237456
		79,8825758		

2025-05-21 17:47:36	-2,12401323	-	6,78	16,2418425
		79,8825656		
2025-05-21 17:47:37	-2,1241572	-	6,79	16,0072323
		79,8825614		

Fuente: (Autores)

Anexo 5

Datos del consumo de combustible de la ciudad de Cuenca

RUTA DE CUENCA					
TIEMPO (S)	Time:	Current Consumption:		Total, Consumption:	
5	14:02:33	0.740	l/h	0.740	1
10	14:07:40	1.046	l/h	0.740	1
15	14:07:44	0.740	l/h	0.790	1
20	14:07:49	0.740	l/h	0.820	1
25	14:07:54	3.741	l/h	0.820	1
30	14:07:59	1.046	l/h	0.830	1
35	14:08:04	1.046	l/h	0.840	1
40	14:08:09	1.803	l/h	0.840	1
45	14:08:14	0.867	l/h	0.840	1
50	14:08:19	10.557	l/h	0.850	1
55	14:08:24	1.552	l/h	0.860	1
60	14:08:29	5.154	l/h	0.860	1
65	14:08:34	4.246	l/h	0.870	1
70	14:08:39	21.906	l/h	0.890	1
75	14:08:44	1.046	l/h	0.960	1
80	14:08:49	22.801	l/h	1.030	1
85	14:08:54	2.623	l/h	1.030	1
90	14:08:59	3.110	l/h	1.040	1
95	14:09:04	3.110	l/h	1.040	1
100	14:09:09	0.777	l/h	1.040	1
105	14:09:14	0.378	l/h	1.040	1
110	14:09:19	1.402	l/h	1.040	1

115	14:09:24	3.265	l/h	1.040	1
120	14:09:29	3.265	l/h	1.040	1
125	14:09:34	0.816	l/h	1.040	1
130	14:09:39	0.816	l/h	1.040	1
135	14:09:44	0.204	l/h	1.040	1
140	14:09:49	0.204	l/h	1.040	1
145	14:09:54	0.051	l/h	1.040	1
150	14:09:59	0.051	l/h	1.040	1
155	14:10:04	0.012	l/h	1.040	1
160	14:10:09	8.964	l/h	1.050	1
165	14:10:14	4.780	l/h	1.060	1
170	14:10:19	9.938	l/h	1.080	1
175	14:10:24	2.484	l/h	1.080	1
180	14:10:29	2.484	l/h	1.080	1
185	14:10:34	0.378	l/h	1.080	1
190	14:10:39	9.150	l/h	1.100	1
195	14:10:44	6.272	l/h	1.110	1
200	14:10:49	16.089	l/h	1.130	1
205	14:10:54	20.373	l/h	1.150	1
210	14:10:59	1.046	l/h	1.210	1
215	14:11:04	32.477	l/h	1.250	1
220	14:11:09	37.287	l/h	1.290	1
225	14:11:14	2.330	l/h	1.290	1
230	14:11:19	10.415	l/h	1.310	1
235	14:11:24	11.298	l/h	1.320	1
240	14:11:29	73.200	l/h	1.390	1
245	14:11:34	9.243	l/h	1.390	1
250	14:11:39	2.310	l/h	1.390	1
255	14:11:44	2.310	l/h	1.390	1
260	14:11:49	4.869	l/h	1.400	1
265	14:11:54	6.554	l/h	1.410	1
270	14:11:59	1.638	l/h	1.410	1
275	14:12:04	1.638	l/h	1.410	1

280	14:12:09	0.409	l/h	1.410	1
285	14:12:14	0.409	l/h	1.410	1
290	14:12:19	1.433	l/h	1.410	1
295	14:12:24	1.576	l/h	1.410	1
300	14:12:29	0.840	l/h	1.410	1
305	14:12:34	1.716	l/h	1.420	1

Fuente: (Autores)

Anexo 6

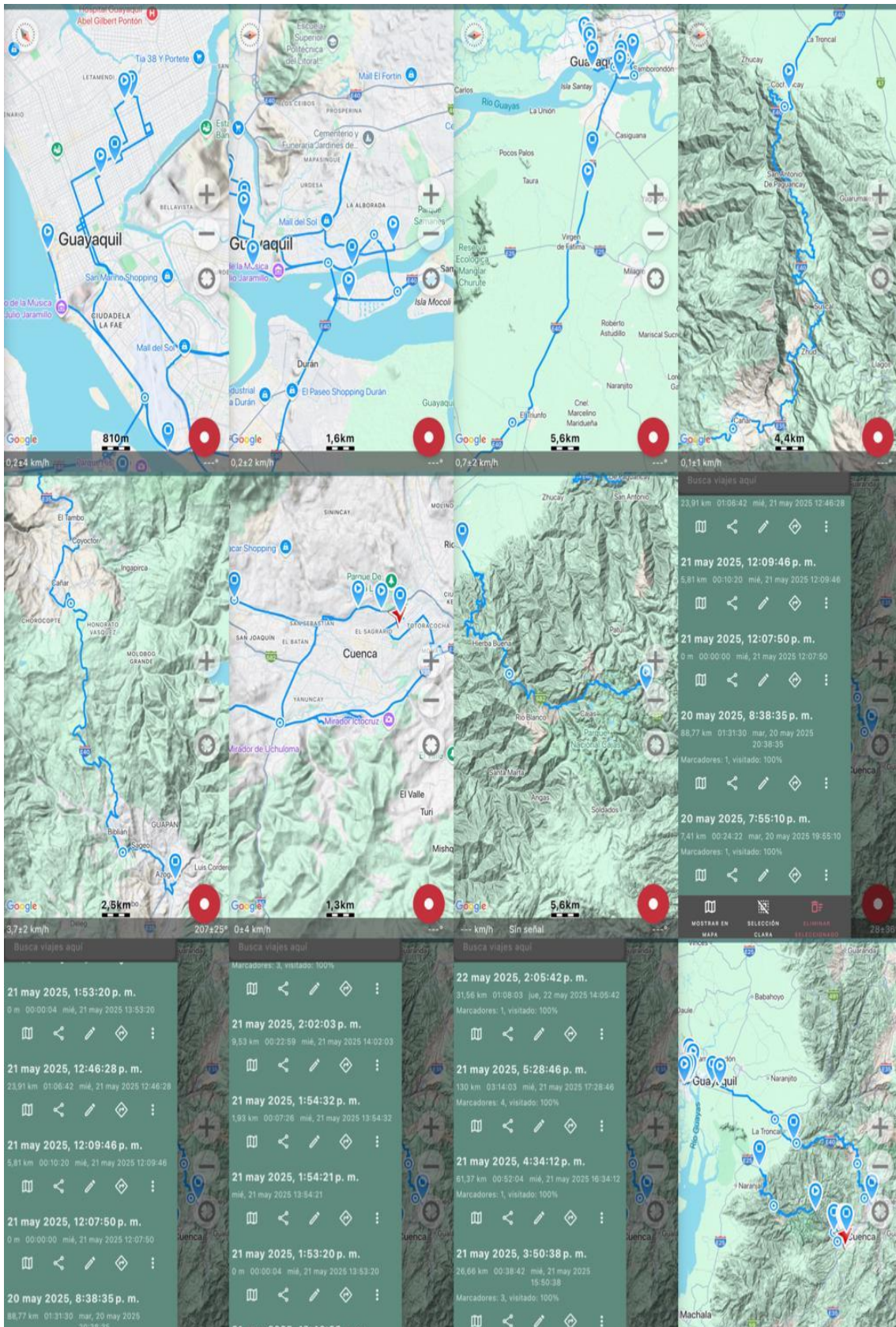
Altitud, Latitud, Longitud y velocidad de Cuenca

TIEMPO	Latitud	Longitud (m)	Altitud (m)	Velocidad (m/s)
2025-05-22 19:05:48	-2,8850757	-79,006741	2603,3	
2025-05-22 19:05:50	-2,8850933	-79,006831	2602,04	5,0921817
2025-05-22 19:05:52	-2,8851108	-79,006944	2601,61	6,3795159
2025-05-22 19:05:54	-2,8851427	-79,007104	2601,38	9,0652382
2025-05-22 19:05:56	-2,8851864	-79,007276	2600,8	9,8600042
2025-05-22 19:05:57	-2,8852164	-79,007367	2600,08	10,607219
2025-05-22 19:05:59	-2,885277	-79,007529	2597,69	9,6131859
2025-05-22 19:06:01	-2,8853459	-79,007681	2597,17	9,29784
2025-05-22 19:06:03	-2,885428	-79,00783	2596,8	9,4548222
2025-05-22 19:06:05	-2,885517	-79,007969	2596,3	9,1451375
2025-05-22 19:06:07	-2,8856217	-79,00812	2595,77	10,2247
2025-05-22 19:06:08	-2,8856849	-79,008198	2595,45	11,18292
2025-05-22 19:06:09	-2,8857464	-79,008276	2595,62	10,974726
2025-05-22 19:06:10	-2,8858238	-79,008355	2595,2	12,309043
2025-05-22 19:06:11	-2,8859035	-79,00843	2594,79	12,190627
2025-05-22 19:06:16	-2,8863147	-79,008826	2592,09	13,562132
2025-05-22 19:06:17	-2,8864033	-79,008902	2591,87	12,973783
2025-05-22 19:06:18	-2,8864916	-79,008983	2591,53	13,334103
2025-05-22 19:10:08	-2,8878675	-79,018811	2607,85	3,5064938
2025-05-22 19:10:13	-2,8878569	-79,018906	2606,69	2,1192473
2025-05-22 19:10:17	-2,8878451	-79,019008	2606,03	2,851226

Fuente: (Autores)

Anexo 7

Rutas y Archivos GPX



Fuente: (Autores)

Anexo 8

En la toma de datos vía a la costa



Fuente: (Autores)

Anexo 9

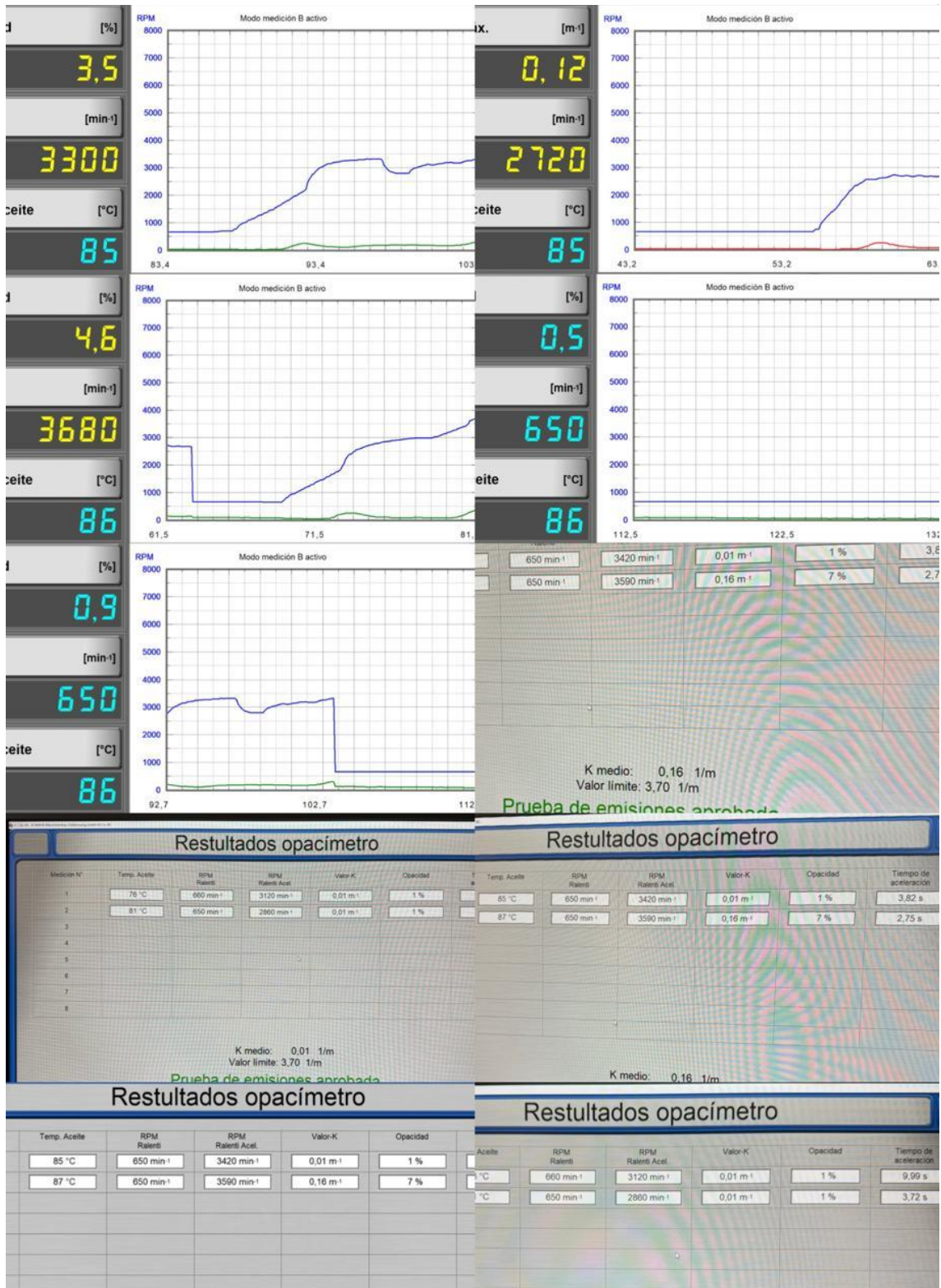
En la instalación de los equipos del opacímetro



Fuente: (Autores)

Anexo 10

Gráficas de opacidad



Fuente: (Autores)