

IMPACTO DEL OCTANAJE DEL COMBUSTIBLE EN EL DESEMPEÑO, CONSUMO Y EMISIONES DEL MOTOR A MÁS DE 2500 MSNM

IMPACT OF FUEL OCTANE ON ENGINE PERFORMANCE, CONSUMPTION, AND EMISSIONS ABOVE 2500 MASL

Paúl Montúfar Paz¹, Edison Patricio Abarca Pérez², Iván Huacho Chávez³, Juan Carlos Quinchuela Paucar⁴

{paul.montufar@esPOCH.edu.ec¹, edison.abarca@esPOCH.edu.ec², ivan.huacho@esPOCH.edu.ec³, juan.quinchuela@esPOCH.edu.ec⁴}

Fecha de recepción: 15/06/2026 / Fecha de aceptación: 02/07/2026 / Fecha de publicación: 08/07/2026

RESUMEN: La estabilidad de la combustión, el rendimiento del motor y el nivel de emisiones contaminantes dependen en buena medida del índice de octano de la gasolina que se use. En este trabajo se compara el efecto de dos octanajes comerciales (87 y 92) sobre el comportamiento de un motor de encendido por chispa que opera en condiciones de gran altitud (~3000 msnm), un escenario todavía poco estudiado donde la menor densidad del aire altera tanto la eficiencia volumétrica como la relación aire-combustible. Para eso se sometió un Hyundai Grand i10 de 1.2 L a pruebas en dinamómetro de chasis, recorriendo el ciclo IM240 mientras se registraban el consumo de combustible y las emisiones de CO, HC y NO (en gramos totales por prueba). Con 92 octanos, las emisiones de CO bajaron en promedio un 28.4% ($p < 0.001$); las de HC se redujeron un 11.1% ($p = 0.017$ con la prueba t, aunque no con Mann-Whitney) y las de NO subieron un 9.2% (sin significancia con la prueba t, pero sí con Mann-Whitney, $p = 0.028$). El consumo resultó mayor con 92 octanos en baja potencia (+12.3%, $p < 0.01$), pero menor en aceleración alta (-17.8%, $p = 0.013$); en desaceleración y en los regímenes de potencia media/alta no hubo diferencias significativas entre combustibles ($p > 0.05$), y tampoco se encontraron diferencias en torque ni potencia ($p > 0.2$). En conjunto, los hallazgos confirman que la altitud condiciona de manera crítica el desempeño térmico y ambiental del motor, y que el efecto del octanaje sobre consumo y emisiones varía bastante según la condición de conducción, sin que se note una ventaja mecánica clara de un combustible sobre el otro.

¹Departamento de Investigación (IDI), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9062-8704>.

²Departamento de Investigación (IDI), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7041-4805>.

³Departamento de Ingeniería Química, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3144-3379>.

⁴Departamento de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5113-1893>.

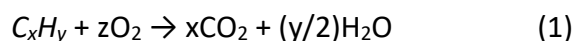
Palabras clave: *Octanaje, consumo de combustible, emisiones vehiculares, motores de combustión interna, gran altitud, eficiencia energética*

ABSTRACT: Combustion stability, engine performance, and pollutant emissions all depend heavily on the octane rating of the gasoline being burned. Here we compare two commercial octane grades (87 and 92) in a spark-ignition engine operating at high altitude (~3000 masl) — a condition still seldom studied, where reduced air density alters both volumetric efficiency and the air–fuel ratio. A 1.2 L Hyundai Grand i10 was run on a chassis dynamometer through the IM240 driving cycle while fuel consumption and CO, HC, and NO emissions (expressed in total grams per test) were logged. Switching to 92-octane fuel cut average CO emissions by 28.4% ($p < 0.001$) and HC emissions by 11.1% ($p = 0.017$ by t-test; not significant by Mann-Whitney), while NO emissions rose by 9.2% (not significant by t-test; $p = 0.028$ by Mann-Whitney). Fuel consumption was significantly higher with 92-octane fuel at low power (+12.3%, $p < 0.01$), but significantly lower at high acceleration (-17.8%, $p = 0.013$); no significant differences were found during deceleration or at medium/high power ($p > 0.05$). No significant differences in torque or power were observed between octane grades ($p > 0.2$). Taken together, the results show that altitude critically shapes the thermal and environmental performance of the engine, and that the effect of octane on consumption and emissions is highly dependent on the driving condition, with no clear mechanical advantage of either fuel.

Keywords: *Octane rating, fuel consumption, vehicle emissions, internal combustion engines, high altitude, energy efficiency*

INTRODUCCIÓN

El índice de octano es, junto con la relación de compresión, uno de los parámetros que más condiciona la eficiencia de un motor de encendido por chispa (MEC). Cuanto mayor es el octanaje de un combustible, mayor es también su resistencia al autoencendido (knock), lo que abre la puerta a adelantar el punto de encendido, trabajar con relaciones de compresión más altas y, en última instancia, mejorar la eficiencia térmica del motor. En los motores modernos de cilindrada reducida, turboalimentados y con inyección directa esta resistencia al knock no es un detalle menor: es parte central de cómo se optimizan hoy el consumo de combustible y las emisiones (1). El problema es que, por encima de los 2500 metros sobre el nivel del mar (msnm), la presión atmosférica cae lo suficiente como para reducir la densidad del aire en torno a un 25% respecto al nivel del mar, lo que termina alterando la mezcla aire-combustible, la estabilidad de la combustión y, con ello, el desempeño general del motor (2).



donde C_xH_y representa un hidrocarburo genérico, donde x es el número de átomos de carbono e y el número de átomos de hidrógeno; zO_2 representa el oxígeno requerido para la combustión, siendo z el coeficiente estequiométrico; xCO_2 es el dióxido de carbono producido a partir del carbono inicial; y $(y/2) H_2O$ es el agua formada en la reacción a partir del hidrógeno disponible.

Por encima de los 2000 msnm, distintos estudios reportan caídas de potencia de entre 10 y 15% en los motores, simplemente porque hay menos oxígeno disponible para la combustión (3). Esto no es un dato anecdótico para un país como Ecuador: ciudades tan pobladas como Quito (2850 msnm) o Cuenca (2535 msnm) operan justamente en ese rango de altitud donde el desempeño del motor empieza a resentirse, lo que vuelve urgente entender cómo responde el octanaje del combustible en estas condiciones específicas.

Que un mayor número de octano de investigación (RON) mejora la estabilidad de la combustión y reduce la tendencia al knock en motores MEC es algo ya bien establecido en la literatura (4). Ling et al., por ejemplo, mostraron que subir el RON de 91 a 98 en motores turboalimentados de inyección directa (GTDI) mejora la resistencia al autoencendido lo suficiente como para ganar hasta un 5% de eficiencia térmica y ahorrar cerca de un 3% de combustible en ciclos estándar (5). Leone et al. llegaron a una conclusión distinta pero complementaria: trabajando con el contenido de etanol de la gasolina, encontraron que cada 10% adicional de etanol eleva el RON efectivo en dos unidades, lo cual se traduce en una reducción de entre 8 y 12% en las emisiones de CO y de hidrocarburos no quemados (HC).

El problema es que casi todo este cuerpo de evidencia proviene de pruebas a baja altitud o en condiciones controladas de laboratorio (6). Stradling et al., por mencionar un caso representativo, estudiaron cómo el octanaje afecta la potencia y el consumo en vehículos de pasajeros Euro 4, pero sin entrar nunca en el factor altitud (4). Otros trabajos sí han señalado un punto relevante para este estudio: bajo carga alta, los combustibles de mayor octanaje pueden disparar de forma transitoria las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) hasta en un 15%, como consecuencia de su menor velocidad de combustión (7).

Las tecnologías vehiculares más recientes no hacen sino subrayar la importancia de la calidad del octanaje. Zinser et al. encontraron que los sistemas de propulsión modernos —HEV, GDI— sacan más partido de los combustibles de alto RON, sobre todo en conducción urbana, porque sus sensores de knock y su gestión electrónica permiten estrategias de adelanto de encendido más agresivas sin comprometer ni el desempeño ni las emisiones (8), (9).

En el plano metodológico, los sistemas portátiles de medición de emisiones (PEMS) se han vuelto la herramienta de referencia para captar datos reales en carretera; ahí, una sincronización precisa de las señales hace la diferencia entre factores de emisión confiables y datos ruidosos (10), (11). El ciclo IM240, por su parte, lleva años usándose para evaluar cómo las propiedades del combustible afectan el consumo y las emisiones reguladas con variaciones de hasta un 7% en CO_2 documentadas según la formulación del combustible y la calibración del motor (12).

Lo que falta y es precisamente el vacío que este trabajo intenta llenar es investigación que combine octanaje y gran altitud en un mismo experimento, usando ciclos de conducción que de verdad reflejen el tráfico urbano e interurbano de estas zonas. Las pruebas aquí presentadas se hicieron sobre un Hyundai Grand i10 de 1.2 L, en dinamómetro de chasis, evaluando potencia y torque al mismo tiempo que se cuantificaban las emisiones de CO, HC y NO_x a lo largo del ciclo IM240 (13) un escenario que sigue prácticamente inexplorado en la literatura por encima de los 2500 msnm. Más allá del interés académico, los resultados deberían servir para algo concreto:

ayudar a elegir mejor el combustible en zonas de altura, reducir el impacto ambiental y alimentar con evidencia empírica las políticas de combustibles y los marcos regulatorios de emisiones en países de topografía montañosa como Ecuador (14).

Si hay algo que la literatura deja claro es que el octanaje no afecta el desempeño y las emisiones de forma lineal, sino que su efecto depende fuertemente del motor evaluado. En motores monocilíndricos, usar más octanaje del que el motor realmente necesita (RON 95 en lugar de RON 90) tiende a bajar la potencia al freno, la eficiencia térmica y el consumo específico; a cambio se reducen NO_x y CO, pero suben HC y CO₂ (15). En motores de modo dual la historia es otra: lo que importa es la sensibilidad del combustible la diferencia entre RON y MON, que cambia el retraso de la ignición, con un rango óptimo de RON entre 87.5 y 92.5 para ciertas configuraciones de hardware (12), (16). Subir el octanaje junto con la relación de compresión reduce las emisiones de CO₂ (7), y en vehículos de alto desempeño los combustibles de RON 95, 98 o 100 mejoran aceleración, potencia y consumo gracias al adelanto de encendido que permite el control electrónico (13). Pero en motores carburados ocurre casi lo contrario: pasar de RON 91 a RON 95 puede empeorar el desempeño y subir las emisiones (14), (5). Incluso en combustión por compresión a alta carga, son los combustibles de menor octanaje los que rinden mejor, gracias a su mayor reactividad (17). En resumen: cada tecnología de motor "lee" el octanaje de manera distinta, y generalizar conclusiones de un tipo de motor a otro es, cuando menos, arriesgado.

Con ese vacío como punto de partida, este estudio busca determinar qué efecto tiene el octanaje del combustible (87 frente a 92) sobre el desempeño mecánico, el consumo y las emisiones contaminantes (CO, HC y NO_x) de un motor de encendido por chispa que trabaja por encima de los 2500 msnm, usando el ciclo IM240 como marco de prueba. La hipótesis de partida es que, dada la menor densidad del aire propia de la altitud, el combustible de 92 octanos debería favorecer una combustión más completa y un mejor aprovechamiento energético reflejado, en principio, en menores emisiones de CO y en algún margen de mejora en torque o potencia, aunque posiblemente a costa de incrementos puntuales en HC y NO_x bajo carga alta, por las mayores temperaturas que trae consigo una mayor resistencia al autoencendido.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para entender cómo el octanaje del combustible afecta el desempeño del motor, el consumo y las emisiones, se diseñó una serie de pruebas experimentales controladas comparando dos gasolinas de venta comercial en Ecuador Extra (87 octanos) y Súper (92 octanos), cuyas propiedades químicas y físicas aparecen detalladas en la Tabla 1. El vehículo de prueba fue un Hyundai Grand i10 con motor G4LIII de 1.2 litros, elegido por ser de uso urbano frecuente y compatible con ambos combustibles. La potencia y el torque se midieron con un dinamómetro Bapro BPA-2R-HP, mientras que el ciclo de conducción IM240 permitió evaluar consumo y emisiones contaminantes bajo condiciones representativas de tráfico real. Como los datos provenían de varios instrumentos a la vez, su sincronización temporal se resolvió con un algoritmo en Python diseñado específicamente para mantener la consistencia entre todas las variables registradas (18).

2.1. Combustibles

Las dos gasolinas comparadas en este estudio Extra (87 octanos) y Súper (92 octanos) se venden comercialmente en Ecuador, y sus propiedades químicas y físicas se resumen en la Tabla 1. La diferencia que más importa entre ellas es, justamente, el octanaje: de él depende buena parte de la eficiencia de la combustión, el desempeño del motor y las emisiones resultantes. La Extra está pensada para motores de baja compresión; la Súper, en cambio, se formula para sacarle partido a motores de alta compresión, con mejor desempeño y eficiencia como resultado (2).

La gasolina Súper, además, lleva una mayor proporción de compuestos aromáticos y puede contener hasta 10% de etanol, ambos factores que suman resistencia al knock. Las diferencias en volatilidad, poder calorífico y composición química terminan pesando bastante en el consumo y en el perfil de emisiones, más todavía en entornos de gran altitud como la sierra ecuatoriana (19). La gasolina Extra, al ser más volátil, se evapora con más facilidad lo que ayuda en el arranque en frío y en la mezcla aire-combustible a bajas temperaturas, pero esa misma volatilidad puede generar bloqueo de vapor y perder eficiencia cuando hace calor. La Súper, con menor volatilidad, ofrece una combustión más consistente en motores de alta compresión y menos emisiones evaporativas, lo que se traduce en mejor eficiencia térmica y menos HC. El poder calorífico, por su parte, determina cuánta energía se obtiene por cada unidad de combustible, mientras que la composición química en particular los aromáticos influye en qué tan rápido se propaga la llama y cómo evoluciona la combustión. Entre todos estos factores se termina definiendo cuán bien convierte el motor el combustible en trabajo útil (20).

Tabla 1. Propiedades físicas de los combustibles.

Propiedad	Extra (87 octanos)	Súper (92 octanos)
Densidad a 15°C (g/cm ³)	0.72 - 0.74	0.73 - 0.76
PCI (MJ/kg)	44.5 - 46.5	44.0 - 46.0
PCS (MJ/kg)	47.5 - 49.5	47.0 - 49.0
Azufre (%)	< 0.05	< 0.05
Temp. de evaporación (°C)	30 - 90	30 - 95
Presión de vapor (kPa)	55 - 65	55 - 70
Relación de compresión	~8:1	~10:1

2.2. Vehículo de prueba

Se trabajó con un Hyundai Grand i10 equipado con motor G4LIII de 1.2 litros, cuatro cilindros en línea, inyección multipunto (MPI) y doble árbol de levas en cabeza (DOHC). La elección no fue casual: es un modelo común en las calles ecuatorianas y compatible con ambos octanajes, lo que hace posible comparar de forma realista cómo cambian la potencia, el consumo y las emisiones según el combustible utilizado (21).

Con una relación de compresión cercana a 10.5:1, el motor puede operar sin problema con cualquiera de los dos combustibles, lo cual resulta clave para analizar cómo el octanaje afecta la eficiencia térmica, la resistencia al knock y la formación de contaminantes. No es un vehículo cualquiera dentro del parque automotor ecuatoriano: solo en el primer trimestre de 2023 se vendieron 234 unidades del Grand i10, una de las cifras más altas del segmento urbano, lo que lo

convierte en un caso bastante representativo para este tipo de estudio. Las especificaciones técnicas completas están en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones del vehículo de prueba.

Especificación	Hyundai Grand i10
Cilindrada del motor (cc)	1,197
Potencia (HP @ rpm)	83 @ 6,000
Torque (Nm @ rpm)	114 @ 4,000
Tipo de combustible	Gasolina
Transmisión	Manual de 5 velocidades
Tracción	Delantera (FWD)
Consumo de combustible	~5.9 L/100 km (ciclo combinado)
Relación de compresión	~10.5:1
Dimensiones L×An×Al (mm)	3,815 × 1,680 × 1,510
Distancia entre ejes (mm)	2,450
Neumáticos	175/65 R14

Vale la pena explicar por qué se decidió probar gasolina Extra (87 octanos) en un motor con relación de compresión nominal de 10.5:1, pensado por el fabricante para combustible de mayor octanaje. En teoría, esa combinación favorece la aparición de autoencendido (knock), lo que activa el sensor de golpeteo y lleva a la unidad de control electrónico (ECU) a retrasar de forma adaptativa el punto de encendido para proteger el motor (3), (9). Pero esa condición es justamente la que interesa evaluar aquí: en Ecuador no es raro que vehículos con relaciones de compresión moderadas a altas pensados para 92 octanos terminen abastecidos con gasolina Extra por razones de costo, sobre todo en ciudades de altura como Riobamba, donde la menor densidad del aire reduce aún más la presión efectiva en cámara y, con ello, la propensión al knock respecto al nivel del mar (2). Poner a prueba ese escenario motor de alta compresión funcionando con combustible de menor octanaje, en altitud permite ver con datos reales si el retraso adaptativo de la ECU termina compensando, atenuando o incluso agravando las diferencias de desempeño y emisiones frente al combustible recomendado, en lugar de quedarse solo con lo que dice la teoría.

2.3. Dinamómetro de chasis

El desempeño del motor se midió en un dinamómetro de chasis Bapro BPA-2R-HP, pensado justamente para capturar torque, potencia y consumo de combustible en vehículos ligeros de forma confiable y repetible. Su sistema de rodillos de alta precisión, combinado con ventilación controlada, simula condiciones reales de conducción sin perder el control sobre el enfriamiento ni introducir variabilidad externa en los resultados (22). Además, integra sensores de RPM, un analizador de gases y conectividad OBD-II, lo que permite seguir tanto la respuesta del motor como sus emisiones al mismo tiempo (23). Sus especificaciones completas están en la Tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones del dinamómetro Bapro BPA-2R-HP.

Especificación	Bapro BPA-2R-HP
Potencia máxima absorbida	650 HP
Potencia máxima medible	1000 HP

Fuerza de tracción máxima	8000 N
Diámetro / ancho de rodillo	400 mm / 700 mm
Peso máximo del vehículo	2500 kg
Sensores de medición	RPM, temp. motor, opacímetro, analizador de gases, OBD-II
Certificación	OIML R99 - ISO 3930, Clase 1 y 0
Precisión de medición	±1.0% para torque y potencia

2.4. Ciclo de conducción de prueba

El ciclo IM240 se eligió porque es metodología de referencia en los protocolos de certificación de emisiones tanto en Estados Unidos como en la Unión Europea, y porque reproduce bien las condiciones de conducción urbana y suburbana en las que normalmente circula un vehículo como el Hyundai Grand i10. A diferencia de los procedimientos estáticos, el IM240 recorre fases de aceleración, desaceleración, velocidad constante y ralenti, lo que captura esos efectos transitorios que tanto influyen en el desempeño energético y en la formación de contaminantes justo lo que ocurre cuando el motor enfrenta cambios abruptos de carga en el tráfico urbano (24). Su velocidad máxima moderada y su período de ralenti prolongado lo hacen además sensible a diferencias de combustión entre octanajes, sobre todo en la generación de CO, HC y NO_x (Tabla 4). Y al ser un ciclo de uso internacional, garantiza que los resultados sean comparables con otros estudios, además de representar fielmente los patrones de conducción de ciudades como Riobamba, donde se realizaron las pruebas a 3000 msnm.

Tabla 4. Especificaciones técnicas del ciclo de conducción IM240.

Especificación	Valor / Descripción
Duración total	240 segundos
Distancia total	3.1 millas (~5 km)
Velocidad máxima	91.3 km/h
Velocidad promedio	47.8 km/h
Número de fases	2 (aceleración inicial y conducción estable)
Aceleración / desaceleración máxima	3.3 / -3.2 m/s ²
Tiempo en ralenti	90 segundos
Velocidad constante	43.5% del ciclo
Condiciones simuladas	Conducción urbana y suburbana

2.5. Protocolo experimental y sistema de medición

Cada combustible se probó cinco veces, una cifra pensada para reducir el error aleatorio y poder estimar con precisión el error estándar de la media ($SEM = \sigma/\sqrt{n}$) con un 95% de confianza en las comparaciones. Las pruebas se hicieron a 3000 msnm, en condiciones ambientales estables (15-20 °C); cada ciclo comenzó con cinco minutos de ralenti para estabilizar térmicamente el motor antes de correr el IM240 completo (25). Todo el sistema de adquisición trabajó sincronizado a 1 Hz: el dinamómetro Bapro BPA-2R-HP aportó las lecturas continuas de torque y potencia (26); el analizador BrainBee AGS-688 midió las emisiones del escape mediante el principio NDIR para CO y HC y sensores electroquímicos para NO_x, con ±1% de precisión y certificación OIML R99 Clase 1; y el consumo de combustible se obtuvo con una probeta graduada de vidrio borosilicato Clase A de 500 ml (resolución de 1 ml, error de ±0.5 ml), calculando la masa a partir de la densidad

específica reportada por el distribuidor. En paralelo, un adaptador OBD-II ELM327 conectado a la aplicación OBD Fusion registró velocidad, carga del motor, temperatura del refrigerante, posición del acelerador y RPM también a 1 Hz, con exportación directa a .csv y visualización en tiempo real. Esta integración de instrumentos fue justamente lo que permitió mantener la coherencia de los datos y respaldar la validez interna de los resultados (27).

2.6. Incertidumbre de medición y método gravimétrico indirecto

Para llegar a la masa de combustible consumida en cada ciclo se usó un método gravimétrico indirecto: el volumen leído en la probeta graduada ($m = V \cdot \rho$) se multiplica por la densidad específica del combustible a 15 °C, tomada de la Tabla 1. La incertidumbre combinada de ese cálculo se obtuvo propagando, según la ley de propagación de incertidumbres (GUM), la incertidumbre estándar del volumen (resolución de 1 ml, distribución rectangular, $u(V) = 0.5/\sqrt{3} \approx 0.29$ ml sobre una lectura típica de 500 ml) junto con la del valor de densidad, estimada a partir del rango que reporta el distribuidor para cada combustible ($u(\rho) = (\rho_{\text{max}} - \rho_{\text{min}})/(2\sqrt{3})$). Con eso se llega a una incertidumbre relativa combinada de alrededor de 0.79% para la gasolina de 87 octanos y 1.16% para la de 92, lo que equivale a una incertidumbre expandida ($k = 2$, ~95% de confianza) de $\pm 1.59\%$ y $\pm 2.33\%$, respectivamente. Para CO, HC y NOx la incertidumbre expandida se tomó directamente de la hoja de especificaciones del analizador BrainBee AGS-688 ($\pm 1\%$, certificación OIML R99 Clase 1), y para torque y potencia se usó la precisión declarada del dinamómetro Bapro BPA-2R-HP ($\pm 1.0\%$, Tabla 3). Estos márgenes de error son lo bastante pequeños frente a las diferencias estadísticamente significativas reportadas en Resultados como para descartar que esas diferencias sean producto del error instrumental.

2.7. Filtrado, sincronización y tratamiento estadístico de los datos

Trabajar con varios sistemas de medición al mismo tiempo obliga a resolver bien la sincronización temporal entre variables; de eso depende, en buena parte, que los datos tengan sentido. Las lecturas del dinamómetro, del analizador BrainBee, del módulo OBD-II y las anotaciones manuales del volumen de combustible se unificaron en un solo conjunto de datos siguiendo el proceso de filtrado, alineación y análisis estadístico detallado en la Tabla 5. Primero se aplicó un filtro de media móvil de tres puntos para suavizar el ruido de alta frecuencia; luego, el método de Tukey ($Q1 - 1.5 \cdot \text{RIC}$ y $Q3 + 1.5 \cdot \text{RIC}$) permitió detectar y eliminar valores atípicos, sobre todo en las concentraciones de emisiones y en las señales de velocidad del motor, donde aparecían anomalías ocasionales (Figura 1). La sincronización entre fuentes no se basó únicamente en marcas de tiempo: se recurrió también a un análisis de correlación cruzada entre señales por ejemplo, CO frente a carga del motor, o NOx frente a RPM, usando el coeficiente de correlación de Pearson sobre ventanas móviles (1) para encontrar los desfases óptimos y alinear todo a una frecuencia común de 1 Hz (28). La velocidad del vehículo se tomó como referencia principal por estar disponible en varias fuentes a la vez y por su fuerte correlación con el comportamiento transitorio de las emisiones (29).

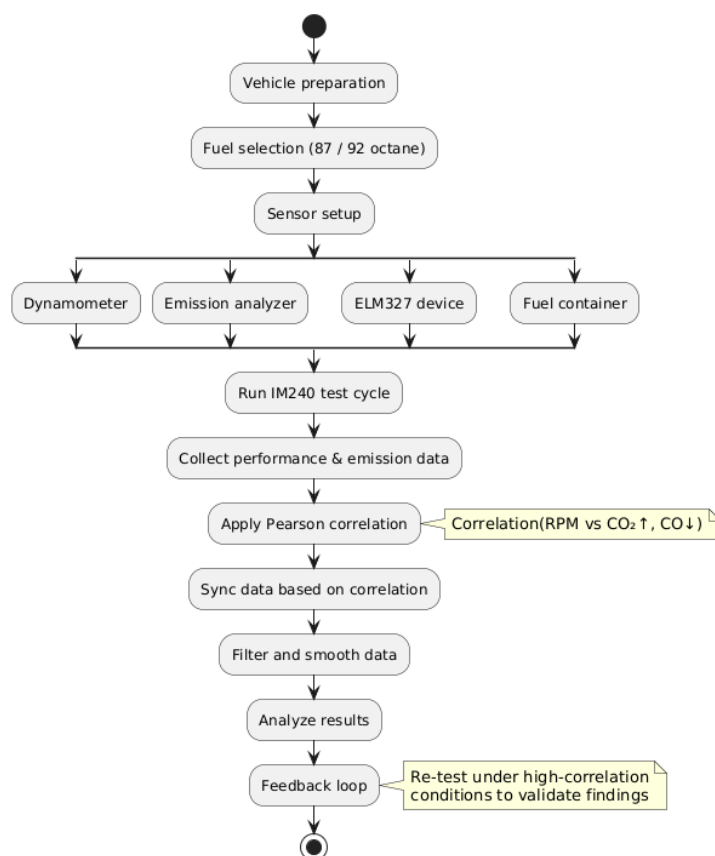


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología para el análisis del impacto del octanaje, con correlación de datos y bucle de retroalimentación.

Con el conjunto de datos ya sincronizado, las observaciones se agruparon por combustible y repetición experimental, calculando para cada variable clave potencia, torque, emisiones, velocidad y consumo sus estadísticas descriptivas: media, desviación estándar, rango intercuartílico y coeficiente de variación. La normalidad se verificó con la prueba de Shapiro-Wilk; cuando se cumplía, se aplicó un ANOVA de un factor al 5% de significancia, y cuando no, se recurrió a la prueba U de Mann-Whitney como alternativa no paramétrica.

Tabla 5. Fuentes de datos y parámetros registrados.

Fuente de datos	Variables principales	Frecuencia
Dinamómetro Bapro BPA-2R-HP	Torque, potencia, velocidad del vehículo	1 Hz
Analizador BrainBee AGS-688	CO, HC, NOx	1 Hz
OBD-II (OBD Fusion + ELM327)	RPM, velocidad, carga del motor, temp. refrigerante	1 Hz
Probeta graduada (manual)	Volumen de combustible consumido por ciclo	1 lectura/ciclo

Gracias a esta combinación de sincronización cuidadosa y depuración rigurosa, fue posible integrar de forma coherente señales provenientes de múltiples fuentes, reduciendo errores sistemáticos y dándole más solidez estadística a la comparación entre combustibles.

RESULTADOS

La Figura 2 muestra una distribución de probabilidad velocidad-aceleración (SAPD) que resume con qué frecuencia se dio cada combinación de velocidad y aceleración a lo largo del ciclo IM240, dando así una idea global de las condiciones de operación durante las pruebas (30).

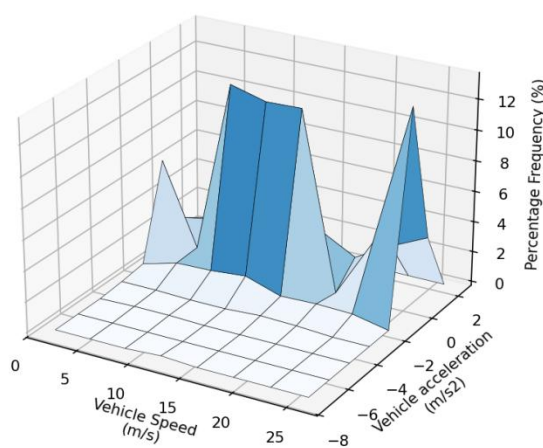


Figura 2. Distribución porcentual de frecuencia de operación del vehículo en función de la velocidad (m/s) y la aceleración (m/s²) durante el ciclo IM240.

La velocidad del vehículo se movió entre 0 y 30 m/s aproximadamente, y la mayoría de los puntos se concentró entre 10 y 20 m/s, algo típico del manejo urbano y suburbano. La aceleración osciló entre -3.5 y 3.5 m/s², con un predominio claro cerca de 0 m/s², así que casi todo el tiempo el vehículo iba a velocidad estable o con cambios suaves de aceleración y desaceleración (31). La combinación más frecuente de velocidad-aceleración llegó a ocupar cerca del 13% del tiempo total del ciclo, concentrada en velocidades medias (10-20 m/s) con aceleración prácticamente nula es decir, la mayor parte del recorrido se dio en crucero o con variaciones suaves de velocidad (32). Todo esto confirma que el vehículo pasó por un rango amplio de condiciones reales de conducción, lo cual le da solidez al diseño experimental a la hora de analizar cómo afecta el octanaje al consumo y a las emisiones bajo distintas cargas.

Sobre las emisiones contaminantes, medidas en gramos totales por prueba (sin normalizar por distancia): la prueba t aplicada al monóxido de carbono (CO) arrojó una diferencia muy significativa entre octanajes ($p < 0.001$), con menores emisiones promedio para el combustible de 92 octanos (0.036 g frente a 0.051 g con 87 octanos, una reducción del 28.4%), algo que confirmó también la prueba U de Mann-Whitney ($p < 0.001$). En hidrocarburos (HC) pasó algo parecido —el de 92 octanos volvió a salir más bajo (0.000172 g frente a 0.000194 g, -11.1%)—,

aunque aquí la significancia solo se sostuvo con la prueba t ($p = 0.017$) y no con Mann-Whitney ($p = 0.780$), por lo que la tendencia es real pero más débil. Con los óxidos de nitrógeno (NO) el patrón se invierte: las emisiones promedio fueron mayores con 92 octanos (0.000521 g frente a 0.000477 g, +9.2%), sin significancia en la prueba t ($p = 0.279$) pero sí con Mann-Whitney ($p = 0.028$), lo que apunta a un efecto presente, aunque moderado.

Tabla 6. Estadística inferencial de las emisiones contaminantes (g).

Condición	n87	n92	Media 87	Media 92	df	t (p)	U (p)	d	IC95% dif.
CO (g)	658	683	0.0509	0.0364	1225	5.08 (0.000)	257294 (0.000)	0.28	(-0.02, -0.00886)
HC (g)	678	696	1.94e-04	1.72e-04	1244	2.39 (0.017)	233886 (0.780)	0.13	(-3.93e-05, -3.90e-06)
NO (g)	631	653	4.77e-04	5.21e-04	1282	-1.08 (0.279)	220598 (0.028)	-0.06	(-3.57e-05, 1.24e-04)

El consumo de combustible se evaluó por condición de operación con una prueba t para muestras independientes y con la U de Mann-Whitney. En baja potencia (0-16.6 kW), el de 92 octanos consumió notablemente más 10.10 l/100km frente a 8.99 l/100km con 87 octanos (+12.3%), con $p < 0.001$ (t) y $p = 0.001$ (Mann-Whitney). En aceleración alta el resultado se invierte: ahí el de 92 octanos consumió significativamente menos (31.12 frente a 37.88 l/100km, -17.8%), también con buen respaldo estadístico ($p = 0.013$ t, $p = 0.003$ Mann-Whitney). En desaceleración, en cambio, los dos combustibles dieron prácticamente el mismo resultado (7.88 l/100km, $p = 0.985$), y ni en potencia media, ni en potencia alta, ni en aceleración baja las diferencias llegaron a ser significativas ($p > 0.05$ en todos los casos), aunque se nota una tendencia leve hacia mayor consumo con 92 octanos. La Figura 3 resume todo esto en un diagrama de cajas.

Tabla 7. Estadística inferencial del consumo de combustible (L/100km) por condición de conducción.

Condición	n87	n92	Media 87	Media 92	df	t (p)	U (p)	d	IC95% dif.
Potencia baja	409	399	8.99	10.1	799	-3.93 (0.000)	70919 (0.001)	-0.28	(0.552, 1.65)
Potencia media	189	182	13.1	14	345	-1.93 (0.054)	15931 (0.220)	0.20	(-0.014, 1.85)
Potencia alta	54	49	18.2	19.7	86	-1.77 (0.081)	1072 (0.098)	0.35	(-0.161, 3.1)
Desaceleración	276	256	7.88	7.88	522	0.02 (0.985)	34813 (0.771)	0.00	(-0.53, 0.52)
Acel. baja	346	361	13.9	13.9	705	-0.13 (0.894)	62855 (0.882)	-0.01	(-0.499, 0.571)
Acel. alta	29	24	37.9	31.1	51	2.56 (0.013)	516 (0.003)	0.69	(-11.9, -1.59)

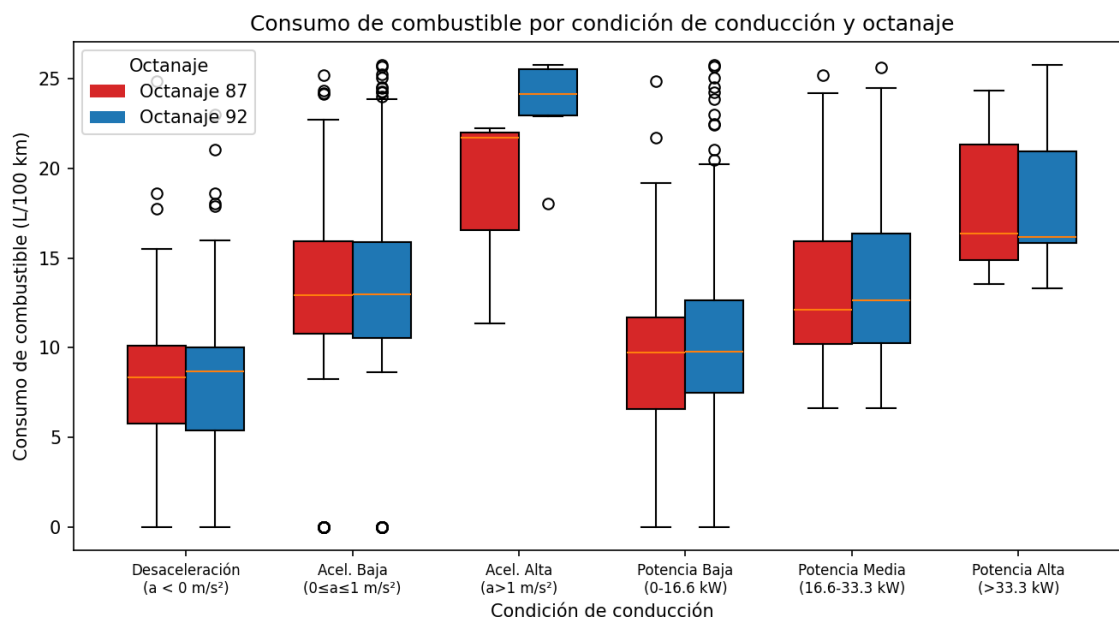


Figura 3. Consumo de combustible según el nivel de octanaje y la condición de conducción.

Para mirar más de cerca la variabilidad de los datos se construyó un perfil temporal suavizado (media móvil de tres puntos) sobre una prueba representativa de cada octanaje. En la Figura 4 se ve que ambos combustibles siguen de cerca el perfil de velocidad del ciclo IM240, con picos de consumo que coinciden en los tramos de aceleración fuerte; no hay una ventaja sistemática de uno sobre el otro a lo largo del tiempo, lo cual encaja con la falta de diferencias significativas en varias de las condiciones de conducción analizadas.

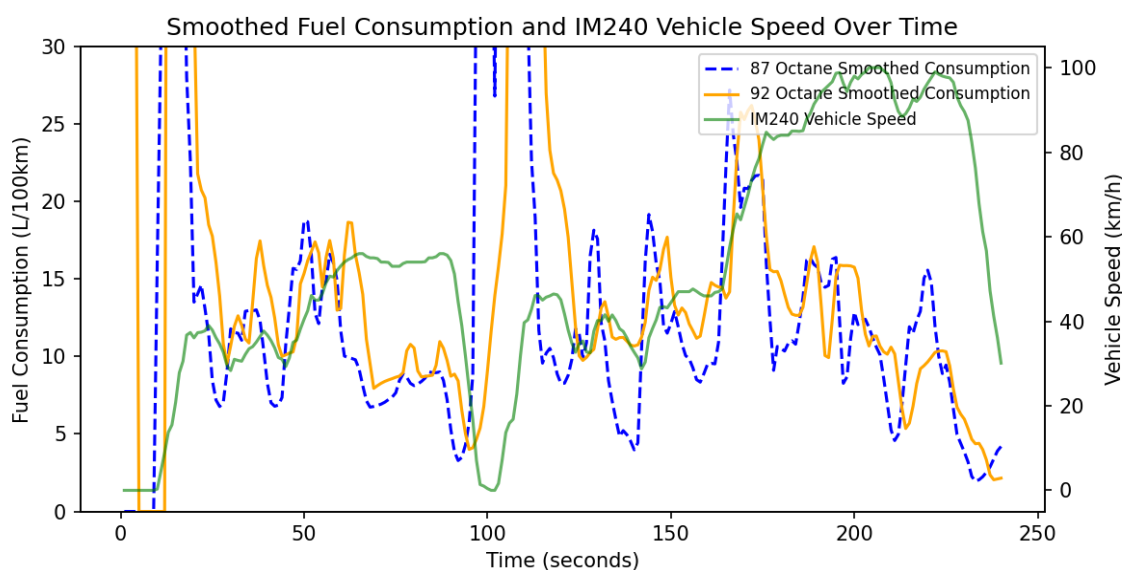


Figura 4. Consumo de combustible suavizado (L/100 km) en función del tiempo para gasolina de 87 y 92 octanos durante el ciclo IM240.

Con 92 octanos la mediana de CO baja y la dispersión de los datos también se reduce un poco, como se ve en la Figura 5.

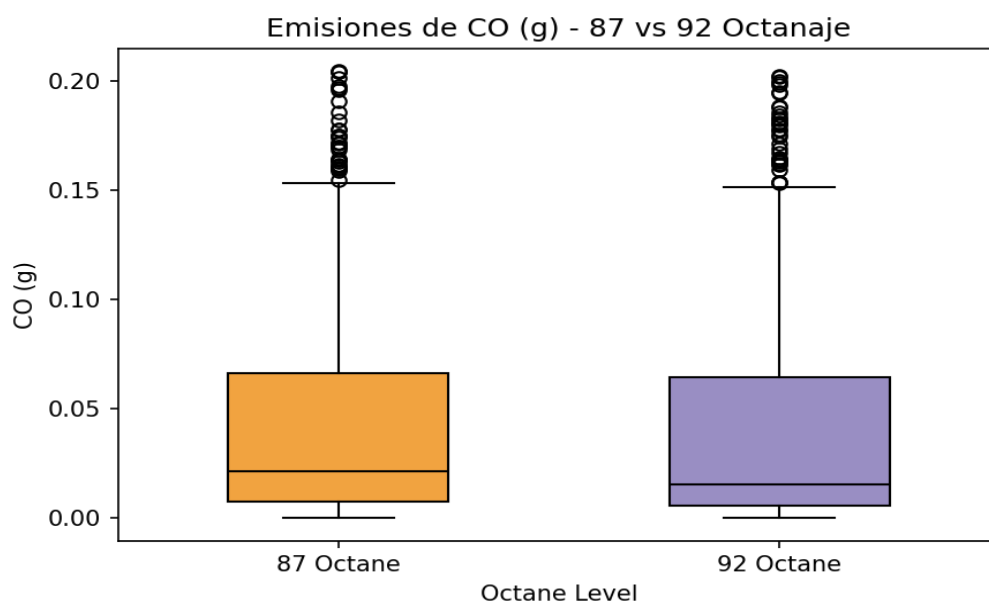


Figura 5. Diagrama de caja de las emisiones de CO (g) para gasolina de 87 y 92 octanos.

En el caso del HC ocurre algo similar al CO: la Figura 6 muestra una mediana y una dispersión levemente menores con el combustible de 92 octanos, aunque la diferencia es estadísticamente más débil que en el CO.

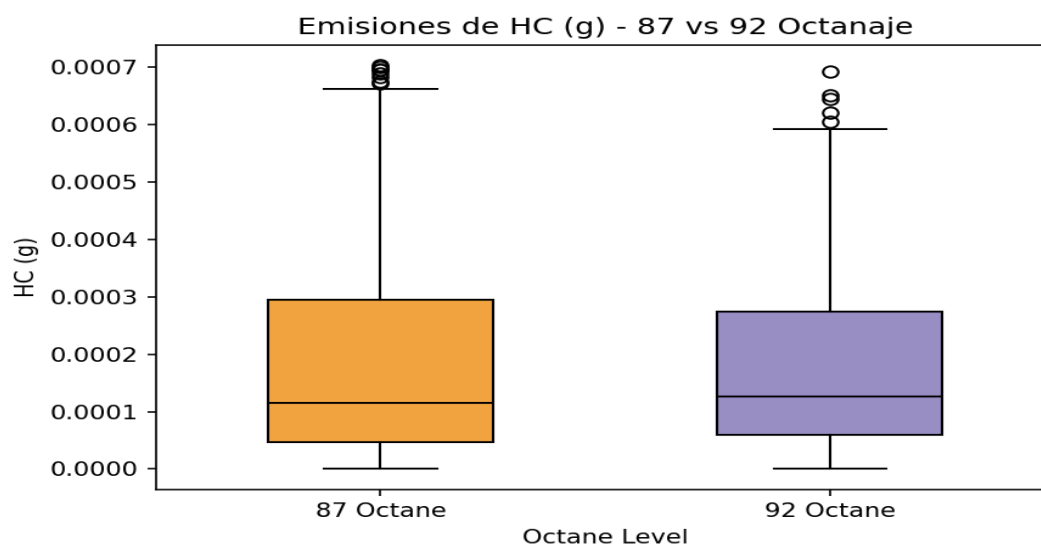


Figura 6. Diagrama de caja de las emisiones de HC (g) para gasolina de 87 y 92 octanos.

Con el NO ocurre lo opuesto: la Figura 7 muestra una mediana ligeramente mayor con el combustible de 92 octanos, aunque con bastante dispersión y solapamiento entre ambos grupos.

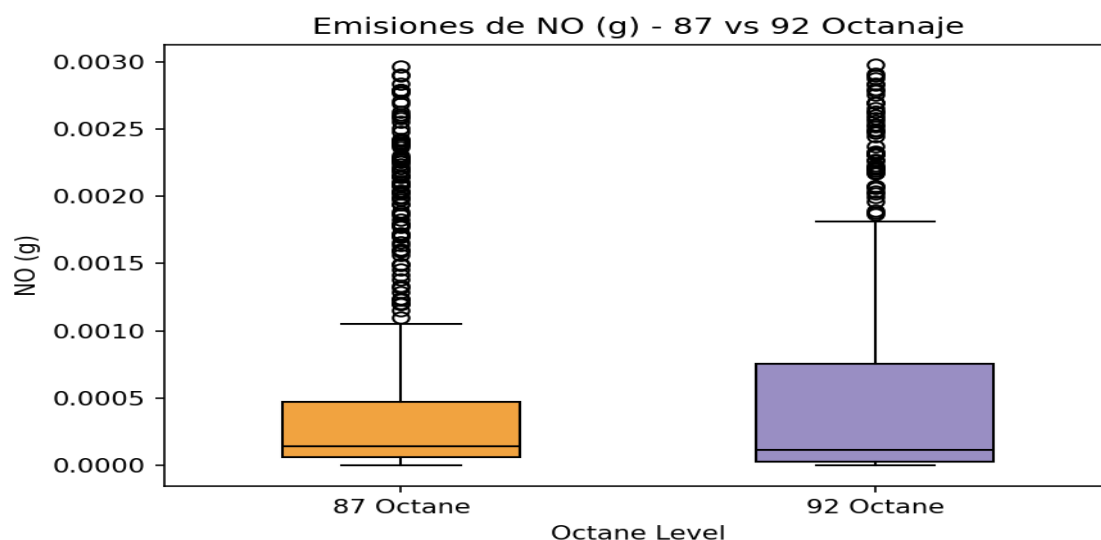


Figura 7. Diagrama de caja de las emisiones de NO (g) para gasolina de 87 y 92 octanos.

La Figura 8 entra en el detalle dinámico de las emisiones a lo largo del ciclo IM240, en gramos instantáneos (no por distancia). Ahí se ven picos de CO bastante más marcados con 87 octanos, sobre todo entre los 170 y 230 segundos del ciclo, justo en los tramos de aceleración fuerte; los perfiles de HC y NO, en cambio, se mantienen relativamente bajos y parecidos entre ambos combustibles, y los picos puntuales de NO no muestran un patrón claro a favor de uno u otro octanaje.

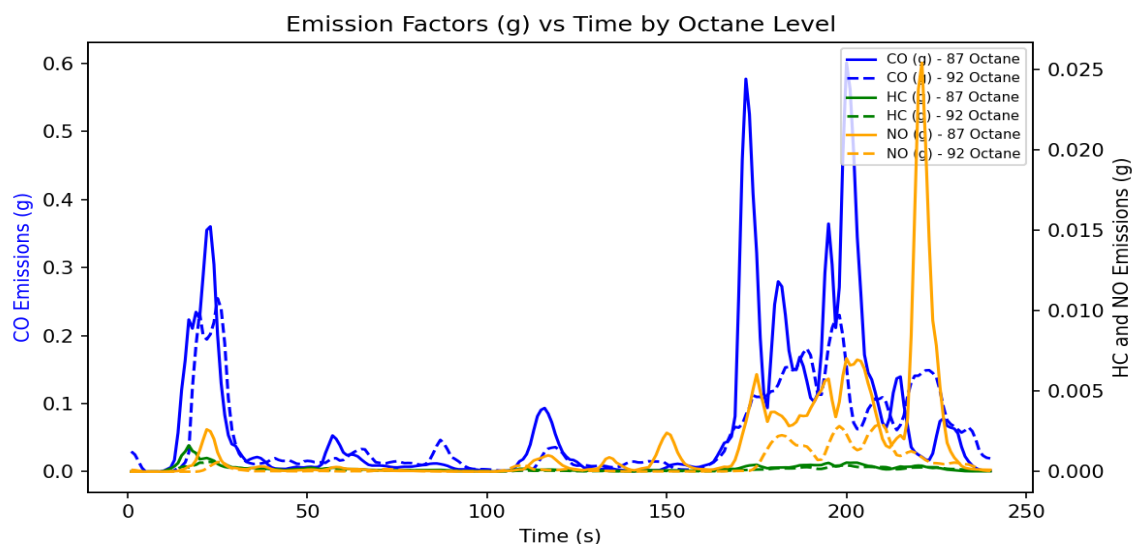


Figura 8. Perfiles de emisión de CO, HC y NO (g) en función del tiempo durante el ciclo IM240, para los combustibles de 87 y 92 octanos.

La Figura 9 resume el panorama general: con el combustible de mayor octanaje, el CO baja de forma considerable y el HC muestra una reducción más modesta, mientras que el NO presenta un ligero incremento, aunque de menor magnitud que las reducciones observadas en CO y HC.

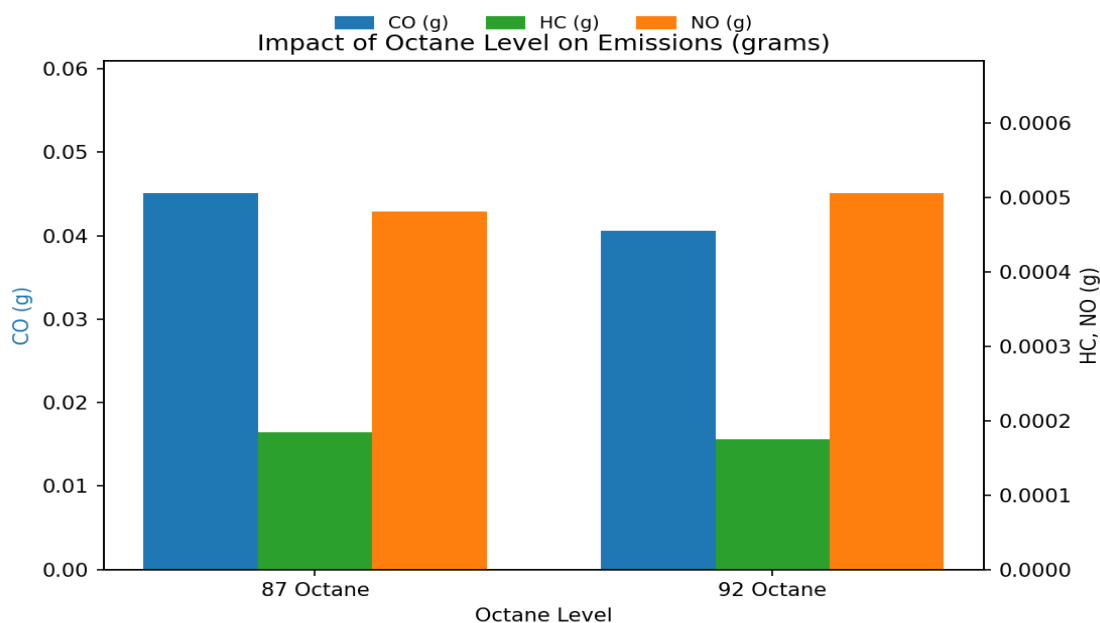


Figura 9. Comparación de las emisiones promedio de CO, HC y NO (g) entre gasolina de 87 y 92 octanos.

El torque y la potencia, vistos en función de las RPM, se comportaron de manera mucho más irregular que el consumo y las emisiones: las curvas se cruzan una y otra vez entre los 600 y los 4000 rpm (Figura 10). En promedio, el torque fue de 58.9 Nm con 87 octanos frente a 57.2 Nm con 92, y la potencia de 15.0 kW frente a 14.9 kW; ninguna de esas dos diferencias resultó significativa (torque: $p = 0.221$ t-test, $p = 0.485$ Mann-Whitney; potencia: $p = 0.826$ t-test, $p = 0.985$ Mann-Whitney). Dicho de otro modo, a diferencia de lo que pasó con el consumo y las emisiones, aquí el octanaje no dejó una huella sistemática sobre el desempeño mecánico del motor, al menos en las condiciones de este ensayo.

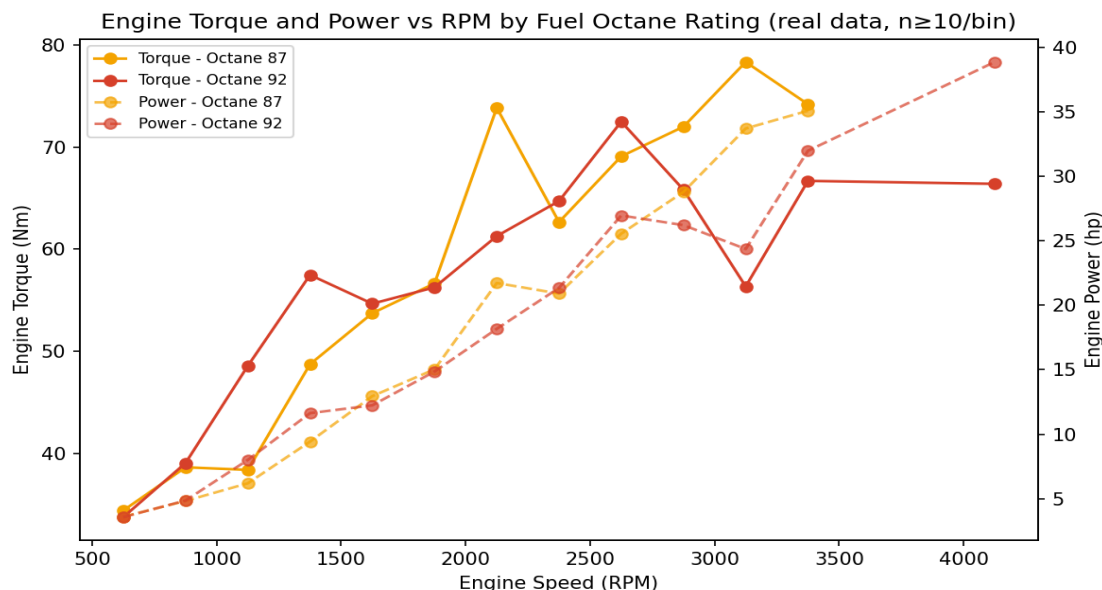


Figura 10. Torque (Nm) y potencia (hp) del motor en función de la velocidad de giro (RPM) para los combustibles de 87 y 92 octanos.

DISCUSIÓN

Estos resultados confirman, primero que nada, que subir el octanaje ayuda a una combustión más completa de CO: con 92 octanos las emisiones de este contaminante bajan un 28.4% ($p < 0.001$ en ambas pruebas estadísticas). El HC siguió una tendencia parecida, aunque más débil (-11.1%, significativa solo con la prueba t), mientras que el NO se comportó distinto: subió un 9.2% con 92 octanos, y aquí solo la prueba no paramétrica de Mann-Whitney respaldó la diferencia ($p = 0.028$). Este patrón CO y HC más bajos, NO un poco más alto concuerda en parte con los principios termodinámicos que vinculan mayores temperaturas y presiones de combustión, favorecidas por la resistencia al knock, con la formación de NOx (7). Pero que HC y NO no tengan respaldo robusto en las dos pruebas a la vez sugiere que, en este ensayo, el octanaje pesa menos y de forma más variable sobre estos dos contaminantes que sobre el CO.

Que el HC baje con 92 octanos llama la atención, porque su mayor contenido de aromáticos pesados haría pensar lo contrario. La explicación probable está en el balance entre dos efectos que tiran en direcciones opuestas: por un lado, esos aromáticos tienen una cinética de evaporación más lenta, lo que tendería a dejar más HC sin quemar (19), (20); por otro, la mayor resistencia al knock del combustible de 92 octanos permite una combustión en general más estable y completa, y en este motor de aspiración natural parece que este segundo efecto termina ganando. Con el NO la historia es distinta: su comportamiento sí cuadra con un ligero aumento de la temperatura de combustión asociado a una mezcla más resistente al autoencendido, aunque la significancia estadística limitada sugiere que aquí el efecto es más chico que el que reporta parte de la literatura en motores de mayor cilindrada o relación de compresión (7).

El consumo de combustible siguió un patrón que cambia según la condición de manejo, y vale la pena detenerse en eso. En baja potencia, el de 92 octanos consumió un 12.3% más que el de 87 ($p < 0.001$) algo que coincide con estudios que advierten que pasarse de octanaje no siempre se traduce en ahorro, y a veces incluso lo perjudica, cuando el motor no está calibrado para aprovechar esa resistencia al knock (14), (15). En aceleración alta pasó justo lo contrario: ahí el de 92 octanos redujo el consumo en un 17.8% ($p = 0.013$), lo que sugiere que su ventaja se concentra en los momentos de mayor demanda instantánea de combustible, donde esa resistencia al autoencendido sí permite una combustión más eficiente bajo carga. En desaceleración no hubo ninguna diferencia ($p = 0.985$), y en potencia media, potencia alta y aceleración baja tampoco resultaron significativas, aunque se mantuvo una tendencia leve hacia mayor consumo con 92 octanos.

Este patrón mixto más consumo en baja potencia, menos en aceleración alta, sin diferencia en desaceleración calza con la idea de que el motor MPI de aspiración natural usado aquí, representativo del parque vehicular urbano ecuatoriano, no está calibrado específicamente para sacarle provecho a la mayor resistencia al knock del combustible de 92 octanos en todo el rango de operación, a diferencia de los motores turboalimentados con control electrónico avanzado, donde sí se han reportado ahorros consistentes al subir el octanaje (5), (13). A 3000 msnm, además, la menor densidad del aire y la consecuente caída en la eficiencia volumétrica podrían estar amplificando esta heterogeneidad, ya que el motor opera en una zona donde la relación aire-combustible y la dinámica de la combustión ya vienen alteradas de entrada por la altitud (2), (3).

A diferencia de lo que pasa con el consumo y las emisiones, donde sí aparecen diferencias puntuales significativas, el desempeño mecánico no mostró ninguna ventaja consistente de un combustible sobre el otro: ni el torque promedio (58.9 Nm con 87 octanos frente a 57.2 Nm con 92) ni la potencia promedio (15.0 kW frente a 14.9 kW) llegaron a ser estadísticamente significativos ($p > 0.2$ en ambos casos, con las dos pruebas). Esto contrasta con estudios que sí reportan mejoras de potencia y torque al subir el octanaje en motores modernos de inyección directa o turboalimentados (8), (13), y apunta a que en un motor MPI de aspiración natural como el de este estudio, la mayor resistencia al knock del combustible de 92 octanos no se traduce automáticamente en una ventaja mecánica medible al menos no bajo la altitud y el rango de operación que cubre el ciclo IM240.

Si algo queda claro con todo esto es que no hay un octanaje "óptimo" único para regiones de gran altitud: lo que manda es la condición de conducción específica, más que el tipo de combustible visto de forma aislada. Para alguien que maneja en ciudades andinas como Riobamba, Quito o Cuenca, donde predomina la baja potencia y la desaceleración frecuente, el de 87 octanos podría resultar más económico sin perder desempeño; el de 92, en cambio, se nota más cuando hay aceleración fuerte, donde su menor consumo y sus menores emisiones de CO se hacen evidentes. Estos hallazgos, sumados a la correlación positiva y significativa que hay entre la potencia instantánea del motor y las emisiones de CO ($r = 0.42$, $p < 0.001$), pueden servir de insumo para políticas de combustibles y estrategias de gestión de emisiones en países de topografía montañosa como Ecuador (14).

CONCLUSIONES

Este trabajo deja claro que el octanaje del combustible sí influye, de forma medible, en el consumo y en las emisiones contaminantes pero de manera específica según la condición de conducción, sin que eso se traduzca en una ventaja mecánica generalizada en torque o potencia. Las pruebas se hicieron en Riobamba, a unos 3000 metros sobre el nivel del mar, así que ya incorporan las condiciones reales de gran altitud que afectan la dinámica de la combustión, y eso es justamente lo que le da relevancia a estos resultados para las regiones andinas.

Con gasolina de 92 octanos, las emisiones de monóxido de carbono (CO) bajaron en promedio un 28.4% respecto al combustible de 87 octanos ($p < 0.001$) señal de una combustión más completa. Las de hidrocarburos no quemados (HC) también bajaron, aunque menos (-11.1%) y con un respaldo estadístico más débil, mientras que los óxidos de nitrógeno (NO) subieron de forma moderada (+9.2%), algo que solo se sostuvo con la prueba no paramétrica de Mann-Whitney. En conjunto, el balance de emisiones terminó favoreciendo, aunque sea levemente, al combustible de 92 octanos.

El consumo de combustible se comportó de forma distinta según la condición de manejo: subió de forma significativa con 92 octanos en baja potencia (+12.3%, $p < 0.001$), pero bajó, también de forma significativa, en aceleración alta (-17.8%, $p = 0.013$); en desaceleración no hubo ninguna diferencia ($p = 0.985$), y en potencia media, potencia alta y aceleración baja tampoco se encontró nada estadísticamente significativo. Esto deja ver que la ventaja de uno u otro combustible en consumo depende mucho del tipo de exigencia que enfrenta el motor en cada momento, y que no tiene sentido generalizar a partir de una sola condición de manejo.

En cuanto al desempeño mecánico, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ni en torque ni en potencia entre los dos octanajes ($p > 0.2$ en ambos casos), lo que sugiere que, en este motor de aspiración natural y bajo las condiciones de altitud evaluadas, el octanaje del combustible no se tradujo en una ventaja mecánica que se pueda medir.

El estudio se limitó a un solo vehículo (Hyundai Grand i10, motor de 1.2 L), pero como es un modelo bastante común en entornos urbanos y de altura en Ecuador, sus hallazgos siguen siendo relevantes más allá del caso particular. En definitiva, lo que muestran estos resultados es que el efecto del octanaje sobre el consumo y las emisiones depende de cada condición de conducción, sin que haya una ventaja mecánica generalizada de un combustible sobre el otro y eso aporta información técnica útil, aunque matizada, para optimizar el uso de combustibles y gestionar emisiones en entornos urbanos de gran altitud.

DECLARACIÓN DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés relacionados con este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Giraldo M, Restrepo JC, Huertas J, Agudelo JR, Agudelo AF. Signal synchronization methods when measuring tailpipe emissions with PEMS. *Transp Res Part D Transp Environ.* 2024;129:104154.
2. Stradling R, Williams J, Hamje H, Rickeard D. Effect of octane on performance, energy consumption and emissions of two Euro 4 passenger cars. *Transp Res Procedia.* 2016;14:3159-3168.
3. Zinser CM, Smith A, Haenel P. Impact of fuel octane quality on various advanced vehicle technologies. *SAE Tech Pap.* 2020;2020-01-0619.
4. Ling Z, et al. Impact of octane numbers on combustion performance and driving cycle fuel consumption of turbocharged direct-injection spark-ignition engine. *Fuel.* 2024;374:132287.
5. Teoh YH, How HG, Yu KH, Chuah HG, Yin WL. Influence of octane number rating on performance, emission and combustion characteristics in spark ignition engine. *J Adv Res Fluid Mech Therm Sci.* 2018;45(1):22-34.
6. Kan ZC, Lou DM, Cao ZZ, Hu ZY, Liu S, Yang ZH. Effects of altitude on combustion characteristic during cold start of heavy-duty diesel engine. *Int J Automot Technol.* 2017;18(2):209-217.
7. Leone TG, et al. The effect of compression ratio, fuel octane rating, and ethanol content on spark-ignition engine efficiency. *Environ Sci Technol.* 2015;49(18):10778-10789.
8. Zhang K, Frey HC. Road grade estimation for on-road vehicle emissions modeling using light detection and ranging data. *J Air Waste Manag Assoc.* 2006;56(6):777-788.
9. Lemazurier L, et al. Impact of advanced engine and powertrain technologies on engine operation and fuel consumption for future vehicles. *SAE Tech Pap.* 2015;2015-01-0978.
10. Hernandez M, Menchaca L, Mendoza A. Fuel economy and emissions of light-duty vehicles fueled with ethanol-gasoline blends in a Mexican city. *Renew Energy.* 2014;72:236-242.
11. Huertas JI, Díaz J, Cordero D, Cedillo K. A new methodology to determine typical driving cycles for the design of vehicles power trains. *Int J Interact Des Manuf.* 2018;12(1):319-326.
12. García A, Monsalve-Serrano J, Villalta D, Sari R. Fuel sensitivity effects on dual-mode dual-fuel combustion operation for different octane numbers. *Energy Convers Manag.* 2019;201:112137.
13. Rodríguez-Fernández J, Ramos Á, Barba J, Cárdenas D, Delgado J. Improving fuel economy and engine performance through gasoline fuel octane rating. *Energies.* 2020;13(13):3499.
14. Sayin C, Kilicaslan I, Canakci M, Ozsezen N. An experimental study of the effect of octane number higher than engine requirement on the engine performance and emissions. *Appl Therm Eng.* 2005;25(8-9):1315-1324.
15. Alahmer A, Aladayleh W. Effect two grades of octane numbers on the performance, exhaust and acoustic emissions of spark ignition engine. *Fuel.* 2016;180:80-89.
16. García A, Monsalve-Serrano J, Villalta D, Sari R. Octane number influence on combustion and performance parameters in a dual-mode dual-fuel engine. *Fuel.* 2019;258:116140.
17. Wang H, Zhu H, Ma T, Yao M. Numerical investigation on low octane gasoline-like fuel compression ignition combustion at high load. *Fuel.* 2020;270:117532.

18. Song H, Kim HJ. Effects of knocking on the performance and emissions of a single cylinder SI engine fueled with a fuel blend of iso-octane and aromatic hydrocarbons. *Fuel*. 2020;279:118464.
19. Ahmed A, et al. Compositional effects of gasoline fuels on combustion, performance and emissions in engine. *SAE Int J Fuels Lubr*. 2016;9(3):460-468.
20. Amaral LV, Santos NDSA, Roso VR, Sebastião RCO, Pujatti FJP. Effects of gasoline composition on engine performance, exhaust gases and operational costs. *Renew Sustain Energy Rev*. 2021;135:110196.
21. Radhouane M, Boubahri C, Jamel B. Reduction and thermodynamic treatment of NOx emissions in a spark ignition engine using isooctane and an oxygenated fuel (ethanol). *Int J Low-Carbon Technol*. 2023;18:1258-1266.
22. Gupta S, Kanchan S, Kaur R, Sandhu SS. Investigation of performance and emission characteristics using ethanol-blended gasoline fuel as a flex-fuel in two-wheeler vehicle mounted on a chassis dynamometer. *Clean Energy*. 2024;8(3):174-193.
23. Adamiak B, Andrych-Zalewska M, Merksiz J, Chłopek Z. The uniqueness of pollutant emission and fuel consumption test results for road vehicles tested on a chassis dynamometer. *Ekspluat Niezawodn*. 2025;27(1).
24. González-Oropeza R. Los ciclos de manejo, una herramienta útil si es dinámica para evaluar el consumo de combustible y las emisiones contaminantes del autotransporte. *Ing Investig Tecnol*. 2005;6(3):147-162.
25. Sakthivel P, Subramanian KA, Mathai R. Comparative studies on combustion, performance and emission characteristics of a two-wheeler with gasoline and 30% ethanol-gasoline blend using chassis dynamometer. *Appl Therm Eng*. 2019;146:726-737.
26. Herrera Correa SA, Gallego Montoya A, Lenis Rodas YA. Effect of isobutanol/gasoline blends on the performance and emissions of an Otto engine-powered vehicle operating on a driving cycle. *J Energy Resour Technol Part A Sustain Renew Energy*. 2025;1(2).
27. Di Russo M, Stutenberg K, Hall CM. Analysis of uncertainty impacts on emissions and fuel economy evaluation for chassis dynamometer testing. *IEEE Trans Veh Technol*. 2023;72(4):4236-4251.
28. Takeuchi H, Kawamura T, Ono N, Araki S. Synchronization of signals with sampling rate offset and missing data using dynamic programming matching. *APSIPA ASC 2024*. 2024.
29. Suarez J, Makridis M, Anesiadou A, Komnos D, Ciuffo B, Fontaras G. Benchmarking the driver acceleration impact on vehicle energy consumption and CO2 emissions. *Transp Res Part D Transp Environ*. 2022;107:103282.
30. Ghaffarpasand O, Pope FD. Telematics data for geospatial and temporal mapping of urban mobility: fuel consumption, and air pollutant and climate-forcing emissions of passenger cars. *Sci Total Environ*. 2023;894:164940.
31. Yang Y, Cao T, Xu S, Qian Y, Li Z. Influence of driving style on traffic flow fuel consumption and emissions based on the field data. *Phys A Stat Mech its Appl*. 2022;599:127520.