



Análisis del desempeño técnico, económico y ambiental de motocarros de combustión interna bajo condiciones reales de operación con respecto a vehículos convencionales para distribución de mercancías en la última milla para tres ciudades de Colombia.

Juan Pablo Salgado Ramírez

Código: 10452027422

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá D.C., Colombia

2022

Análisis del desempeño técnico, económico y ambiental de motocarros de combustión interna bajo condiciones reales de operación con respecto a vehículos convencionales para distribución de mercancías en la última milla para tres ciudades de Colombia.

Juan Pablo Salgado Ramírez

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Director:

I.M., M.Sc., Ph.D., Nicolás Giraldo Peralta

Co Director:

I.A., M.Sc., Ph.D., Daniel Fernando Prato Sanchez – LOGYCA INVESTIGACIÓN

Línea de Investigación:

Energía y ciencias térmicas.

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá D.C., Colombia

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado
titulado Análisis del desempeño técnico, económico y
ambiental de motocarros de combustión interna bajo
condiciones reales de operación con respecto a
vehículos convencionales para distribución de
mercancías en la última milla para tres ciudades de
Colombia.

Cumple con los
requisitos para optar al título de
Ingeniero Mecánico.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Bogotá, 2022.

Contenido

Preliminares.....	xvi
Resumen.....	17
Abstract.....	18
1 Objeto de estudio.....	19
1.2 Introducción	19
1.3 Antecedentes	21
1.4 Planteamiento del problema.....	26
1.5 Justificación	27
1.6 Objetivos	28
1.6.1 Objetivo general	28
1.6.2 Objetivos específicos.....	28
1.7 Alcance	29
1.8 Metodología	29
2 Marco teórico	31
2.1 Definición de logística	31
2.2 Distribución urbana de mercancías	33
2.3 Logística de última milla	34
2.4 Vehículos utilizados en el transporte de última milla.....	35
2.5 Definición de motocarro	36
2.6 Indicadores de eficiencia energética	37
2.7 Eficiencia energética en el reparto de última milla.....	38
2.8 Definición de factores de emisión.....	39

2.9	Definición de telemetría.....	40
2.10	Telemetría en el transporte de carga	41
2.11	Datos aportados por los sistemas de telemetría	43
3	Descripción de la prueba piloto	44
3.1	Lineamientos.....	45
3.2	Especificaciones técnicas, económicas y ambientales del vehículo motocarro....	45
3.3	Verificación de dispositivos de telemetría instalados	49
3.4	Sistemas de telemetría instalados.....	50
3.4.1	GPS Concox GTO6F.....	50
3.4.2	Sensor de combustible ultrasónico Concox USFSCX	51
3.4.3	Plataforma de visualización	52
3.5	Variables medidas	53
3.6	Variables construidas	54
3.7	Recolección de datos.....	54
3.7.1	Matriz de coordenadas	55
3.7.2	Matriz de nivel de combustible en el tanque.....	56
4	Procesamiento de datos	57
4.1	Agrupamiento de datos	57
4.2	Descripción de variables construidas.....	57
4.2.1	Altitud y pendiente	57
4.2.2	Distancia recorrida	59
4.2.3	Intervalo de tiempo.....	59
4.2.4	Velocidad	61

4.2.5	Consumo de combustible en el tanque	61
4.2.6	Rendimiento de combustible	62
5	Análisis de datos	63
5.1	Prueba piloto en la ciudad de Bucaramanga	63
5.1.1	Datos recolectados en prueba piloto Bucaramanga.....	63
5.1.2	Eficiencia energética del motocarro en Bucaramanga	66
5.1.3	Emisiones contaminantes generadas por el motocarro en Bucaramanga..	70
5.1.4	Costo de combustible durante operación en Bucaramanga.....	71
5.1.5	Consolidados de carga para el motocarro en Bucaramanga.....	72
5.1.6	Logística en prueba piloto Bucaramanga.	73
5.2	Prueba piloto en la ciudad de Medellín.....	76
5.2.1	Datos recolectados en prueba piloto Medellín	76
5.2.2	Eficiencia energética del motocarro en Medellín.....	78
5.2.3	Emisiones contaminantes generadas por el vehículo motocarro en Medellín.	82
5.2.4	Costo de combustible durante operación en Medellín	82
5.2.5	Consolidados de carga para el motocarro en Medellín.	83
5.2.6	Logística en prueba piloto Medellín.....	84
5.3	Prueba piloto en la ciudad de Bogotá	87
5.3.1	Datos recolectados en prueba piloto Bogotá.....	87
5.3.2	Eficiencia energética del motocarro en Bogotá.....	89
5.3.3	Emisiones contaminantes generadas por el vehículo motocarro en Bogotá.	

5.3.4	Costo de combustible durante operación en Bogotá	93
5.3.5	Logística en prueba piloto Bogotá.	94
6	Descripción del vehículo de línea base utilizado en cada Ciudad.....	95
6.1	Empresa 1-Bucaramanga	95
6.2	Empresa 2-Medellín.....	96
6.3	Empresa 3- Bogotá.....	98
6.4	Factores de emisión de vehículos línea base.....	99
6.5	Emisiones contaminantes generadas por vehículos de línea base	101
6.6	Eficiencia Energética de vehículos de línea base	102
6.7	Costos de combustible en vehículos de línea base.....	104
6.8	Consolidados de carga de vehículos de línea base.....	105
6.9	Costos de vehículos de línea base.....	107
7	Análisis comparativo	107
7.1	Comparativo de Motocarro y vehículo de línea base empresa 1.	107
7.1.1	Desempeño técnico	107
7.1.2	Desempeño económico	111
7.1.3	Desempeño ambiental empresa 1.....	112
7.1.4	Análisis conjunto para vehículos en empresa 1.	113
7.2	Comparativo de Motocarro y vehículo de línea base empresa 2.	114
7.2.1	Desempeño económico	114
7.2.2	Desempeño técnico	115
7.2.3	Desempeño ambiental empresa 2.....	118
7.2.4	Análisis conjunto para vehículos en empresa 2.	119

7.3	Comparativo de Motocarro y vehículo de línea base empresa 3.	120
7.3.1	Desempeño técnico	120
7.3.2	Desempeño económico	123
7.3.3	Desempeño ambiental empresa 3.....	123
7.3.4	Análisis conjunto para vehículos en empresa 3.	124
7.4	Comparativo entre la operación de motocarros de las 3 empresas.	124
7.4.1	Comparativo de promedio de entregas por hora entre empresa 1 y empresa 2.	124
7.4.2	Comparativo de altitud y rendimiento de combustible.	125
7.4.3	Análisis de modelo de regresión lineal múltiple	125
7.4.4	Comparativo de emisiones generados en las 3 ciudades.....	130
Conclusiones		131
Recomendaciones		134
Referencias Bibliográficas.....		136

Lista de figuras

Figura 1-1. Demanda de electricidad	19
Figura 1-2. Prueba de potencia y torque con gasolina y gas natural.....	22
Figura 2-1. Características de las opciones de movilidad.....	32
Figura 2-2. Tipos de vehículos utilizados para operaciones logísticas.	36
Figura 2-3. Características físicas del Motocarro	37
Figura 2-4. Enlace sensores-ECU-centros de datos.....	42
Figura 2-5. Equipos de monitoreo.	44
Figura 3-1. Fotografía del vehículo motocarro.	49
Figura 3-2. Localizador de vehículo GPS compacto GT06F.....	50
Figura 3-3. Sensor de combustible ultrasónico USFSCX.....	51
Figura 3-4. Interfaz de usuario VisualSat.	53
Figura 3-5. Matriz reportada de coordenadas.	55
Figura 3-6. Matriz reportada de nivel de combustible en el tanque.....	56
Figura 4-1. Interfaz GPS Visualizer.....	58
Figura 4-2. Calculo del intervalo de tiempo.	60
Figura 4-3. Modificación a intervalo de tiempo en horas.	60
Figura 4-4. Consumos de combustible negativos y mayores a 1 litro.	62
Figura 4-5. Valores de distancias por día.....	63
Figura 5-1. Matriz final de datos Bucaramanga.....	64
Figura 5-2. Nivel de combustible en el tanque vs distancia acumulada, motocarro Bucaramanga.	65

Figura 5-3. Distancia acumulada y consumo de combustible acumulado vs tiempo, motocarro Bucaramanga.....	66
Figura 5-4. Esquema del diagrama de caja.	68
Figura 5-5. Campos calculados para el diagrama de cajas Bucaramanga.	68
Figura 5-6. Diagrama de cajas para rendimiento de combustible en Bucaramanga.	69
Figura 5-7. Altitud vs tiempo de operación durante 5 días, empresa 1.	74
Figura 5-8. Georreferenciación de puntos de distribución en Bucaramanga.	75
Figura 5-9. Matriz final de datos Medellín.	76
Figura 5-10. Nivel de combustible en el tanque vs distancia acumulada, motocarro Medellín. ..	77
Figura 5-11. Distancia acumulada y consumo de combustible acumulado vs tiempo, motocarro Medellín.	78
Figura 5-12. Campos calculados para el diagrama de cajas Medellín.	80
Figura 5-13. Diagrama de cajas para rendimiento de combustible en Medellín.	80
Figura 5-14. Altitud vs tiempo de operación durante 3 días, empresa 2.	85
Figura 5-15. Georreferenciación de puntos de distribución en Medellín.	86
Figura 5-16. Matriz final de datos Bogotá.	87
Figura 5-17. Nivel de combustible en el tanque vs distancia acumulada, motocarro Bogotá.	88
Figura 5-18. Distancia acumulada y consumo de combustible acumulado vs tiempo, motocarro Bogotá.	89
Figura 5-19. Campos calculados para el diagrama de cajas Bogotá.	91
Figura 5-20. Diagrama de cajas para rendimiento de combustible en Bogotá.	91
Figura 5-21. Georreferenciación de puntos de distribución en Bogotá.	94
Figura 6-1. Especificaciones técnicas Changan MD201 Cargo Box.	95

Figura 6-2. Changan MD201 Cargo Box.....	96
Figura 6-3. Especificaciones técnicas de camión Chevrolet NPR.....	97
Figura 6-4. Camión Chevrolet NPR.....	97
Figura 6-5. Especificaciones técnicas de triciclo eléctrico de carga.....	98
Figura 6-6. Triciclo eléctrico HUAIHAI H5.	99
Figura 7-1. Comparación de características técnicas de vehículos en empresa 1.....	111
Figura 7-2. Comparación de características técnicas de vehículos en empresa 2.....	118
Figura 7-3. Comparación de características técnicas de vehículos en empresa 3.....	122
Figura 7-4. Altitud promedio vs rendimiento promedio en las 3 ciudades de operación.	125
Figura 7-5. Resumen de regresión lineal múltiple.	128

Lista de tablas

Tabla 1-1. Valores máximos y mínimos de torque y potencia para motocarro a gasolina.	23
Tabla 3-1. Especificaciones técnicas del motocarro.	46
Tabla 3-2. Comparativo de factores de emisión de diferentes autores con respecto a la estimación en Soledad (CBD: Central Business District; STDC: Surat three wheeler auto-rickshaw driving cycle; IDC: Indian Driving Cycle).....	48
Tabla 3-3. Especificaciones técnicas de GPS GT06F.....	50
Tabla 3-4. Especificaciones técnicas del sensor de combustible ultrasónico USFSCX.	52
Tabla 5-1. Datos recolectados en Bucaramanga.	63
Tabla 5-2. Matriz final de datos en Bucaramanga.	64
Tabla 5-3. Rendimiento de motocarro Bucaramanga.	67
Tabla 5-4. Intervalo de confianza de rendimiento de combustible en motocarro Bucaramanga..	70

Tabla 5-5. Emisiones generadas por motocarro en Bucaramanga.	70
Tabla 5-6. Precio para 1 litro de combustible en cada ciudad.	71
Tabla 5-7. Consolidado de carga motocarro Bucaramanga.	72
Tabla 5-8. Totales y medias de consolidados de motocarro empresa 1.	73
Tabla 5-9. Datos recolectados en Medellín.	76
Tabla 5-10. Matriz final de datos en Medellín.	77
Tabla 5-11. Rendimiento de motocarro Medellín.	79
Tabla 5-12. Intervalo de confianza de rendimiento de combustible en motocarro Medellín.	81
Tabla 5-13. Emisiones generadas por motocarro en Medellín.	82
Tabla 5-14. Consolidado de carga motocarro Medellín.	83
Tabla 5-15. Totales y medias de consolidados de motocarro empresa 2.	84
Tabla 5-16. Datos recolectados en Bogotá.	87
Tabla 5-17. Matriz final de datos en Bogotá.	88
Tabla 5-18. Rendimiento de motocarro Bogotá.	90
Tabla 5-19. Intervalo de confianza de rendimiento de combustible en motocarro Bogotá.	92
Tabla 5-20. Emisiones generadas por motocarro en Bogotá.	93
Tabla 6-1. Factores de para vehículos de línea base.	100
Tabla 6-2. Emisiones generadas por vehículos de línea base.	102
Tabla 6-3. Eficiencia energética vehículos línea base.	103
Tabla 6-4. Costo total de combustible en vehículos de línea base.	104
Tabla 6-5. Consolidado de carga línea base empresa 1.	105
Tabla 6-6. Consolidado de carga línea base empresa 2.	106
Tabla 6-7. Totales y medias de consolidados de empresa 1 y 2.	106

Tabla 6-8. Valores comerciales de vehículos línea base en COP.	107
Tabla 7-1. Comparación de características técnicas de vehículos en empresa 1.	107
Tabla 7-2. Comparación de valores comerciales de vehículos empresa 1.	112
Tabla 7-3. Comparación de costo del combustible consumido de vehículos empresa 1.	112
Tabla 7-4. Comparativo de emisiones contaminantes generadas empresa 1.	113
Tabla 7-5. Comparación de valores comerciales de vehículos empresa 2.	114
Tabla 7-6. Comparación de costo del combustible consumido de vehículos empresa 2.	114
Tabla 7-7. Comparación de características técnicas de vehículos en empresa 2.	115
Tabla 7-8. Comparativo de emisiones contaminantes generadas empresa 2.	119
Tabla 7-9. Comparación de características técnicas de vehículos en empresa 3.	120
Tabla 7-10. Comparación de valores comerciales de vehículos empresa 3.	123
Tabla 7-11. Comparación de costo del combustible consumido de vehículos empresa 3.	123
Tabla 7-12. Comparativo de emisiones contaminantes generadas empresa 3.	124
Tabla 7-13. Entregas por hora en empresa 1 y 2.	124
Tabla 7-14. Variable dependiente y variables independientes de la regresión lineal múltiple. ...	126
Tabla 7-15. Regresión lineal múltiple para cada ciudad.	129
Tabla 7-16. Emisiones generadas por motocarro en cada ciudad.	130

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
Ah	Amperio hora	Ah	Carga eléctrica
cm	Centímetro	cm	Longitud
cm ³	Centímetros cúbicos	cm ³	Volumen
d	Distancia	d	Longitud
g	Gramos	g	Masa
gal	Galón	gal	Volumen
h	Hora	h	Tiempo
kg	Kilogramo	kg	Masa
km	Kilómetro	km	Longitud
kWh	Kilovatio hora	kWh	Energía
L	Litro	L	Volumen
m	minuto	m	Tiempo
m ³	Centímetros cúbicos	m ³	Volumen
mm	Milímetro	mm	Longitud
msnm	Metros sobre nivel del mar	msnm	Longitud
Nm	Newton metro	Nm	Esfuerzo de torsión
s	Segundo	s	Tiempo
V	Voltios	V	Voltaje

Subíndices

Subíndices	Término
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
NO _x	Óxidos de Nitrógeno
Prom	Promedio
SO ₂	Dióxido de Azufre

Abreviaturas

Abreviatura	Término
API	Application Programming Interface
CDI	Capacitor Discharge Ignition
CEPAL	Comisión Económica Para América Latina
CLM	Council of Logistic Management
COP	Colombiano Pesos
DEM	Digital Elevation Modeling
DNP	Departamento Nacional de Planeación
DTS-I	Digital Triple Spark Ignition

DUM	Distribución Urbana de Mercancías
ECU	Engine Control Unit
ENL	Encuesta Nacional Logística
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GNV	Gas Natural Vehicular
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile communications
HP	Horsepower
IRR	Indicador de Rendimiento Relacionado
IRRA	Indicador de Rendimiento Relacionado Ajustado
MOVES	MOtor Vehicle Emission Simulator
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NED	National Elevation Dataset
PAO1	Pseudomonas Aeruginosa
RPM	Revolución Por Minuto
SRTM1	Shuttle Radar Topography Mission 1
TIC	Tecnología de Información y Comunicación
UDFJC	Universidad Distrital Francisco José de Caldas
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
USGS	United States Geological Survey's

Preliminares

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Antonio Nariño por permitirme ingresar al mundo del conocimiento, de la tecnología, de disfrutar ser un estudiante UAN.

Agradezco a profesores, coordinadores y compañeros, y a todas aquellas personas que, durante esta etapa de formación, me acompañaron y aportaron su conocimiento, su paciencia, su dedicación y trabajo.

Agradezco la colaboración obtenida de parte de LOGYCA INVESTIGACIÓN a través de orientaciones, información y colaboración del Dr. Daniel Prato, la Ing, Camila Andrea Reinoso y el practicante Axel David Habeych.

Resumen

La industria del transporte en la etapa de distribución de mercancías de la última milla se encuentra en una constante búsqueda de soluciones que permitan optimizar este proceso y poder satisfacer la demanda del cliente, no solamente entregando sus productos en un menor tiempo, sino a un menor costo de operación, y a su vez que se genere una ampliación en el margen de ganancia para la empresa. Los vehículos utilizados actualmente para realizar la distribución de las mercancías en la última milla son de gran envergadura lo que dificulta cumplir con los tiempos establecidos previamente, ya que presentan dificultades para acceder a zonas donde las vías son reducidas, tienen un alto consumo de combustible y generan un nivel elevado de emisiones contaminantes. El vehículo motocarro surge como una opción de transporte de última milla que permite mitigar las problemáticas anteriormente descritas; esto se debe a sus características técnicas y suposiciones de operación, sin embargo en Colombia no se cuenta con estudios en el campo de la distribución de mercancías de última milla que permitan corroborar su eficiencia técnica, económica y ambiental frente a vehículos como el camión Chevrolet NPR, camioneta Changan MD201 cargo box y triciclo eléctrico Huaihai H5, es por esto que se implementa una prueba piloto en las ciudades de Bucaramanga, Medellín y Bogotá, en donde se reúnen datos por medio de sistemas de telemetría instalados en un motocarro por ciudad en un periodo \approx de 6 semanas con el fin de analizar el comportamiento del vehículo en diferentes condiciones de operación y así poder ser comparado con los vehículos anteriormente mencionados. Finalmente se establece una comparación entre los vehículos motocarros de cada ciudad en donde se evidencia que la variable de altitud no afecta la eficiencia energética de los mismos.

Palabras claves: logística, transporte, motocarro, consumo, última milla, telemetría, eficiencia.

Abstract

The transportation industry in the last mile goods distribution stage is in a constant search for solutions to optimize this process and be able to meet customer demand, not only delivering their products in less time, but also at a lower operating cost, and in turn generating an increase in the profit margin for the company. The vehicles currently used for the distribution of goods in the last mile are of large size, which makes it difficult to comply with the previously established times, since they have difficulties to access areas where the roads are reduced, have a high fuel consumption and generate a high level of pollutant emissions. The three-wheeler vehicle emerges as a last-mile transportation option that mitigates the problems described above; This is due to its technical characteristics and operating assumptions, however in Colombia there are no studies in the field of last mile goods distribution that allow corroborating its technical, economic and environmental efficiency compared to vehicles such as the Chevrolet NPR truck, Changan MD201 cargo box van and Huaihai H5 electric tricycle, this is why a pilot test is implemented in the cities of Bucaramanga, Medellin and Bogota, where data is collected through telemetry systems installed in a three-wheeler per city in a period ≈ 6 weeks in order to analyze the behavior of the vehicle in different operating conditions and thus be compared with the aforementioned vehicles. Finally, a comparison is established between the three-wheelers vehicles in each city where it is evidenced that the altitude variable does not affect their energy efficiency.

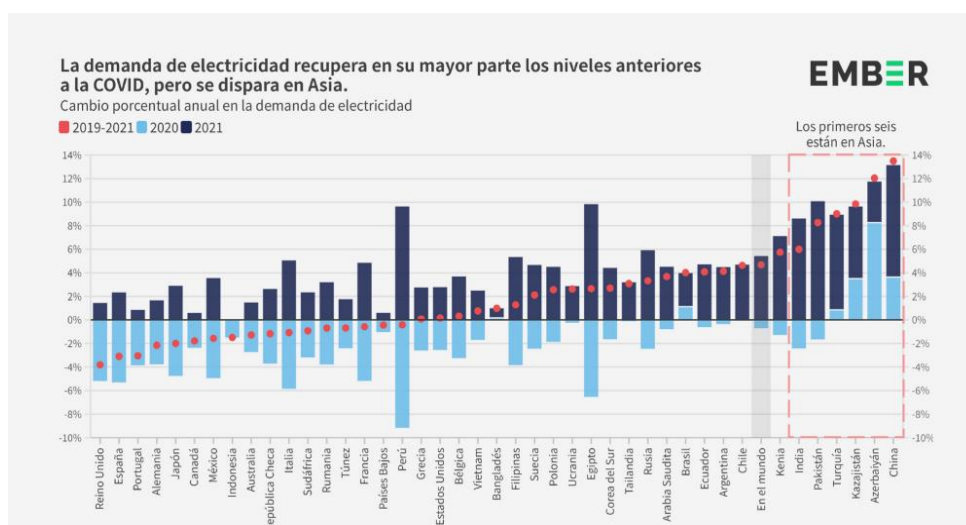
Key words: logistics, transportation, three-wheeler, consumption, last mile, telemetry, efficiency

1 Objeto de estudio

1.2 Introducción

Según la Global Electricity Review de Ember en 2022, la demanda energética en el mundo desde el año 2020 al 2021 aumento en 1.414 TWh, debido al crecimiento económico por el cual atraviesa el continente Asiático, en la Figura 1-1 se puede evidenciar los países que obtuvieron una mayor demanda energética posterior a la pandemia. Este aumento de consumo energético fue cubierto en un 59% por el carbón, mientras que el 29% lo cubrieron la energía eólica y solar. [1]

Figura 1-1. Demanda de electricidad



Nota: Fuente [1]

En la Proyección demanda energética de gas natural y Combustibles líquidos 2022-2036, para Colombia la demanda energética fue de 74.117 GWh-año, teniendo un aumento del 5,24 % con respecto al 2020, En los próximos 2 años se proyecta un crecimiento promedio de 3,1%, a mediano plazo se espera un consumo promedio entre el 2,22 % y el 3.35 % entre el año 2022 y el año 2036. [2]

Según Fedesarrollo [3] en Colombia el sector que más consume en energía es el transporte con una demanda del 40%, y se espera un aumento del consumo energético del 52% para el año

2030 con respecto al año 2015. Si bien es cierto que el aumento de consumo energético es directamente proporcional al crecimiento de la población es importante dar cumplimiento a la demanda con una reducción en el uso de gasolina y mayor participación de energías limpias y gas natural.

Partiendo de la ENL-2020 [4] el total de empresas de transporte de carga que cuentan con flota propia equivalen a un 56% para el año 2020, mientras que en el año 2018 se evidenció un 22,4%. La tipología vehicular que más se evidencia son los Vehículo particular o pequeño (automóvil, camioneta (pickup), campero, furgoneta (van)) con un porcentaje del 47,2%, mientras que la moto, tricimoto o motocarro se emplearon en un 29,6 %, en tercer lugar se ubican con un 14,1% los vehículos de 2 ejes (turbo hasta 4,5 toneladas o camión sencillo hasta 8,5 toneladas). Debido a los datos anteriormente mencionados se resalta la importancia que las empresas con operaciones logísticas le están dando a los vehículos de 2 y 3 ruedas.

El índice de desempeño logístico del Banco Mundial permite realizar una comparación entre países sobre el desempeño logístico que se ha tenido a través del tiempo, esto permite implementar mejoras en las empresas. En el año 2018, Colombia alcanzó el puesto 58 (entre 160 países) con un puntaje de 2,94 lo cual se debe a un promedio de los siguientes índices logísticos: puntualidad, trazabilidad, facilidad de envíos, competencia logística, infraestructura, Aduana. [4]

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo integral de grado describe en el primer capítulo el objeto de estudio. En el segundo capítulo se define el marco teórico asociado a la logística y la telemetría. En el capítulo 3 se plantea la metodología de la prueba piloto en donde se revisan las especificaciones técnicas del vehículo motocarro y los sistemas de telemetría instalados en los mismos. En el capítulo 4 se realiza el procesamiento de datos obtenidos a partir de la prueba piloto. En el capítulo 5 se realiza el análisis técnico, económico y ambiental para

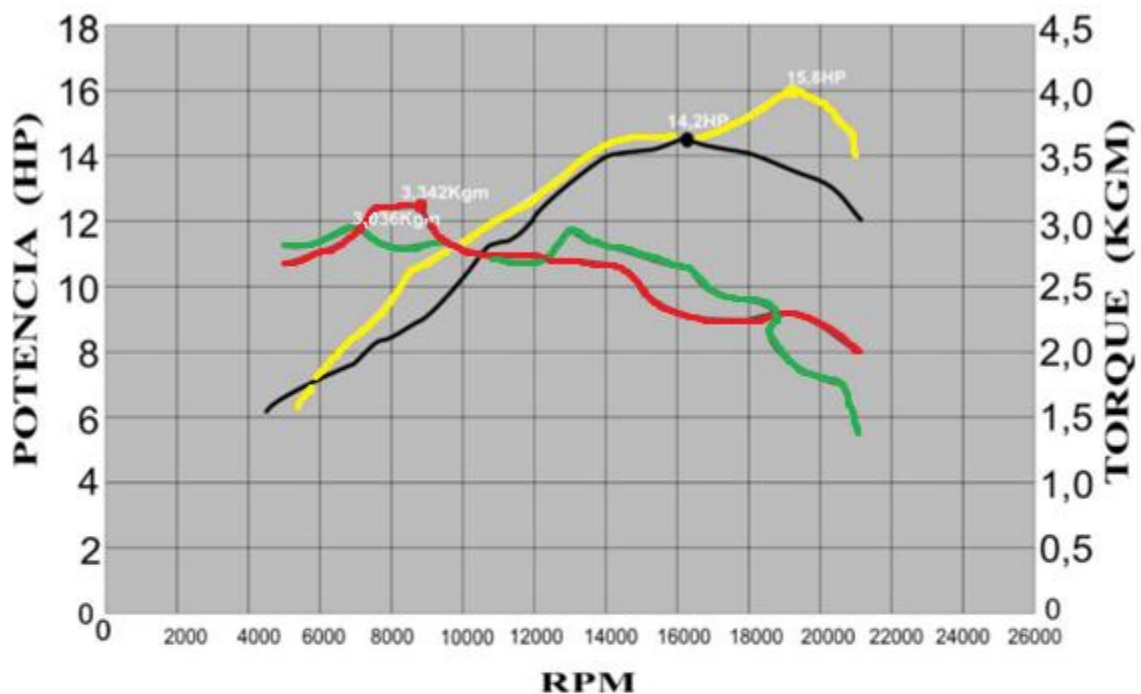
cada motocarro operado en las 3 ciudades. En el capítulo 6 se describen los vehículos de línea base, adicionalmente se realiza el cálculo del desempeño técnico, económico y ambiental de los mismos y finalmente en el capítulo 7 se realiza el comparativo de los aspectos técnicos, económicos y ambientales obtenidos para los vehículos de línea base y los motocarros operados en cada una de las ciudades.

1.3 Antecedentes

En la tesis de maestría desarrollada en la Universidad Nacional de Colombia [5], en el municipio de Girardota-Medellín, se realizó una modelación de la elección del motocarro como modelo de transporte público en las zonas rurales teniendo en cuenta los parámetros definidos por el Ministerio de Transporte, a través del modelo de elección discreta se pudo determinar que las variables más significativas a la hora de predecir el comportamiento de los usuarios son el tiempo de viaje, tiempo de espera y el costo; estos comparados con los rangos de edad de los usuarios.

En el artículo científico publicado por la Universidad Autónoma del Caribe [6], mediante el cual se evalúa el desempeño de un motocarro con motor de dos tiempos convertido a gas natural vehicular, se obtiene la curva de potencia y torque entregada a la rueda utilizando como combustible gasolina. Los resultados de la prueba que se evidencian en la Figura 1-2 fueron obtenidos a partir de un recorrido del vehículo de 192 km con el tanque de gasolina en su máxima capacidad que son 3,2 galones.

Figura 1-2. Prueba de potencia y torque con gasolina y gas natural.



- Curva de potencia con gasolina como combustible
- Curva de potencia con gas natural vehicular como combustible.
- Curva de torque con gasolina como combustible.
- Curva de torque con gas natural vehicular como combustible.

Nota: Fuente [6]

Finalmente se obtienen los valores máximos y mínimos para el torque y la potencia a unas rpm determinadas como se observa en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1. Valores máximos y mínimos de torque y potencia para motocarro a gasolina.

$P_{min} = 6,2HP$	$\rightarrow N = 5.700 RPM$
$P_{max} = 15,8HP$	$\rightarrow N = 19.400 RPM$
$T_{min} = 2kgm$	$\rightarrow N = 21.000 RPM$
$T_{max} = 3,342kgm$	$\rightarrow N = 8.900 RPM$

Nota: Fuente [6]

El estudio de caso realizado por el director de logística de la empresa Europea Pikolin [7] ,se realizó la implementación de un software de gestión y optimización de rutas denominadas Network Routing de JDA, permitiendo la unificación y centralización en cuanto a la planificación de rutas de reparto capilar analizando en tiempo real las posibles rutas con base a los parámetros suministrados, adicionalmente el software permite geo codificar cada cliente con el fin de identificar el tipo de vehículos que admite la vía de ingreso, la ubicación y el tipo de domicilio. En cuanto a los vehículos se permite realizar una caracterización de los mismos con el fin de optimizar el espacio volumétrico de la capacidad de carga y las distancias medias por entrega. Con el fin de prever e identificar cualquier tipo de anomalía por parte del conductor al momento de realizar la entrega, este utiliza el aplicativo de Pikolin en el cual reporta la incidencia e inmediatamente se direcciona mediante correo electrónico al área encargada de dar solución, en caso de que la entrega sea exitosa se realiza una firma digital con la cual se economizan los insumos de papelería.

En la tesis de Especialización en Gestión de Proyectos de Ingeniería de la UDFJC [8] se presenta un estudio en el parque automotor de la organización Colombina de Encomiendas S.A,

con el fin de incluir motocarros eléctricos en la flota vehicular, ya que estos realizan recorridos con mayor facilidad debido al peso y volumen que ocupan al desplazarse, adicionalmente generan una mayor movilidad en el tráfico de la ciudad de Bogotá y por último no están regulados en materia de circulación. Se realiza un cálculo de la demanda futura de forma cuantitativa basándose en los datos históricos de la empresa, identificando la cantidad de mercancía que se puede transportar según las especificaciones técnicas del motocarro y por otra parte se realiza la implementación de 25 encuestas a las organizaciones que utilicen el servicio de la empresa con el fin de corroborar su nivel de satisfacción.

En la tesis de Especialización en Administración y Auditoría Tributaria de la Universidad Jorge Tadeo Lozano [9], se plantea la importación de motocarros a Colombia con el fin de evaluar los beneficios socioeconómicos, aduaneros y tributarios que tiene la implementación de este tipo de vehículos en el país; dejando al descubierto que es un medio de transporte rápido y de puerta a puerta que va de la mano con las necesidades de los usuarios, ya que posee una versatilidad que no tienen los vehículos convencionales a la hora de desplazarse por la infraestructura vial Colombiana. Los beneficios para microempresarios, inversionistas y campesinos, se evidencian a la hora de evaluar la capacidad de carga de los motocarros la cual es de hasta media tonelada sin perjudicar al vehículo; esto comparado con la motocicleta.

El trabajo de Máster de Ingeniería Avanzada de Producción, Logística y Cadena de Suministro de la Universidad Politécnica de Valencia [10], en Madrid-España la Start-Up Revoolt incorporó en 2017 en su flota de reparto para supermercados una serie de triciclos eléctricos con asistencia al pedaleo, este triciclo se conoce como BKL BOX y tiene homologación para transitar por carriles de bicicleta, algunas de sus características técnicas son: autonomía de 60-80 km, volumen de carga de 430 L y tiempo de carga de la batería de 4 horas; su valor en el mercado es

de 3745 €. Por otro lado Scoobic es un triciclo desarrollado por la empresa Passion Motorbike Factory, este vehículo combina la agilidad de una motocicleta con la capacidad de carga de una furgoneta la cual ronda los 1000 L o 750 kg, las baterías tienen una autonomía de 300 km; se espera que para 2019 se incorporen 1.000 unidades a la empresa Carrefour.

La logística de última milla o distribución capilar hace referencia al proceso donde se realiza la entrega final de la mercancía al cliente, en otras palabras, es el último trayecto previo a la entrega al cliente. El proceso de entrega de mercancía de última milla presenta complicaciones a la hora de ejecutarse debido a factores como el tráfico vehicular, escasos de sitios para estacionar, dificultad de acceso a sectores, entre otros; ocasionando fluctuaciones en cuanto al tiempo estimado de entrega al cliente final, adicionalmente se generan incrementos en la utilización de los recursos por parte de la empresa como pueden ser el consumo de combustible, talento humano, desaprovechamiento de la carga máxima, mayor desgaste mecánico de los vehículos, lo que finalmente se traduce e implica en incrementos de costos logísticos teniendo en cuenta que estos pueden llegar a absorber un 32 % del precio total del producto. [11]

Según la (ley 769 de 2002), el motocarro es un “vehículo automotor de tres ruedas con estabilidad propia con componentes mecánicos de motocicleta, para el transporte de personas o mercancías con capacidad útil hasta 700 kilogramos”. [12]

Según el Ministerio de Transporte [13], se reglamenta la inclusión del vehículo de clase motocarro en las empresas que prestan un servicio de transporte público siempre y cuando se realice de forma oportuna, eficiente, segura y económica teniendo presente principios rectores de libre competencia y la iniciativa privada.

En el informe sobre la implementación de la conducción eficiente presentado a la Organización Corona [14] ,se realiza un análisis donde se estima el consumo de combustible a

partir de las variables independientes con el fin de encontrar una ecuación que permita relacionarlas y obtener un resultado, esta ecuación se calcula a partir de los análisis de regresión estadística integrados en diferentes software, en este caso en particular se utilizó la herramienta Minitab®, sin embargo se debe aclarar que si bien la regresión permite obtener una ecuación aproximada esta no garantiza los resultados obtenidos del consumo de combustible debido a que se deben tener en cuenta otras variables relacionadas con la dinámica del vehículo las cuales no fueron incluidas en el análisis.

1.4 Planteamiento del problema

En el siglo XXI se ha evidenciado un constante crecimiento de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), lo que ha generado en el comercio electrónico una alta demanda en donde el cliente busca que su producto y servicio de entrega sea de una mejor calidad, con menor tiempo y a un menor costo; debido a lo anterior las empresas se han visto en la necesidad de implementar cambios que le permitan satisfacer estas necesidades haciendo uso de la logística de última milla. La logística de última milla o distribución capilar hace referencia al proceso donde se realiza la entrega final de la mercancía al cliente y es allí donde más obstáculos se suelen presentar; algunos de estos son problemas con el ruteo vehicular de entrega o recolección múltiple, difícil acceso a las áreas urbanas que no cuentan con la infraestructura vial necesaria para el ingreso de vehículos de carga convencionales, tráfico vehicular, elevados consumos de combustible, entre otras. [15]

Según Especialista Content Writer SEO en Drivin [16], para la empresa encargada de realizar la entrega de última milla representa hasta un 53% del costo total del envío (*entendido desde el centro de distribución principal hasta el cliente final*). Dado lo anterior, nace la necesidad de encontrar alternativas de transporte para la distribución de las mercancías en donde se pueda

dar solución a los problemas descritos en el párrafo anterior, siendo los de más relevancia en este caso, las emisiones a la atmosfera, los costos de combustible, los costos de mantenimiento.

El motocarro es un vehículo alternativo el cual podría presentarse como una solución eficiente que apunta a la disminución de costos de entrega, sin embargo se hace necesario el realizar un análisis de su comportamiento en operación en diferentes ciudades de Colombia donde se pueda verificar que efectivamente se está logrando una reducción en cuanto al consumo de combustible, optimización de tiempos de entrega y reducción de la huella de carbono en comparación con el transporte de carga convencional.

1.5 Justificación

En la actualidad los operadores logísticos se encuentran en una constante competencia donde la finalidad es realizar entregas en la última milla de forma rápida y a bajo costo, esto implica una constante implementación de flotas de vehículos que permitan realizar una distribución eficiente, sin embargo con el desarrollo de las economías de los centros urbanos se ha visto un incremento en la cantidad de vehículos que transitan por los mismos lo cual genera una alta congestión que dificulta la movilidad y por lo tanto retrasa los horarios de entrega de las mercancías al cliente final. Adicionalmente, se evidencia que el costo total del transporte varía en función de la distancia, el peso, la ubicación, el medio de transporte, el consumo de combustible, distribución de rutas, la altitud, entre otras variables que al lograr una optimización de estas reduce drásticamente los costos de entrega. [15]

Se hace necesario realizar un estudio en donde se evidencie desde un enfoque técnico, económico y ambiental las razones por las cuales es fundamental ejecutar un cambio de vehículos de carga convencional como los son camiones y camionetas por los motocarros en el proceso de distribución de mercancías en la etapa de última milla. Para esto se debe recolectar datos de

operación por medio de sistemas de telemetría instalados en 3 vehículos motocarro ubicados en las ciudades de Bogotá, Medellín y Bucaramanga (un motocarro por ciudad); estos datos contienen información de las entregas de mercancía realizadas en un periodo de 2 meses donde únicamente se tendrán en cuenta los valores obtenidos cuando el vehículo se encuentra en operación.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Teniendo presente la información anterior este proyecto tiene como objetivo general realizar un análisis del desempeño técnico, económico y ambiental de motocarros de combustión interna bajo condiciones reales de operación con respecto a vehículos convencionales para distribución de mercancías en la última milla para tres ciudades de Colombia.

1.6.2 Objetivos específicos

- Establecer las características de la logística del reparto de mercancías y aspectos técnicos de los vehículos usados en cada una de las ciudades en las cuales se realizó la prueba piloto. Las variables relevantes a comparar en las alternativas son el rendimiento [km/L] y [g/km de contaminante].
- Procesar las variables relacionadas con el ruteo a saber, el posicionamiento, la altitud, nivel combustible en el tanque y consumo de combustible de los vehículos para caracterizar logística y técnicamente la distribución de mercancías para cada una de las ciudades.
- Determinar desempeño técnico, económico y ambiental de los motocarros y establecer comparación con la línea base para cada una de las ciudades.

- Realizar un análisis y síntesis comparativa de los aspectos determinados anteriormente entre las ciudades evaluadas.

1.7 Alcance

A partir los datos recolectados donde se recopila la información reportada de aproximadamente 6 semanas de entregas por los sistemas de telemetría instalados en 3 vehículos motocarro como prueba piloto ubicados en las ciudades de Medellín, Bucaramanga y Bogotá, se realizará un análisis de la línea base técnica de los motocarros, el desempeño del vehículo, la eficiencia operacional, los costos y las emisiones de (CO_2), con el fin de realizar una comparación con los vehículos de carga y distribución de mercancías convencionales como lo es el camión Chevrolet NPR, la camioneta Changan MD201 Cargo Box y el triciclo eléctrico HUAIHAI H5, para esto es necesario recurrir a la literatura con el fin de encontrar datos asociados a estos medios de transporte convencionales en la distribución de mercancías de última milla.

Se hace indispensable realizar una limpieza de los datos suministrados con el fin de evitar inconsistencias en los mismos que puedan arrojar resultados erróneos que interfieran con el poder cumplir con los objetivos propuestos es este proyecto.

1.8 Metodología

La metodología para el cumplimiento de los objetivos se establece a continuación:

- Se realizará una caracterización del vehículo motocarro utilizado en cada una de las ciudades para la realización de entregas en la etapa de última milla en la prueba piloto con el fin de conocer las especificaciones técnicas donde se refleje la capacidad de carga en masa y volumen, la capacidad del tanque de gasolina, el cilindraje, la potencia y el tipo de sistema de transmisión.

- Se desarrollará un análisis estadístico y procesamiento de los datos recopilados por los sistemas de telemetría instalados en los vehículos motocarros donde se pueda evidenciar el consumo de combustible, velocidad promedio, georreferenciación en tiempo real la cual refleja datos de distancia recorrida y elevación, número de entregas diarias, costos del combustible y emisiones de CO₂ de los mismos.
- Establecer un comparativo entre los resultados obtenidos en cada uno de los motocarros ubicados en las diferentes ciudades y los vehículos usados actualmente en la operación, con el fin de resaltar similitudes y diferencias. El comparativo se realizará sobre las siguientes variables relevantes: técnico: características técnicas de los motores usados, consumo del fabricante por tipo de vehículo; económico: costos de combustible, costos de vehículos; ambiental: emisiones por tipo de vehículo.
- Realizar un comparativo entre el uso del motocarro tanto en su impacto ambiental como los problemas de movilidad con respecto a los vehículos de distribución de última milla convencionales usados actualmente, dando así un aporte a las empresas que se dedican a distribuir mercancía día a día en grandes ciudades del país, a implementar pilotos de distribución con motocarros. Y así darse cuenta de los beneficios o desventajas que tienen estos vehículos.

2 Marco teórico

2.1 Definición de logística

La palabra logística a través de la historia ha tenido diferentes apariciones y por lo tanto se han llegado a diferentes significados y comprensiones, sin embargo para este caso de estudio en concreto se define como una ciencia que comprende todas las actividades que le permiten a una empresa dar cumplimiento a sus necesidades físicas o materiales con el fin de tener un buen funcionamiento de la misma.

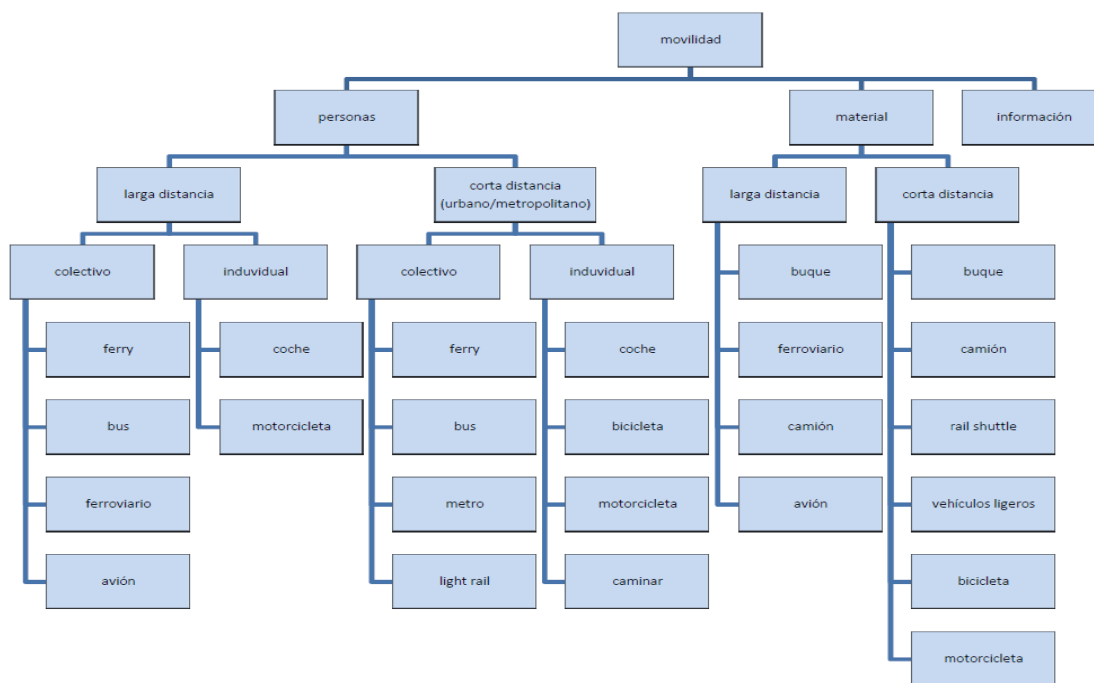
Es decir que para llevar a cabo dichas actividades se vuelve necesario implementar un conjunto de técnicas que permitan dar cumplimiento a los procesos de abastecimiento, mantenimiento y transporte, siempre teniendo en cuenta que se debe satisfacer las necesidades físicas de la empresa.

“El consejo de administración logística *Council of Logistic Management (CLM)*, la define como el proceso de planear, implementar y controlar efectivamente el flujo y almacenamiento de materia prima, inventario en proceso, productos terminados y su información relacionada desde el origen hasta el punto de consumo, en forma eficiente y al menor costo posible, para satisfacer los requerimientos de los clientes” [17].

Partiendo de la definición de transporte donde « es una convención entre dos o más partes, una de ellas cualificada, en virtud del cual, dicha parte se compromete a trasladar una persona o mercancías de un lugar a otro en un tiempo determinado, a cambio de una contraprestación determinada; como servicio, se entiende que el transporte es una industria que tiene como finalidad la satisfacción de una necesidad fundamental de los seres humanos de desplazarse o desplazar sus objetos de un lugar a otro, como presupuesto para el goce de otros derechos fundamentales ». [18]

Según [19] el transporte es una actividad fundamental e indispensable en cualquier canal logístico que permite trasladar materiales, materias primas o productos terminados garantizando la distribución de los mismos. Los movimientos de estas mercancías se realizan mediante cuatro medios básicos de transporte: Ferrocarril, marítimo, aéreo y carretera; dando posibilidades a que se realicen interacciones entre los mismos con el fin de reducir costos y tiempos de desplazamiento. Sin embargo el medio por carretera posee la ventaja de poder realizar entregas puerta a puerta, lo cual se hace imposible en los otros medios de transporte. Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) [20], en la Figura 2-1 se puede evidenciar el medio de transporte utilizado según la necesidad que se tiene.

Figura 2-1. Características de las opciones de movilidad.



Nota: Fuente [20]

Según [17] “la logística se refiere a una parte del proceso de gestión de la cadena de suministro encargada de la planificación, implementación y control eficiente del flujo de materiales y/o productos terminados, así como el flujo de información relacionada, desde el punto

de origen hasta el punto de destino, cumpliendo al máximo con las necesidades de los clientes y generando los mínimos costos operativos”.

2.2 Distribución urbana de mercancías

Esta etapa de la distribución se refiere a que las mercancías pueden ser distribuidas en, desde y a las áreas urbanas. Fernandez-Barcerlo y Campos-Cacheda (2012) definen la distribución urbana de mercancías como “el transporte de bienes por medio de un vehículo con ruedas, y las actividades relacionadas al transporte hacia o dentro de un ambiente urbano”. Por lo general la distribución urbana de mercancías parte de la carga que ingresa a la ciudad, posteriormente se descarga en una instalación en donde se desarrolla un proceso de separación y consolidación de carga para proceder a realizar un enrutamiento hacia su destino final. [21]

La DUM es considerada una actividad con un gran impacto a la hora de abastecer a la población, es por esto que se hace necesario el poseer una eficiente distribución y transporte, dos factores que generan una alta competitividad en el sector logístico generando a su vez empleos. Sin embargo, se evidencia un constante tráfico de mercancías lo que ocasiona problemas de movilidad y por lo tanto genera retrasos en los tiempos de entrega como también impactos sociales y medioambientales que perjudican a las zonas urbanas en una alta medida. [21]

Como finalidad principal la DUM busca mejorar la movilidad, alcanzar una sostenibilidad y armonía con los actores que influyen como los son las transportadoras, Administradores o dueños de empresas, clientes, el medio ambiente, la infraestructura, el tráfico vehicular y las TIC'S. Si bien las anteriores partes no convergen en el mismo punto, siempre se debe buscar un objetivo en común que permita dar soluciones aceptables para todos.

Se hace necesario resaltar que el sector donde más se busca optimizar y mejorar es en las entregas de mercancías de última milla, ya que cuenta con un gran potencial para implementar una serie de mejoras que permitan contribuir con la evolución del sector logístico.

2.3 Logística de última milla

En el siglo XXI se ha evidenciado un constante crecimiento de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), lo que ha generado en el comercio electrónico una alta demanda en donde el cliente busca que su producto y servicio de entrega sea de una mejor calidad, con menor tiempo y a un menor costo; debido a lo anterior las empresas se han visto en la necesidad de implementar cambios que le permitan satisfacer estas necesidades haciendo uso de la logística de última milla.

La logística de última milla hace referencia al proceso donde se realiza la entrega final de la mercancía al cliente y es allí donde más obstáculos se suelen presentar; algunos de estos son problemas con el ruteo vehicular de entrega o recolección múltiple, difícil acceso a las áreas urbanas que no cuentan con la infraestructura vial necesaria para el ingreso de vehículos de carga convencionales, tráfico vehicular, entre otras. Es por esto que la logística de última milla busca implementar un control en tiempo real del proceso de transporte de mercancías, el cual les permita tanto al comprador como al vendedor saber el estado actual de su producto.

Según [22] el desarrollo del proceso de entrega al cliente final permite el uso de tecnologías móviles, gestión de flotas y optimización de rutas, seguimiento del producto puerta a puerta, una mayor apropiación del cliente en el seguimiento del estado de sus mercancías lo cual genera una mejora continua en la experiencia obtenida por el mismo y business intelligence sobre los procesos logísticos.

2.4 Vehículos utilizados en el transporte de última milla

En el transporte de carga existen varias clasificaciones, en la primera categoría se puede clasificar como transporte de carga general el cual va orientado a la mercancía que viene empacada de una manera fraccionada o unitaria y el transporte de carga a granel el cual se emplea para mercancías sin empaquetar o embalar las cuales pueden ser de tipo sólido, líquida y gaseosa.

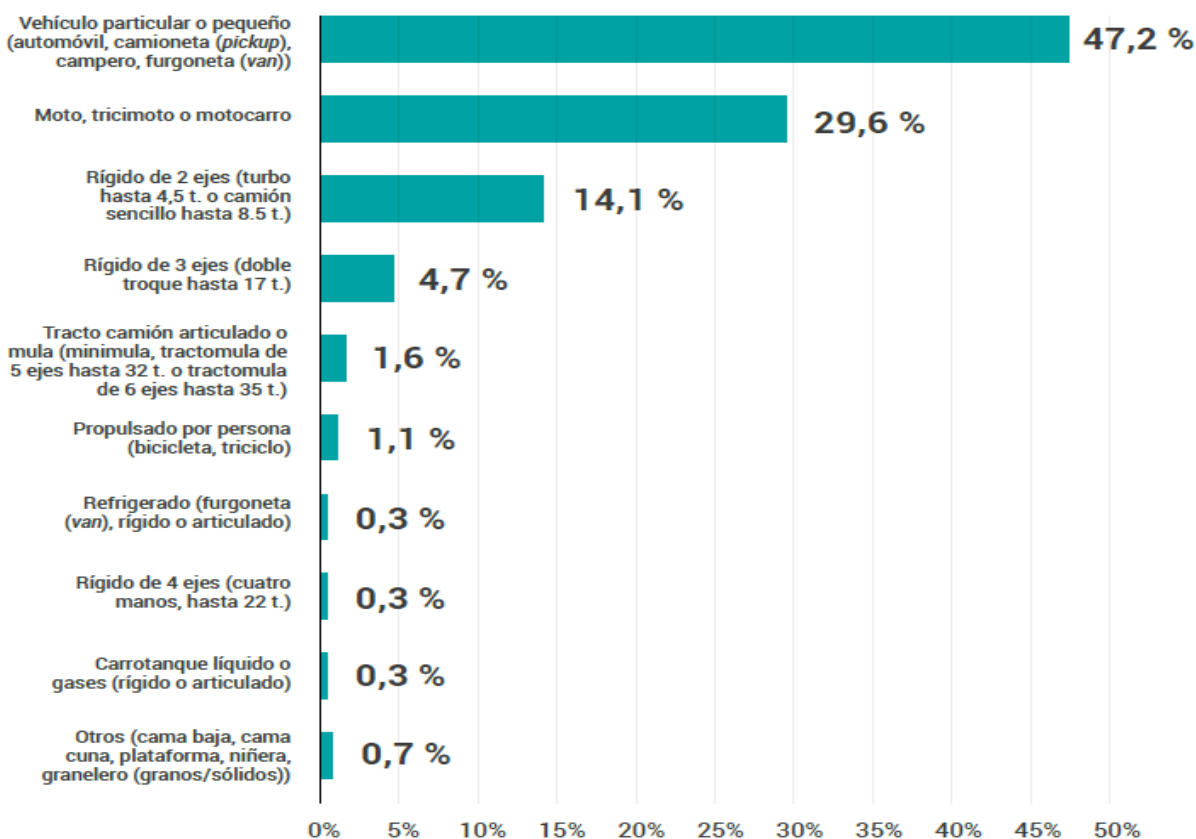
En una segunda instancia se puede asignar el vehículo de carga según sea la operación a desarrollar o la mercancía a transportar, estas pueden ser mercancías peligrosas, productos perecederos, productos frágiles, maquinaria pesada.

Para la distribución de mercancías de última milla se pueden tener en cuenta la siguiente clasificación:

- Turbo: Este vehículo cuenta con una capacidad de carga de 3.5 hasta 4.5 toneladas.
- Mini turbo: Este vehículo cuenta con una capacidad de carga de 2.5 toneladas.
- Carga urbana o Carry: Permite el transporte de paquetería liviana y sus dimensiones son de 1 metro de ancho y alto, por un metro y medio de largo.

Según [4] la mayor cantidad de vehículos utilizados por las empresas dedicadas a actividades logísticas se concentran en vehículos particulares de capacidad de carga pequeña, como se evidencia en la Figura 2-2. Es allí donde se empieza a resaltar el crecimiento en la implementación del uso de motocarros en el reparto de mercancías de última milla.

Figura 2-2. Tipos de vehículos utilizados para operaciones logísticas.



Nota: Fuente [4]

2.5 Definición de motocarro

Según la (ley 769 de 2002), el motocarro es un “vehículo automotor de tres ruedas con estabilidad propia con componentes mecánicos de motocicleta, para el transporte de personas o mercancías con capacidad útil hasta 700 kilogramos”. [12]

La composición del motocarro deriva una parte posterior la cual corresponde a un vano de carga y una anterior que se deriva de la parte mecánica de una motocicleta. En sus inicios las modificaciones radicaban en el tren trasero el cual era remplazado por un eje de dos ruedas, posteriormente se cambió la conducción típica de una motocicleta por una cabina que permitía un mejor confort y estabilidad. Hoy en día son vehículos de bajo cilindraje que permiten adoptar

diferentes configuraciones tal como un furgón y transporte de pasajeros. En cuanto al reparto de mercancías en los entornos urbanos son muy aconsejados debido a su maniobrabilidad y bajo costo de mantenimiento. En la Figura 2-3 se puede evidenciar las características del motocarro descritas anteriormente.

Figura 2-3. Características físicas del Motocarro



Nota: Fuente [23]

2.6 Indicadores de eficiencia energética

Según la Administración de Información de Energía y la International Energy Agency [24] la eficiencia energética expresa como “el cociente entre la energía requerida para desarrollar una actividad específica, y la cantidad de energía primaria usada para el proceso”, a partir de lo anterior se plantea en (2-1) y (2-2) lo siguiente:

$$E.E = \left(\frac{\text{Efecto energético util deseado}}{\text{Consumo energético}} \right) \text{Equipo o proceso} \quad (2-1)$$

Equivalente a

$$E.E = \left(\frac{\text{Energía aprovechada}}{\text{Energía consumida}} \right) \text{Equipo o proceso} \quad (2-2)$$

En general existen una gran cantidad de indicadores cuya finalidad es demostrar que un elemento es más energoeficiente que otro, sin embargo para este estudio se tendrá en cuenta la eficiencia energética del vehículo en términos de consumo de combustible por distancia recorrida, como por ejemplo, ¿un tipo de vehículo es más energoeficiente que otro en términos de galones de combustible consumidos por kilómetro recorrido?

2.7 Eficiencia energética en el reparto de última milla

En los últimos años se ha evidenciado un incremento en el costo de combustibles fósiles, el cambio climático y otros problemas de suministro energético, es por esto que la agenda pública ha situado su atención en una nueva realidad energética y ambiental especialmente en el sector del transporte, ya que este representa cerca del 19% del consumo global de energía y el 23 % de las emisiones de (CO_2), proyectando para el año 2030 un aumento del 50% y más del 80% en el año 2050. Este aumento varía para los países en vía de desarrollo con crecimientos esperados del 2,8% al año 2030. [25]

En América Latina se evidencia un gran potencial para lo toma de conciencia energética y ambiental, ya que en la matriz de consumo energético a nivel nacional es del 30% al 35%; con combustibles derivados del petróleo. El impacto ambiental que tienen las empresas del sector logístico en Colombia, está relacionado con el transporte terrestre, ya que aporta el 86% del total de la contaminación que se genera en Colombia, como también es responsable del 23% de los gases de efecto invernadero a nivel mundial y del 80% del nivel medio de ruido. [26]

Debido a una encuesta realizada en el territorio colombiano por parte del Departamento Nacional de Planeación se evidencia una alta preocupación en cuanto a la calidad del aire en las ciudades principales como Medellín, Cali y Bogotá con porcentajes equivalentes al 74%, 49% y 45% respectivamente, perjudicando la salud de los habitantes en aproximadamente el 76% de los municipios donde se realiza vigilancia de la calidad del aire. En caso de que el área de monitoreo indique una alerta naranja se procede a implementar medidas que restringen el tránsito de camiones y volquetas donde pueden circular únicamente en rangos de horarios específicos. [27]

Según los datos anteriormente descritos es necesario optimizar la cantidad de energía requerida para transportar productos, Según [25] esta optimización se puede realizar a partir de mejoras en las operaciones de transporte de carga, las cuales son:

- *Utilización de vehículos eficientes:* Para el año 2030 se esperan mejoras en los motores de combustión interna de última generación, equipos más livianos, mejores neumáticos, entre otras. Las cuales permitan utilizar equipos hasta de un 30% o 40% más eficientes.
- *Mejoras en la gestión de flotas:* Por medio de la implementación de software para la gestión de transporte y técnicas de programación logística, se optimiza el uso de los vehículos; evitando viajes innecesarios, mejorando factores de ocupación y mejorando la eficiencia del ruteo de carga. Se espera una disminución en los tiempos muertos y eliminar esos viajes innecesarios, reducción de consumo de combustible y la contaminación asociada.

2.8 Definición de factores de emisión

Partiendo de [28] los factores de emisión son herramientas que permiten estimar la cantidad de emisiones que genera un determinado contaminante, estos tienden a variar con el tipo de

combustible y la actividad en la que se realice el proceso de combustión (sector industrial, generación de energía, aplicaciones residenciales), también influye la tecnología implementada para el proceso de combustión (hornos, estufas, calderas). Partiendo de lo anterior se determina el factor de emisión por combustible, proceso y tecnología; en cuanto más detalle se tenga del proceso, más exacto es el factor. Por lo general se expresa como el peso del contaminante emitido por unidad de peso, volumen, energía o actividad.

2.9 Definición de telemetría

Según [29] la palabra telemetría proviene del griego y se descompone de la siguiente manera: *tele* que quiere decir largo y *meter* que significa medir. Es por esto que lo que se busca con la telemetría es tomar medidas de largas distancias, estas mediciones se realizan bajo parámetros físicos como lo son la temperatura, velocidad, tiempo, distancia, estado de carga, entre otras.

Para la industria logística se hace indispensable implementar sistemas de telemetría los cuales les permitan realizar una gestión integrada del estatus de la flota vehicular en ámbitos relacionados con el mantenimiento, factores de rendimiento, salud vehicular y localización, al tener conocimiento en tiempo real de estos factores le permite a la empresa realizar acciones o implementar soluciones orientadas al mejoramiento de los equipos y la reducción de costos. Un sistema de Telemetría está compuesto por 3 herramientas principales:

- Dispositivo GPS y accesorios
- Plataforma Web
- Reportes de trabajo

Al realizar una combinación de las herramientas abre paso a tener un control digital de las rutas que se realizan, un histórico de datos en donde se refleje el kilometraje, posición y rutas, entre otras. [30]

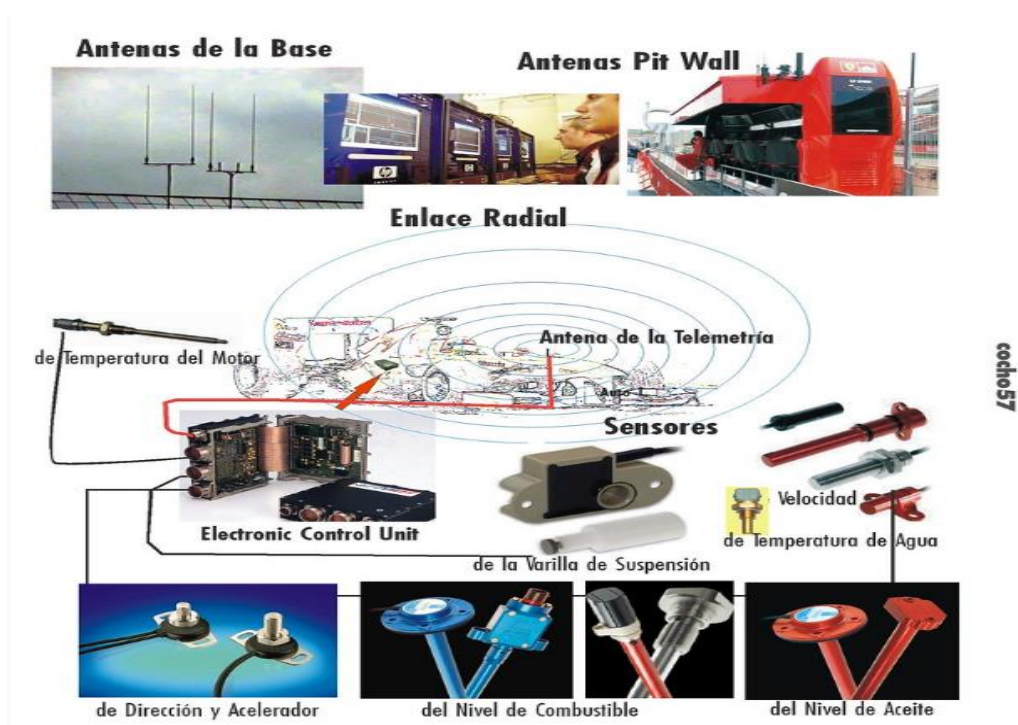
2.10 Telemetría en el transporte de carga

La telemetría cuenta con múltiples campos para su implementación, algunos de ellos son las estaciones meteorológicas, artefactos aeroespaciales, industrias de almacenamiento; sin embargo para el caso de estudio se concentrará su implementación en las empresas logísticas dedicadas al transporte de carga.

Ahora bien, en el transporte de carga la función de la telemetría es obtener datos relacionados con la operación diaria y controlar el rendimiento del vehículo, esto con el fin de analizar la información y tomar decisiones oportunas que contribuyan con la mejora en los procesos de entrega de última milla.

En la Figura 2-4 se puede apreciar el funcionamiento de un sistema de telemetría aplicado a la Fórmula 1 en donde se cuenta con 2 secciones: En primer lugar se tiene una unidad de control electrónica (ECU) la cual es encargada de recibir la información suministrada por los diferentes sensores instalados en el vehículo, posteriormente estos datos son enviados a través de una antena telemétrica, es allí donde se encuentra una antena receptora la cual está conectada a un unidad emisora-receptora que permite decodificar la señal encriptada, de tal manera que se pueda tener acceso a los datos mediante un software especializado.

Figura 2-4. Enlace sensores-ECU-centros de datos.



Nota: Fuente [31]

Según [29] Otra forma de diferenciar los componentes utilizados en la telemetría para recolectar datos en tiempo real es la siguiente:

- **Recolección de datos:** en un espacio específico del vehículo se colocan los sensores con el propósito de medir velocidad, ubicación y estados de la carga. Transmisión a un emisor instalado en el vehículo.
- **Los datos recogidos pasan por transmisión inalámbrica** a un dispositivo instalado en el camión mezcladora, que puede ser un teléfono celular u otro transmisor conectado a una red por radio o comunicación satelital.
- **Levantamiento de datos:** los datos recogidos por los sensores son convertidos en magnitudes comunes que pueden ser leídas rápidamente como: niveles de combustible, carga, kilometraje y otros que se puede ubicar en el mapa satelital.

- Comunicación inalámbrica: los datos se transmiten mediante una red satelital, desde el dispositivo a una central ubicada a distancia, en la que se codifica los datos en tiempo real.
- Retroalimentación inmediata: La central está en condiciones de recibir y evaluar los datos en cualquier momento. Esto permite enviar órdenes de forma inmediata, ya sea por contacto con un operador humano o por una orden automatizada.

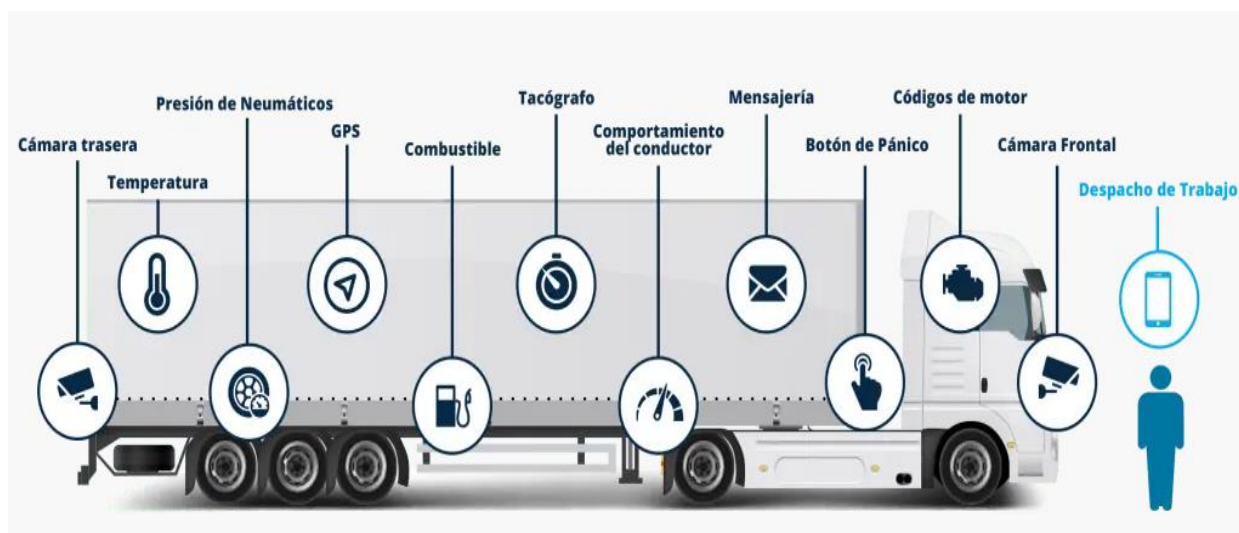
2.11 Datos aportados por los sistemas de telemetría

Algunos datos transmitidos por medio de lo sistema de GPS y transferidos a las bases de datos por medio de la red GPRS, trabajan en conjunto con la computadora del vehículo, y algunos datos capturados son:

- Odómetro
- Consumo de combustible
- RPM
- Temperatura
- Nivel de tanque
- Tiempo de recorrido

En la Figura 2-5 se puede evidenciar una serie de datos recolectados a través de sensores instalados en un vehículo de transporte de carga.

Figura 2-5. Equipos de monitoreo.



Nota: Fuente [32]

3 Descripción de la prueba piloto

Un grupo de empresas tomó la iniciativa de implementar un piloto orientado al sector logístico de transporte de mercancías en la etapa de última milla. Para el desarrollo del piloto se postularon tres empresas las cuales transportan mercancías similares y operan en las ciudades de Bogotá, Medellín y Bucaramanga. Con cada una de las empresas se plantearon unos lineamientos basados en las actividades a desarrollar durante la implementación del proyecto piloto de distribución con motocarros. La operación de los vehículos fue proyectada para seis semanas en cada una de las ciudades, posterior a esto se termina la operación y se procede a analizar los datos recolectados en este intervalo de tiempo. Se aclara que los dispositivos de telemetría únicamente fueron instalados en los vehículos motocarro, mientras que para los vehículos de línea base se realizó revisión de la bibliografía para determinar sus características técnicas, consumos de combustible y factores de emisión.

Los productos transportados por cada una de las empresas son los siguientes:

- *Empresa 1:* Su localización es en Bucaramanga y la mercancía que transporta son alimentos empacados (*carga seca*).
- *Empresa 2:* Su localización es en Medellín y la mercancía que transporta son productos de aseo, alimentos, paquetería en la presentación de sobres y cajas.
- *Empresa 3:* Su localización es en Bogotá y la mercancía que transporta son textiles.

3.1 Lineamientos


Los lineamientos descritos a continuación fueron implementados para cada una de las empresas involucradas en la implementación del piloto; estos fueron:

- Revisión acuerdos contractuales de confidencialidad para el manejo de la información y el uso adecuado de los motocarros.
- Validar y garantizar la adquisición e implementación de dispositivos de telemetría para el levantamiento de la información.
- Definir las zonas de operación.
- Proponer y seleccionar el tipo de vehículo (motocarro) más adecuado para la operación a desarrollar.
- Dar inicio a la puesta en marcha, medición de variables y recolección de datos.

3.2 Especificaciones técnicas, económicas y ambientales del vehículo motocarro

Para las tres ciudades fue implementada la misma referencia de vehículo, sus características técnicas se pueden evidenciar en la Tabla 3-1, la cual se presenta a continuación.

Tabla 3-1. Especificaciones técnicas del motocarro.

MOTOR
4 tiempos, refrigerado por aire y aceite, doble bujía, encendido por chispa, sistema DTS-I
Cilindraje: 236,2 cc
Potencia: 10,5 HP a 4500 rpm
Torque: 19 Nm a 3500 rpm
Encendido: con CDI
CHASIS
Suspensión delantera
Horquilla con brazo oscilante y enlace anti-inmersión, amortiguador doble y resortes de compresión helicoidales.
Suspensión trasera
Ruedas posteriores con suspensión independiente de brazos oscilantes y resortes helicoidales con amortiguadores hidráulicos; le confieren estabilidad y comodidad.
Frenos delanteros: Hidráulico de tambor.
Frenos traseros: Hidráulico de tambor.
Neumático delantero: 4,50 Rin 10
Neumático trasero: 4,50 Rin 10
TRANSMISION
Caja de cambios: 4 velocidades + reversa
DIMENSIONES
Ancho total: 149,3 cm
Largo total: 323 cm
Alto total: 181,8 cm
Peso en seco: 475 kg
Capacidad de pasajeros: 1 conductor
Capacidad de tanque de combustible: 12 litros
Capacidad de carga: 515 kg
Volumen de carga: 3.5 m ³
Eficiencia de combustible:


Nota: Fuente [33]

En cuanto al rendimiento de combustible del vehículo motocarro, se debe tener en cuenta que este es un valor que depende de una serie de factores como lo son: condiciones óptimas del motor, tipo de terreno, carga transportada, modo de conducción, altitud, tránsito denso, entre otras. Según la ficha técnica del vehículo motocarro se evidencia un rendimiento de combustible máximo de 26,41 [km/L], si bien es un valor que se puede tomar como válido para el objeto de estudio, mediante indagaciones en concesionarios de motocarros ubicados en la ciudad de Bogotá, se reportaron valores de rendimiento de combustible cercanos a los 21,13 [km/L], por ende para este caso de estudio se selecciona un valor promedio de 23,77 [km/L] o 90 [km/gal], sin embargo se debe resaltar que este valor de rendimiento de combustible es medido bajo condiciones ideales y por ende tiende a variar su magnitud en condiciones reales de operación.

Para determinar un factor de emisión en cualquier tipo de vehículo se hace necesario la implementación de un ciclo de conducción representativo de cada ciudad, debido a que no se cuenta con un número considerable de vehículos que permita dar veracidad de los datos obtenidos desde el punto de vista estadístico, se hace imposible generar un ciclo de conducción basado en patrones generales de comportamiento, es por esto que para este proyecto, el factor de emisión que se va a utilizar se estableció a través del trabajo de Tesis de Maestría [34] el cual se realizó la estimación del factor de emisión de CO₂ para vehículos *auto-rickshaw*; este es un término equivalente al motocarro. En ese estudio fueron seleccionados 6 automotores Bajaj Torito RE de modelos 2016 hasta 2018, durante ~ 3 meses fueron recolectados datos de altitud, latitud y velocidad con una frecuencia de muestreo de 1 Hz en el municipio de Soledad (Atlántico), finalmente se estimó un factor de emisión de CO₂ a partir del promedio del consumo instantáneo de combustible (g/s) el cual fue medido de forma experimental y la velocidad en cada instante (m/s). El autor realizó un comparativo del consumo de combustible instantáneo obtenido de forma

experimental con el consumo de combustible instantáneo obtenido con el modelo *Comprehensive Modal Emission* (CNEM), el cual se estima a partir de la dinámica del vehículo y la potencia demandada para generar movimiento, el autor obtuvo un error relativo entre ambos métodos del 3,87%. El factor de emisión obtenido fue contrastado con los factores de emisión hallados bajo condiciones reales y bajo los ciclos de conducción legislativos en el medio oriente, en la Tabla 3-2 se evidencia el comparativo de factores de emisión donde se resalta que en su mayoría fueron calculados a partir del IDC (Indian Driving Cycle).

Adicionalmente se resalta que el vehículo motocarro cumple con la normatividad emitida por la Unión Europea en la cual se exige que todo vehículo tipo motocicleta que se ensamble o importe al territorio colombiano a partir del año 2021 debe cumplir con la normativa Euro 3. Según el artículo realizado por el Grupo UMA [33] “la normativa Euro 3 implica una reducción del 64% en las emisiones de Monóxido de Carbono, una disminución del 33% en Hidrocarburos y del 50% en óxidos de Nitrógeno de tu moto”.

Tabla 3-2. Comparativo de factores de emisión de diferentes autores con respecto a la estimación en Soledad (CBD: Central Business District; STDC: Surat three wheeler auto-rickshaw driving cycle; IDC: Indian Driving Cycle).

	<i>Soledad (2022) Presente estudio</i>	<i>IDC (Grieshop et al., 2012)</i>	<i>Guwahati (Choudhary & Gokhale, 2016)</i>	<i>Surat (Bagul et al., 2021)</i>	<i>Telangana (Chandrashek ar et al., 2022)</i>
Tipo de vehículo / Combustible	<i>Auto-rickshaw Gasolina</i>	<i>Auto- rickshaw Gasolina</i>	<i>Auto- rickshaw Gasolina</i>	<i>Auto- rickshaw Gasolina</i>	<i>Auto-rickshaw Diesel</i>
Factor de emisión <i>CO</i>₂ [g/km]	78,03	54,1	160	CBD: 123,79 STDC: 78,89	441,3

Nota: Fuente [35]

A partir de lo anterior se define un factor de emisión de CO₂ equivalente a 78,03 g/km. Es claro que este factor corresponde a las condiciones del ciclo de conducción representativo establecido para un caso y variables particulares de operación.

En la en la Figura 3-1 se evidencia el vehículo motocarro cuyas especificaciones técnicas fueron descritas anteriormente, este motocarro posee un valor comercial en el mercado colombiano de aproximadamente \$20'000.000 COP, sin embargo se pueden tener variaciones en cuanto a lo robusto de sus accesorios internos y externos.

Figura 3-1. Fotografía del vehículo motocarro.



Nota: Fuente [36]

3.3 Verificación de dispositivos de telemetría instalados

Para este estudio son asignados tres vehículos motocarro distribuidos en las tres ciudades correspondientemente, se instaló un dispositivo GPS Concox GTO6F y un sensor de combustible ultrasónico Concox USFSCX; esto se realizó para cada motocarro, los datos enviados por los dispositivos de telemetría fueron almacenados y monitoreados a partir de la plataforma de visualización VisualSat.

3.4 Sistemas de telemetría instalados

3.4.1 GPS Concox GT06F

Según [37] “es un GPS de seguimiento de alta tecnología sobre la base de la red GSM / GPRS y GPS. Integra posicionamiento inteligente, el seguimiento en tiempo real, reproducción de la pista, alarma de vibración, la energía de alarma de corte, control de voz a distancia, corte el suministro de energía y combustible, alarma SOS, alarma de batería baja, alarma de la velocidad excesiva, la Geo-cerca, etc. se aplica a todos los vehículos.”

En la Figura 3-2 se evidencia el dispositivo anteriormente descrito, adicionalmente en la Tabla 3-3 están enunciadas las especificaciones técnicas del instrumento de telemetría.

Figura 3-2. Localizador de vehículo GPS compacto GT06F.



Nota: Fuente [37]

Tabla 3-3. Especificaciones técnicas de GPS GT06F.

Frequency	GSM 850/900/1800/1900MHz
GPRS	Class 12, TCP/IP
Operating Voltage	9-36VDC<300mA
Location Time	Cold Start: <35s
	Hot Start : <2s
Location Accuracy	<10 meters
Operating Temperature	-20°C ~ +70°C
Dimension	98.5(L) x 53.5(W) x 16(H) mm
Weight	87g

Nota: Fuente [37]

3.4.2 Sensor de combustible ultrasónico Concox USFSCX

Es un dispositivo de control de combustible del vehículo que está diseñado para la gestión del combustible, el sensor está equipado con una sonda ultrasónica de alta precisión la cual puede detectar el nivel de combustible en el tanque, posteriormente envía los datos mediante el GPS al servidor y por ultimo genera un reporte de datos. El sensor se instala externamente al tanque. Sus aplicaciones se centran en el repostaje de vehículos de grabación digital, con el fin de evitar robos de combustible, mejorar eficiencia operativa fortaleciendo el nivel operativo y gerencial. [38]

En la Figura 3-3 se evidencia el sensor anteriormente descrito adicionalmente en la Tabla 3-4 están enunciadas las especificaciones técnicas del instrumento de telemetría.

Figura 3-3. Sensor de combustible ultrasónico USFSCX.



Nota: Fuente [38]

Tabla 3-4. Especificaciones técnicas del sensor de combustible ultrasónico USFSCX.

No.	Proyecto	Introducción
1	Tensión de trabajo	DC 9V ~ 36V.
2	Temperatura de trabajo	-30°C~+75°C
3	Temperatura de almacenamiento	-40°C~+85°C.
4	Humedad de trabajo	5% ~ 90%.
5	Consumo máximo de energía	0,4W/12VCC
6	Precisión de la medición	± 0,5%;
7	Resolución de medida	0,1 mm
8	Sonda de grado a prueba de explosiones	Exia II CT6 / Exd II CT5
9	Protección Inquebrantable	IP66
10	Unidad de valor de nivel de líquido	Milímetro
11	Rango de medición	Dependiendo del material y espesor del recipiente. si placa de acero de 5 mm de espesor , el rango de medición es de 5 ~ 100 cm.
12	Interfaz periférica	RS232 / RS485
13	Puerto de comunicación parámetro	Tasa de baudios 9600, sin bit de paridad, 8 bits de datos, 1 bit de parada, sin control de flujo. El sensor suavizará los valores de altura y temperatura y los transmite cada 10 segundos. Todos los datos se pueden personalizar.

Nota: Fuente [38]

3.4.3 Plataforma de visualización

La plataforma utilizada para la recopilación de datos fue VisualSat Monitoreo Satelital, según [39] cuenta con una amplia gama de opciones como lo son: rastrear un vehículo, controlar las actividades de múltiples unidades y desarrollo de herramientas de monitoreo para casos específicos. Si bien la plataforma cuenta con soporte para países como Bolivia, Perú, Venezuela y Colombia, se realiza uso del plan corporativo para Colombia el cual contempla las siguientes características:

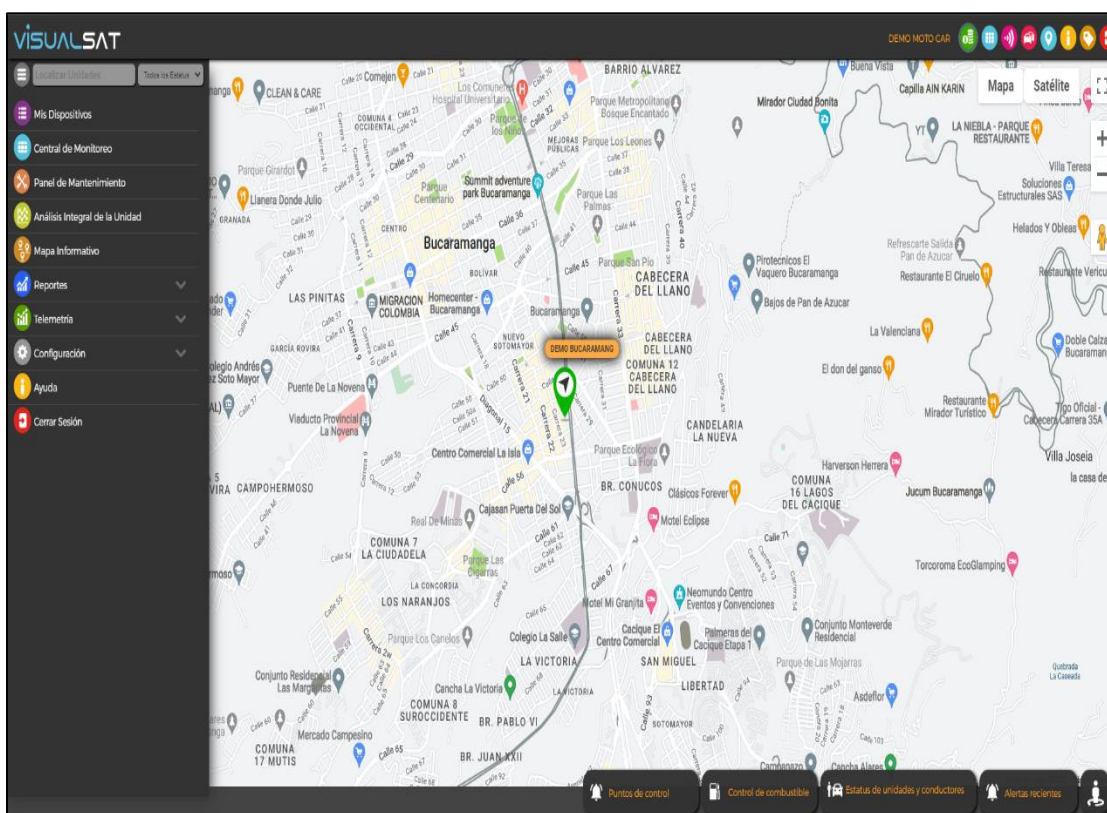
- *Administración de flotas:* clasifica por zona o grupos los recursos.
- *Control de rutas:* identifica la hora de entrada, permanencia y salida de unidades a puntos de interés.
- *Reportes de eficiencia y uso:* información de las unidades en cuanto al uso del motor, kilómetros recorridos, histórico de viajes, velocidad promedio, apertura de puerta, entre otras.

- *Control de mantenimientos*: programar el cambio de aceite y respectivo filtro, rotación de llantas, renovación de documentos del vehículo.

Para este caso de estudio fueron tomadas ciertas variables de interés las cuales se describen en el apartado 3.5.

En la Figura 3-4 se puede observar la interfaz de usuario de la plataforma y las herramientas con las que cuenta.

Figura 3-4. Interfaz de usuario VisualSat.



Nota: Fuente [39]

3.5 Variables medidas

Las variables medidas por medio de los dispositivos de telemetría instalados en los vehículos son las siguientes:

- Fecha [dd/mm/aa]
- Tiempo [hh/mm/ss]
- Latitud y longitud [-]
- Nivel de combustible en el tanque [litro]

3.6 Variables construidas

A partir de las variables medidas, surgen otra serie de variables de construcción, estas son relacionadas a continuación:

- Altitud [msnm]
- Distancia recorrida [km]
- Distancia acumulada [km]
- Intervalo de tiempo de recorrido [h]
- Velocidad [km/h]
- Consumo de combustible en el tanque [L]
- Consumo de combustible corregido [L]
- Consumo de combustible acumulado [L]
- Rendimiento de combustible [km/L]
- Pendiente [°]

3.7 Recolección de datos

Los datos fueron recopilados de la siguiente forma para cada una de las ciudades:

- Para la ciudad de Bucaramanga se recolectaron datos desde el 01 de febrero de 2022 hasta el 11 de marzo de 2022.

- Para la ciudad de Medellín se recolectaron datos desde el 04 de febrero de 2022 hasta el 04 de marzo de 2022.
- Para la ciudad de Bogotá se recolectaron datos desde el 14 de febrero de 2022 hasta el 15 de marzo de 2022.

Los datos reportados por la plataforma VisualSat se dividen en 2 matrices, una recopila el historial de desplazamiento del vehículo, mientras que la otra recopila el nivel de combustible en el tanque, vale la pena resaltar que una matriz es independiente de la otra, es decir que no se van a encontrar la misma cantidad de datos en ambas matrices.

3.7.1 Matriz de coordenadas

La matriz que contiene los datos en la plataforma VisualSat se exporta a una hoja de cálculo de Excel, donde se encuentran los siguientes datos: número, fecha, hora, velocidad, placa, evento (on-off), dirección, latitud, longitud. Un ejemplo de cómo se recolectaron los datos se puede ver en la figura 3-5.

Figura 3-5.Matriz reportada de coordenadas.

#	FECHA	HORA	VELOCIDAD	RPM	COMBUSTIBLE	EVENTO	DIRECCIÓN	LATITUD	LONGITUD
1	13-09-2022	17:43:53	19 KM/H	--	16420 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	4.02464	-73.77531
2	13-09-2022	17:41:56	41 KM/H	--	16420 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	4.01288	-73.77461
3	13-09-2022	17:41:26	43 KM/H	--	16420 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	4.01005	-73.7732
4	13-09-2022	17:40:56	32 KM/H	--	16420 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	4.00728	-73.77191
5	13-09-2022	17:40:26	41 KM/H	--	16420 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	4.00532	-73.77096
6	13-09-2022	17:39:57	38 KM/H	1 Rpm	16420 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	4.00256	-73.76968
7	13-09-2022	17:39:56	38 KM/H	--	16510 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	4.00256	-73.76968
8	13-09-2022	17:39:26	34 KM/H	--	16510 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	3.99993	-73.76841
9	13-09-2022	17:38:56	36 KM/H	--	16510 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	3.99762	-73.76728
10	13-09-2022	17:38:26	27 KM/H	--	16510 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	3.99543	-73.76626
11	13-09-2022	17:37:57	24 KM/H	1 Rpm	16510 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	3.99361	-73.76539
12	13-09-2022	17:37:56	24 KM/H	--	16580 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	3.99361	-73.76539
13	13-09-2022	17:37:26	13 KM/H	--	16580 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	3.99199	-73.76522
14	13-09-2022	17:36:56	0 KM/H	--	16580 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	3.9917	-73.76525
15	13-09-2022	17:36:26	16 KM/H	--	16580 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	3.99068	-73.76555
16	13-09-2022	17:35:56	25 KM/H	--	16580 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	3.98955	-73.7658
17	13-09-2022	17:35:26	7 KM/H	--	16580 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	3.9884	-73.76621
18	13-09-2022	17:34:55	12 KM/H	--	16580 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	3.98844	-73.76638
19	13-09-2022	17:34:25	8 KM/H	--	16580 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	3.9885	-73.76738
20	13-09-2022	17:33:56	21 KM/H	1 Rpm	16580 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	3.98864	-73.76889
21	13-09-2022	17:33:55	21 KM/H	--	16580 %	ON	NO SE CONSULTÓ LA DIRECCIÓN	3.98864	-73.76889

Nota: Esta matriz es a modo de ejemplo y sus datos no están asociados a ningún vehículo. Fuente propia.

Según la matriz anteriormente mencionada, los datos de los cuales se obtiene información son: fecha, hora, latitud y longitud; por ende son los que se tendrán en cuenta para el procesamiento de datos.

3.7.2 Matriz de nivel de combustible en el tanque

La matriz que contiene los datos en la plataforma VisualSat se exporta a una hoja de cálculo de Excel, donde se encuentran los siguientes datos: número, unidad, fecha inicial, hora inicial, fecha final, hora final, capacidad, nivel inicial, nivel final, consumo, suministro, extracciones. Un ejemplo de cómo se recolectaron los datos se puede ver en la Figura 3-6.

Figura 3-6. Matriz reportada de nivel de combustible en el tanque.

#	UNIDAD	FECHA INICIAL	HORA INICIAL	FECHA FINAL	HORA FINAL	CAPACIDAD	NIVEL INICIAL	NIVEL FINAL	CONSUMO	SUMINISTROS	EXTRACCIONES
1	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:39	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
2	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:38	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
3	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:37	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
4	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:36	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
5	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:35	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
6	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:34	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
7	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:33	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
8	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:32	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
9	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:31	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
10	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:30	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
11	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:29	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
12	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:28	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
13	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:27	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
14	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:26	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
15	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:25	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
16	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:24	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
17	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:23	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
18	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:22	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
19	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:21	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
20	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:20	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
21	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:19	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
22	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:18	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
23	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:17	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0
24	DEMO MEDELLIN	20-02-2022	23:54:16	N/A	N/A	12 GAL	N/A	6.75 GAL	N/A	0	0

Nota: Esta matriz es a modo de ejemplo y sus datos no están asociados a ningún vehículo. Fuente propia.

Según la matriz anteriormente mencionada, los datos de los cuales se obtiene información son: fecha inicial, hora inicial, nivel final; por ende son los que se tendrán en cuenta para el procesamiento de datos.

4 Procesamiento de datos

El proceso descrito a continuación se realizará de igual forma para los datos recopilados en las tres ciudades en las que se desarrolló el piloto.

4.1 Agrupamiento de datos

En primera instancia se realiza un cruce de las bases de datos, teniendo como punto de referencia la fecha y hora reportada en la matriz de nivel de combustible y así agrupar con los datos que correspondan en la matriz de coordenadas, obteniendo como resultado una matriz final sobre la cual realizar la construcción de variables.

4.2 Descripción de variables construidas

4.2.1 *Altitud y pendiente*

Esta hace referencia a la distancia vertical que existe entre un punto determinado en el planeta tierra con relación al nivel del mar.

Para la obtención del valor de altitud se utilizó la utilidad en línea GPS Visualizer, esta es de carácter gratuito y con gran facilidad de usar, cuenta con sedes en Portland, Oregón y ha estado en la web desde octubre de 2022. La utilidad cuenta con una amplia variedad de bases de datos DEM (modelo de elevación digital) y la selecciona según considere que es la mejor opción para realizar el cálculo; según [40] las Notas de datos DEM son:

- NED (USGS): El excelente conjunto de datos de elevación nacional del Servicio Geológico de EE. UU. cubre los Estados Unidos, Canadá y México.
- SRTM1(NASA): pertenece a la misión de topografía de radar del transbordador espacial, no contiene el conjunto de datos global completo, pero contiene toda Europa , América Central , Japón , Corea del Sur , Taiwán y Nueva Zelanda , así como la mayor parte de Australia y partes de Sudáfrica.

- PAO1: agrupa modelos digitales de terreno de 1 segundo de arco de países europeos.
- ASTER: es un producto conjunto de la NASA y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI).

Adicionalmente cuenta con una API de Google Maps la cual puede aportar elevaciones para puntos de cualquier parte del mundo y suelen ser en la mayoría de los casos las mismas elevaciones que se verían en Google Earth.

En la Figura 4-1, se observa la interfaz de la utilidad, en donde es necesario seleccionar: archivo.txt que contiene datos de latitud y longitud, marcar la opción de distancia, pendiente (%) y agregar datos de elevación DEM; la mejor fuente disponible.

Debido a que el valor de la pendiente se encuentra en términos de %, se realiza el ajuste en la hoja de cálculo mediante la siguiente línea de código:

=ATAN(x/100)*180/PI(), en donde x corresponde al valor de la celda donde se ubica el valor de la pendiente %.

Figura 4-1. Interfaz GPS Visualizer.

The screenshot displays the GPS Visualizer web interface with the following elements:

- Formato de salida:** Radio buttons for Texto sin formato, GPX, and KML de Google Earth.
- Sube tus archivos aquí:** A section for uploading files with a 10 MB limit. It shows three file slots:
 - Archivo #1: ALTITUD.txt
 - Archivo #2: Ninguno archivo selec.
 - Archivo #3: Ninguno archivo selec.
 A button is located to the right.
- O pega tus datos aquí:** A text input field containing the sample data: "nombre, desc, latitud, longitud". Below it is a dropdown menu for "Forzar que los datos de texto sean de este tipo:" set to "defecto".
- O proporcione la URL de un archivo en la Web:** An empty text input field.
- Delimitador de texto sin formato:** A dropdown menu set to "pestaña".
- Unidades de salida de texto sin formato:** A dropdown menu set to "Métrico".
- Agregar campos estimados:** Checkboxes for velocidad, Bóveda, Pendiente (%), distancia, VMG, and ritmo.
- Agregar datos de elevación DEM:** A dropdown menu set to "mejor fuente disponible".
- Links for [Guarde esta configuración](#) and [Cargar desde guardado](#).
- A green bar at the bottom with a button.

Nota: Fuente propia.

4.2.2 Distancia recorrida

Para la obtención de la distancia entre dos puntos se hace uso de un caso especial de la trigonometría esférica, se conoce como la ley de Haversines. En (4-1) se realiza la descripción de la misma, si bien la ecuación es de alta precisión puede tener problemas en algunos hemisferios como también cuando los puntos son antípodas, es decir que encuentran en los extremos opuestos a la esfera. [41], sin embargo para este caso de aplicación no se tienen en cuenta estos aspectos.

$$d = R \times 2 \arcsin \left(\sqrt{\left(\sin^2 \left(\frac{\Delta \phi}{2} \right) + \cos \phi_s \cos \phi_f \sin^2 \left(\frac{\Delta \lambda}{2} \right) \right)} \right) \quad (4-1)$$

- d es la distancia entre dos puntos.
- R es el radio de la esfera.
- ϕ_s es la altitud del punto 1.
- ϕ_f es la latitud del punto 2.
- $\Delta \lambda$ es la diferencia de las longitudes de los puntos.
- $\Delta \phi$ es la diferencia de las latitudes de los puntos.

Debido a que la tierra no es una esfera perfecta, se hace la aproximación de su radio a 6357,45 kilómetros.

Los valores de distancia recorrida que sean iguales a cero, no serán tenidos en cuenta, ya que esto implica que el vehículo no realizó un desplazamiento.

4.2.3 Intervalo de tiempo

Para la obtención del intervalo de tiempo se aplicó el delta de tiempo correspondiente entre cada dato, para obtener un valor positivo del mismo es necesario organizar las fechas de forma ascendente y aplicar la diferencia de la hora mayor a la menor como se muestra en la Figura 4-2. Al inicio de cada día se generará error en el intervalo calculado, esto se debe a que la hoja de

cálculo no reconoce valores negativos de tiempo, por lo tanto se realiza el reemplazo de estos por el valor cero.

Figura 4-2. Calculo del intervalo de tiempo.

	FECHA INICIAL	HORA INICIAL	INTERVALO DE TIEMPO
5268	12/03/2022	18:53:43	0:05:00
5269	12/03/2022	18:55:13	0:01:30
5270	12/03/2022	19:08:44	0:13:31
5271	12/03/2022	19:11:43	0:02:59
5272	12/03/2022	19:16:06	0:04:23
5273	12/03/2022	19:31:06	0:15:00
5274	12/03/2022	19:46:06	0:15:00
5275	12/03/2022	20:16:06	0:30:00
5276	12/03/2022	20:31:06	0:15:00
5277	12/03/2022	20:46:06	0:15:00
5278	12/03/2022	21:01:06	0:15:00
5279	12/03/2022	21:46:06	0:45:00
5280	12/03/2022	22:01:06	0:15:00
5281	12/03/2022	22:31:06	0:30:00
5282	12/03/2022	22:46:06	0:15:00
5283	12/03/2022	23:01:06	0:15:00
5284	12/03/2022	23:16:07	0:15:01
5285	12/03/2022	23:46:07	=[@[HORA INICIAL]]-C5284

Nota: Fuente propia.

Debido a que el intervalo de tiempo se encuentra en formato de hh:mm:ss (horas: minutos: segundos), en una nueva columna se realiza el producto de la columna de intervalo de tiempo y valor numérico 24, con el fin de obtener el valor del intervalo de tiempo en horas, tal y como se evidencia en la Figura 4-3.

Figura 4-3. Modificación a intervalo de tiempo en horas.

D	E
INTERVALO DE TIEMPO	TIEMPO(horas)
	=[@[INTERVALO DE TIEMPO]]*24
0:03:00	0.05
0:03:00	0.05
0:09:00	0.15
0:16:01	0.266944444
0:27:00	0.45
0:07:19	0.121944444
0:39:00	0.65
0:12:00	0.2
0:09:00	0.15

Nota: Fuente propia.

4.2.4 Velocidad

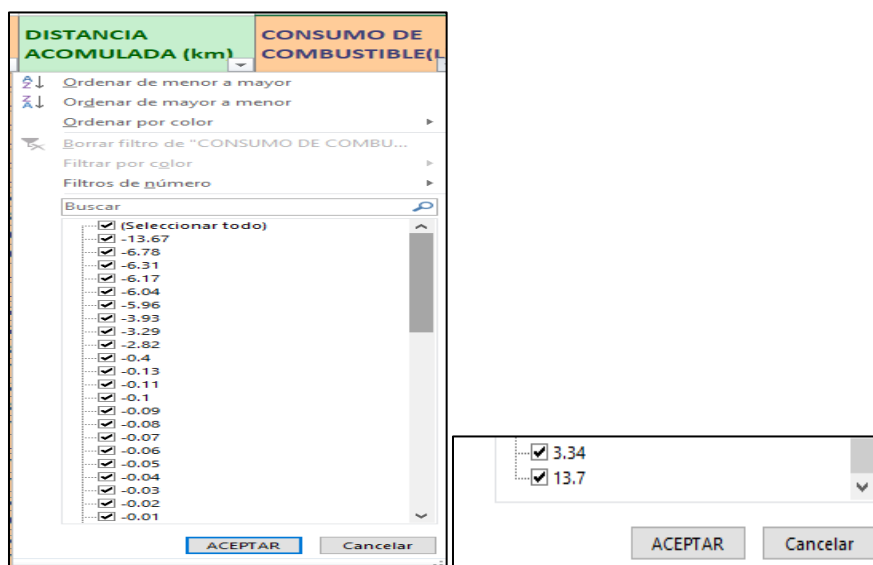
Partiendo de la definición de velocidad en donde está se refiere al cambio de la posición de un objeto con respecto al tiempo, para este caso ya se evaluó la distancia recorrida y el tiempo que empleó en realizar el desplazamiento, por lo tanto se hace la respectiva división de las variables como se observa en la ecuación 4-2 . Los valores de velocidad que presenten gran dispersión no serán tenidos en cuenta.

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{distancia recorrida}(km)}{\text{intervalo de tiempo}(h)} \quad (4-2)$$

4.2.5 Consumo de combustible en el tanque

El valor del consumo de combustible se calcula a partir de diferencia a la medición del nivel de tanque inicial con respecto a la final, sin embargo se evidencian valores de consumo negativos, lo cual posiblemente se genera a partir de una lectura errónea del sensor de nivel de combustible o porque se realizó un retanqueo de combustible en el vehículo, debido a esto se realiza un ajuste al consumo de combustible de tal forma que en las celdas donde el consumo de combustible sea menor a cero, este valor sea reemplazado por cero. Por último los valores en donde se evidencie un consumo mayor a 1 litro, de igual forma son reemplazados por cero. En la Figura 4-4 se evidencia los posibles escenarios. Finalmente se obtiene un valor de consumo de combustible corregido.

Figura 4-4. Consumos de combustible negativos y mayores a 1 litro.



Nota: Fuente propia.

4.2.6 Rendimiento de combustible

El rendimiento nace de la relación que hay entre la distancia que un vehículo recorre y la cantidad de combustible que consume para realizar dicho recorrido, en este caso se hace un análisis descriptivo usando el indicador de [km/L]. Para este caso se calcula un valor por día de operación. Para garantizar un indicador de rendimiento de combustible acertado, se hace necesario discriminar aquellos valores en donde el recorrido realizado en el día es inferior a 3 km, ya que esta distancia no es congruente con una ruta de distribución zonal, en estos días posiblemente el vehículo fue usado para labores de mantenimiento. En la Figura 4-5 se evidencia en color amarillo un posible escenario de distancias acumuladas inferiores a 2 km.

Figura 4-5. Valores de distancias por día.

Etiquetas de fila	Suma de DISTANCIA (km)
1/02/2022	10.46848
2/02/2022	9.68063
3/02/2022	5.44208
4/02/2022	9.95376
5/02/2022	11.26716
6/02/2022	0.96456
7/02/2022	6.96903
8/02/2022	6.05413
9/02/2022	11.61952
10/02/2022	13.96938
11/02/2022	12.97767
12/02/2022	12.58501
14/02/2022	7.65165
15/02/2022	13.39453
16/02/2022	8.17065
17/02/2022	0.85416
18/02/2022	1.17843
19/02/2022	1.74506
21/02/2022	1.66545
22/02/2022	12.41181
23/02/2022	1.01602
24/02/2022	8.98653
25/02/2022	0.27859
26/02/2022	8.30638
28/02/2022	16.14127
1/03/2022	13.79869
2/03/2022	14.66507
3/03/2022	14.81303
4/03/2022	0.19566
5/03/2022	22.27444
6/03/2022	0.19342
7/03/2022	16.84422
8/03/2022	0.8611

Nota: Fuente propia.

5 Análisis de datos

5.1 Prueba piloto en la ciudad de Bucaramanga

5.1.1 Datos recolectados en prueba piloto Bucaramanga

Al finalizar la etapa de recolección de datos se obtuvieron los datos reportados en la Tabla 5-1 para la matriz de coordenadas y la matriz de nivel de combustible en el tanque.

Tabla 5-1. Datos recolectados en Bucaramanga.

	Matriz de coordenadas	Matriz de nivel de combustible en el tanque
Días	37	45
Datos recolectados	26.206	12.041

Nota: Fuente propia.

Posterior al cruce de la información y procesamiento de datos encontrados en la matriz de coordenadas y la matriz de nivel de combustible en el tanque, los datos obtenidos se almacenan en la matriz final, tal y como se observa en la Figura 5-1, adicionalmente en la Tabla 5-2 se tiene un resumen general de los días y la cantidad de datos recolectados.

Figura 5-1. Matriz final de datos Bucaramanga.

FECHA INICIAL	HORA INICIAL	TIEMPO [h]	NIVEL FINAL [L]	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD [msnm]	PENDIENTE [°]	DISTANCIA [km]	DISTANCIA ACUMULADA [km]	CONSUMO DE COMBUSTIBLE [L]	CONSUMO DE COMBUSTIBLE CORREGIDO [L]	CONSUMO DE COMBUSTIBLE ACUMULADO [L]	VELOCIDAD [km/h]
1/02/2022	0:07:15	0.00	4.95	7.15412	-73.12954	679.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1/02/2022	0:10:15	0.05	4.95	7.15412	-73.12955	679.5	8.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
1/02/2022	0:13:15	0.05	4.95	7.15412	-73.12954	679.4	-4.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
1/02/2022	0:22:15	0.15	4.95	7.15411	-73.12954	679.6	9.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
1/02/2022	0:38:16	0.27	4.95	7.15412	-73.12954	679.4	-9.37	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
1/02/2022	1:05:16	0.45	4.95	7.15413	-73.12954	679.3	-9.37	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
1/02/2022	1:12:35	0.12	4.95	7.15408	-73.12957	680.4	10.43	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05
1/02/2022	1:51:35	0.65	4.95	7.15411	-73.12953	679.5	-9.37	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01
1/02/2022	2:03:35	0.20	4.95	7.15414	-73.12951	678.8	-10.48	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02
1/02/2022	2:12:35	0.15	4.95	7.15411	-73.12954	679.6	10.04	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03
1/02/2022	2:18:35	0.10	4.95	7.15412	-73.12954	679.4	-9.37	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01
1/02/2022	2:27:35	0.15	4.95	7.15413	-73.12954	679.3	-9.37	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01
1/02/2022	2:42:35	0.25	4.95	7.15414	-73.12955	679.2	-3.21	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01
1/02/2022	2:48:35	0.10	4.95	7.15415	-73.12954	678.9	-10.04	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02
1/02/2022	2:51:35	0.05	4.95	7.15417	-73.12956	678.7	-2.98	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.06
1/02/2022	2:57:35	0.10	4.95	7.15415	-73.12955	679.0	5.94	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.02
1/02/2022	3:03:35	0.10	4.95	7.15414	-73.12959	679.5	7.01	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.05
1/02/2022	3:06:35	0.05	4.95	7.15416	-73.12957	679.0	-9.98	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.06
1/02/2022	3:12:35	0.10	4.95	7.15414	-73.12958	679.4	10.43	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.02
1/02/2022	3:15:35	0.05	4.95	7.15415	-73.12958	679.3	-9.31	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.02
1/02/2022	3:21:35	0.10	4.95	7.15414	-73.12956	679.3	-0.17	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.02
1/02/2022	3:27:35	0.10	4.95	7.15415	-73.12958	679.3	0.17	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.02
1/02/2022	3:33:35	0.10	4.95	7.15412	-73.12959	679.9	10.26	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.04

Nota: Fuente propia.

Tabla 5-2. Matriz final de datos en Bucaramanga.

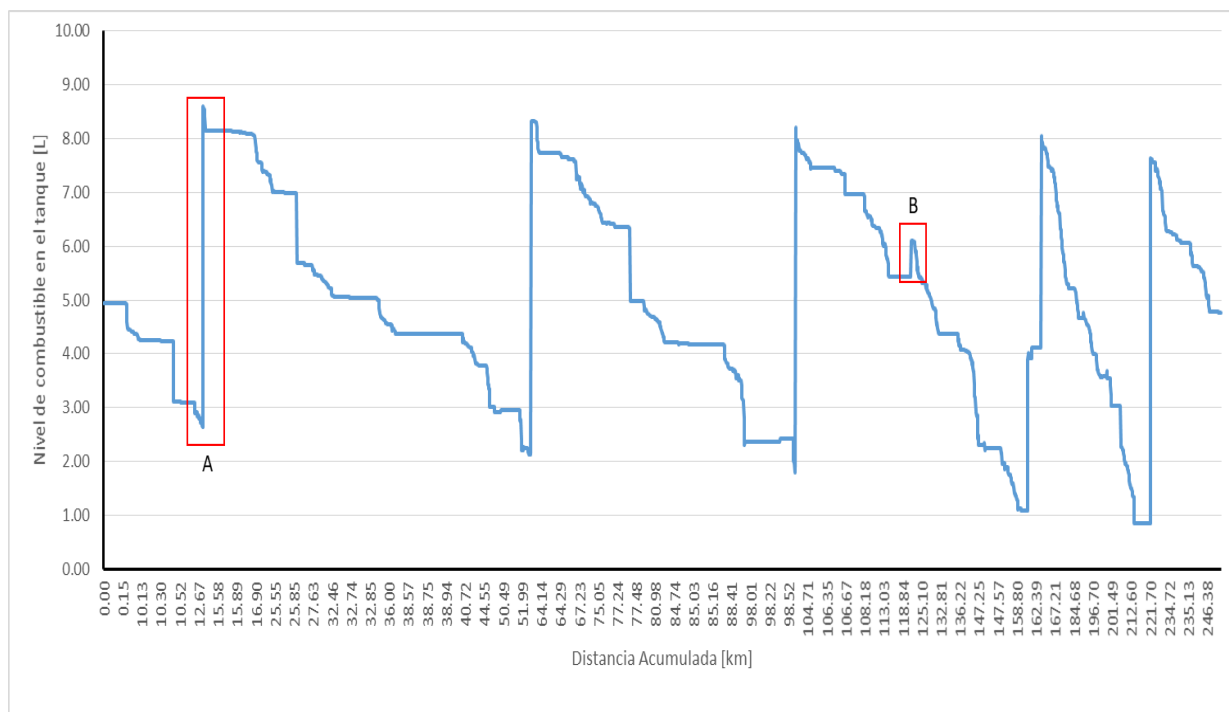
	Matriz final
Días	20
Datos recolectados	2.937

Nota: Fuente propia.

En una primera instancia en la Figura 5-2 se realiza un análisis a partir de los datos del nivel de combustible en el tanque y la distancia acumulada, en donde el sector demarcado como (A) implica que el vehículo fue cargado con combustible, sin embargo se tienen datos atípicos como se evidencia en el sector demarcado como (B), en donde el nivel de tanque incrementó un aproximado de medio litro de combustible lo que se puede atribuir a una lectura errónea en el

sensor de nivel de tanque de combustible debido a una perturbación en el vehículo; defínase esta como un bache, inclinación de la pendiente, entre otras. Dicho lo anterior se determina que el vehículo fue cargado con combustible un total de 5 veces durante toda la prueba piloto.

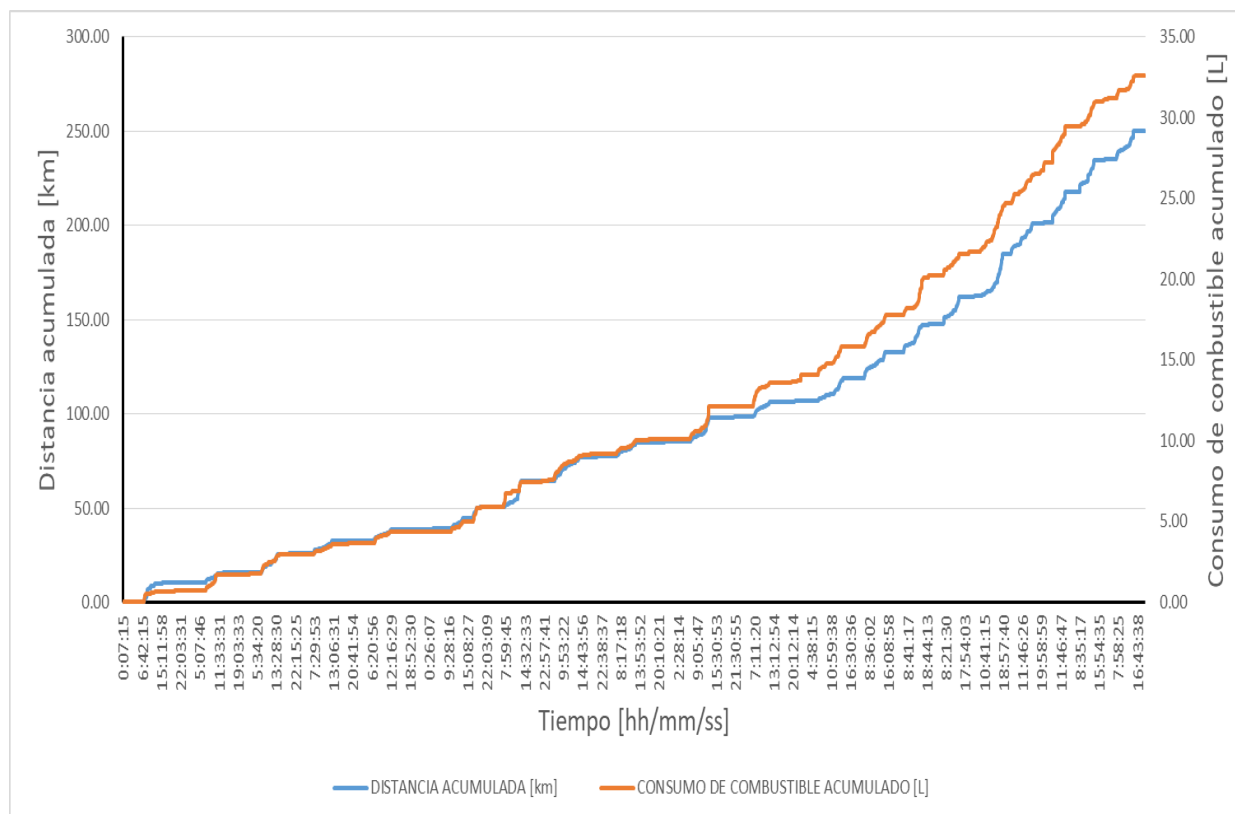
Figura 5-2. Nivel de combustible en el tanque vs distancia acumulada, motocarro Bucaramanga.



Nota: Fuente propia.

En cuanto al análisis del consumo de combustible acumulado por día de operación se encuentra una relación directamente proporcional respecto a la distancia acumulada por día que recorre el vehículo, tal y como se evidencia en la Figura 5-3, este análisis no aplica para el nivel de combustible en el tanque, ya que como se describió anteriormente en el nivel de tanque se evidencian aumentos de combustible, por ende su relación no es directamente proporcional a la distancia recorrida.

Figura 5-3. Distancia acumulada y consumo de combustible acumulado vs tiempo, motocarro Bucaramanga.



Nota: Fuente propia.

5.1.2 Eficiencia energética del motocarro en Bucaramanga

A partir de los datos de distancia y el consumo de combustible corregido, se obtiene el rendimiento del motocarro en términos de la cantidad de combustible empleada para realizar un desplazamiento, en la Tabla 5-3 se muestran los resultados de rendimiento del vehículo obtenidos diariamente, como también se evidencia una agrupación de días los cuales corresponden a las semanas de operación.

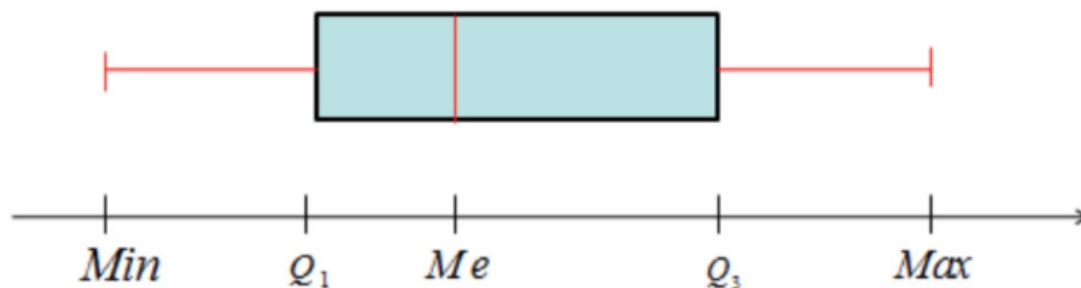
Tabla 5-3. Rendimiento de motocarro Bucaramanga.

SEMANA	FECHA	Suma de DISTANCIA [km]	Promedio de ALTITUD [msnm]	Promedio de PENDIENTE [°]	Promedio de VELOCIDAD [km/h]	Suma de CONSUMO DE COMBUSTIBLE CORREGIDO [L]	Suma de RENDIMIENTO [km/L]
1	1/02/2022	10.47	705.84	0.26	0.49	0.72	14.54
	3/02/2022	5.44	708.09	0.08	0.29	1.02	5.34
	4/02/2022	9.95	674.39	0.18	0.74	1.22	8.16
2	7/02/2022	6.97	666.51	0.21	0.44	0.68	10.25
	8/02/2022	6.05	716.65	-0.27	0.37	0.71	8.53
	9/02/2022	11.62	702.37	0.03	0.77	1.58	7.35
3	10/02/2022	13.97	719.41	0.75	0.95	1.61	8.68
	11/02/2022	12.98	681.24	0.50	0.86	1.67	7.77
	14/02/2022	7.65	671.62	0.04	0.52	0.91	8.41
4	15/02/2022	13.39	710.96	1.09	0.81	2.01	6.66
	16/02/2022	8.17	712.89	-0.80	0.57	1.60	5.11
	22/02/2022	12.41	734.78	0.82	0.88	2.11	5.88
5	1/03/2022	13.80	798.49	-0.19	1.67	1.98	6.97
	2/03/2022	14.67	795.64	0.49	1.71	2.45	5.99
	3/03/2022	14.81	802.35	-0.05	1.29	1.42	10.43
	5/03/2022	22.27	813.69	0.54	2.36	2.91	7.65
6	7/03/2022	16.84	779.82	-0.30	2.06	2.42	6.96
	9/03/2022	16.45	805.72	-0.15	1.37	2.46	6.69
	10/03/2022	17.18	802.87	-0.04	1.54	1.73	9.93
	11/03/2022	15.07	748.01	0.09	2.02	1.39	10.84

Nota: Fuente propia.

Con el fin de evidenciar una comparación entre los rendimientos obtenidos semanalmente, se hace uso del diagrama de caja el cual es utilizado para el análisis de datos explícitos, según [42] “Los gráficos de caja más sencillos muestran todo el rango de variación desde el mínimo hasta el máximo, el rango de variación probable y un valor típico. Un gráfico de caja también mostrará los valores atípicos”. En la Figura 5-4 se evidencian los cinco puntos a tener en cuenta para la construcción del diagrama.

Figura 5-4. Esquema del diagrama de caja.



Nota: Fuente [42]

Dado lo anterior, se realiza la construcción del diagrama de cajas para el rendimiento del vehículo motocarro, en la Figura 5-5 se muestran los campos calculados y en la Figura 5-6 se evidencia el diagrama de cajas obtenido.

Figura 5-5. Campos calculados para el diagrama de cajas Bucaramanga.

Rendimiento de combustible [km/L]					
Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6
14.54	10.25	8.68	6.66	6.97	6.96
5.34	8.53	7.77	5.11	5.99	6.69
8.16	7.35	8.41	5.88	10.43	9.93
				7.65	10.84

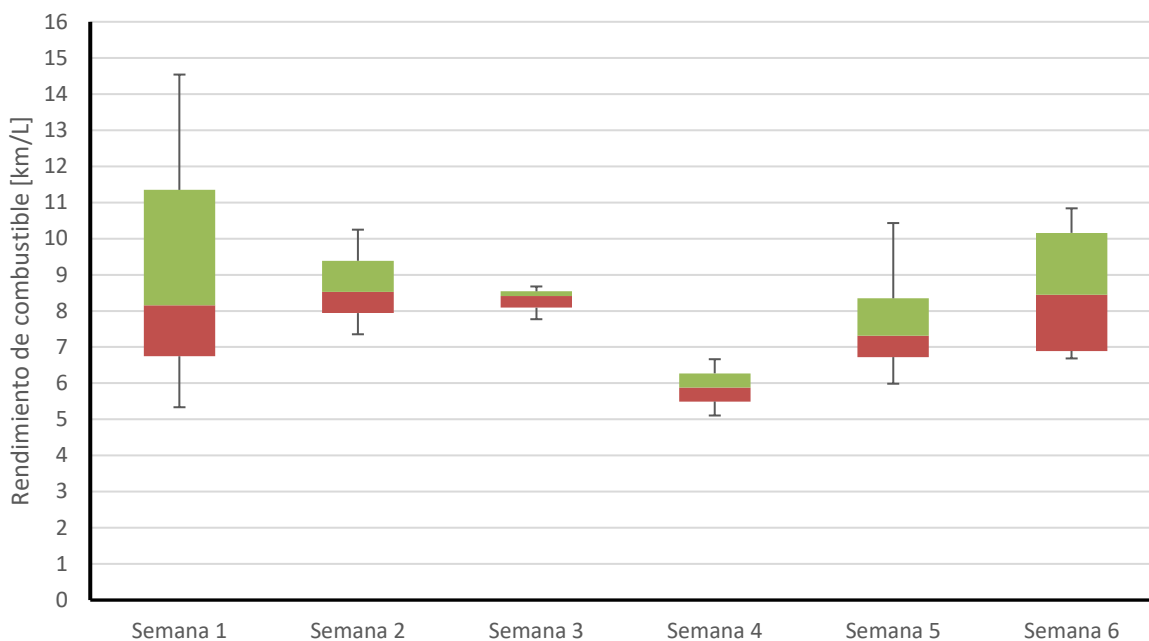
Columna1	Cuartil	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6
MIN	0	5.34	7.35	7.77	5.11	5.99	6.69
Q1	1	6.75	7.94	8.09	5.49	6.72	6.89
MEDIANA	2	8.16	8.53	8.41	5.88	7.31	8.45
Q3	3	11.35	9.39	8.54	6.27	8.35	10.16
MAX	4	14.54	10.25	8.68	6.66	10.43	10.84

CAJA 1		6.75	7.94	8.09	5.49	6.72	6.89
CAJA 2		1.41	0.59	0.32	0.39	0.59	1.56
CAJA 3		3.19	0.86	0.13	0.39	1.04	1.71

BIGOTE SUPERIOR		3.19	0.86	0.13	0.39	2.08	0.68
BIGOTE INFERIOR		1.41	0.59	0.32	0.39	0.74	0.21

Nota: Fuente propia.

Figura 5-6. Diagrama de cajas para rendimiento de combustible en Bucaramanga.



Nota: Fuente propia.

Se evidencia que la semana 3 y 4 se obtuvo un menor rango entre los datos de rendimiento de combustible, sin embargo se evidencia mayor dispersión en las demás semanas, esto se debe a que los trayectos o rutas no eran las mismas cada día, como tampoco el vehículo transportaba la misma cantidad de masa, es decir que a pesar de recorrer distancias más cortas el vehículo obtuvo un mayor consumo de combustible que cuando recorrió las distancias más largas.

Con el fin de obtener un intervalo de confianza para el rendimiento de combustible del vehículo motocarro en el piloto desarrollado en Bucaramanga, se hace uso de la media, la desviación estándar, el número de datos, el nivel de significancia y el intervalo, en la Tabla 5-4 se observa el intervalo de confianza obtenido. Debido a que se tiene un número de datos menor a 30, se hace uso de la distribución “t Student” para calcular el intervalo de confianza [43].

Tabla 5-4. Intervalo de confianza de rendimiento de combustible en motocarro Bucaramanga.

Media	8,10
Desviación estándar	2,25
Número de datos	20
Nivel de significancia	0,05
Intervalo	1,05
Intervalo de confianza	7,05 – 9,16

Nota: Fuente propia.

De lo anterior se concluye que con un nivel de confianza del 95% el cual es equivalente al nivel de significancia del 0,05, la media del rendimiento de combustible en el motocarro implementado en la prueba piloto de Bucaramanga es de 8,10 [km/L] con un intervalo de confianza entre 7,05 [km/L] y 9,16 [km/L].

5.1.3 Emisiones contaminantes generadas por el motocarro en Bucaramanga.

A partir del factor de emisión de CO₂ determinado en la Tabla 3-2, se realiza la estimación de los gramos de contaminante generados teniendo en cuenta el desplazamiento total que realizó el vehículo al finalizar la prueba piloto. En la Tabla 5-3 se evidencia las distancias recorridas para cada día de operación, realizando la sumatoria de estas se obtiene un total de 250,17 km de recorrido.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 5-5 se evidencia la cantidad en gramos de contaminante generados por el vehículo durante su operación.

Tabla 5-5. Emisiones generadas por motocarro en Bucaramanga.

Contaminante criterio	Cantidad emitida [g]
CO₂	19.520,77

Nota: Fuente propia.

5.1.4 Costo de combustible durante operación en Bucaramanga

Teniendo en cuenta que el combustible que utiliza el vehículo motocarro es gasolina, se realiza una estimación del costo total de combustible a partir de la media de rendimiento de combustible, el costo de un galón de gasolina, y el desplazamiento total que realizó el vehículo. En (5-1) se evidencia el total de galones consumidos en base a la media de rendimiento de combustible.

$$250,17 [km] * \frac{1 [L]}{8,10 [km]} = 30,88 [L] \quad (5-1)$$

Según la Comisión de Regulación de Energía y Gas [44] los precios de referencia del galón de gasolina y Diesel para las ciudades Bucaramanga, Medellín y Bogotá se evidencian en la Tabla 5-6. Estos precios son presentados por el ente regulador con fecha de corte de julio del año 2022. Inicialmente el indicador de combustible se encuentra en unida de galón, por lo tanto se realiza la correspondiente equivalencia en donde 1 galón estadounidense es igual a 3,78541 litros.

Tabla 5-6. Precio para 1 litro de combustible en cada ciudad.

Ciudad	Tipo de combustible	Cantidad [litro]	Precio [COP]
Bucaramanga	Gasolina	1	\$2.450,72
	Diesel		\$2.397,62
Medellín	Gasolina	1	\$2.500,12
	Diesel		\$2.459,70
Bogotá	Gasolina	1	\$2.515,71
	Diesel		\$2.457,32

Nota: Fuente [44]

A partir del precio de 1 litro de gasolina en la ciudad de Bucaramanga, en (5-2) se obtiene el costo total del combustible consumido durante la operación del vehículo motocarro.

$$30,88 [L] * \frac{\$2.450,72[COP]}{1[L]} = \$75.678,23 [COP] \quad (5-2)$$

5.1.5 Consolidados de carga para el motocarro en Bucaramanga.

Teniendo en cuenta la información recopilada a través de los consolidados de carga que se generan antes de iniciar el reparto de última milla, en la Tabla 5-7 se evidencian los resultados obtenidos a partir fecha en la que se origina el consolidado, la cantidad de facturas entregadas y la masa equivalente a estas.

Tabla 5-7. Consolidado de carga motocarro Bucaramanga.

Fecha	# Facturas	Masa transportada [kg]
1/02/2022	54	101.03
3/02/2022	50	93.55
4/02/2022	62	116.02
7/02/2022	73	212.39
8/02/2022	47	87.94
9/02/2022	64	121.84
10/02/2022	47	87.94
11/02/2022	52	97.29
14/02/2022	64	120.12
15/02/2022	51	95.42
16/02/2022	48	89.81
22/02/2022	60	112.26
1/03/2022	52	97.29
2/03/2022	49	91.68
3/03/2022	40	78.28
5/03/2022	50	93.55
7/03/2022	45	84.20
9/03/2022	42	78.58
10/03/2022	38	71.10
11/03/2022	47	87.93

Nota: Fuente propia

Por último en la Tabla 5-8 se obtiene el total de facturas entregadas, la media de facturas entregadas, el total de masa transportada y la media de masa transportada; para el vehículo motocarro de la empresa 1.

Tabla 5-8. Totales y medias de consolidados de motocarro empresa 1.

Empresa	Total de entregas	Media de entregas por día	Total de masa transportada [kg]	Media de masa transportada por día [kg]
1	1.035	51,75	2.018,21	100,91

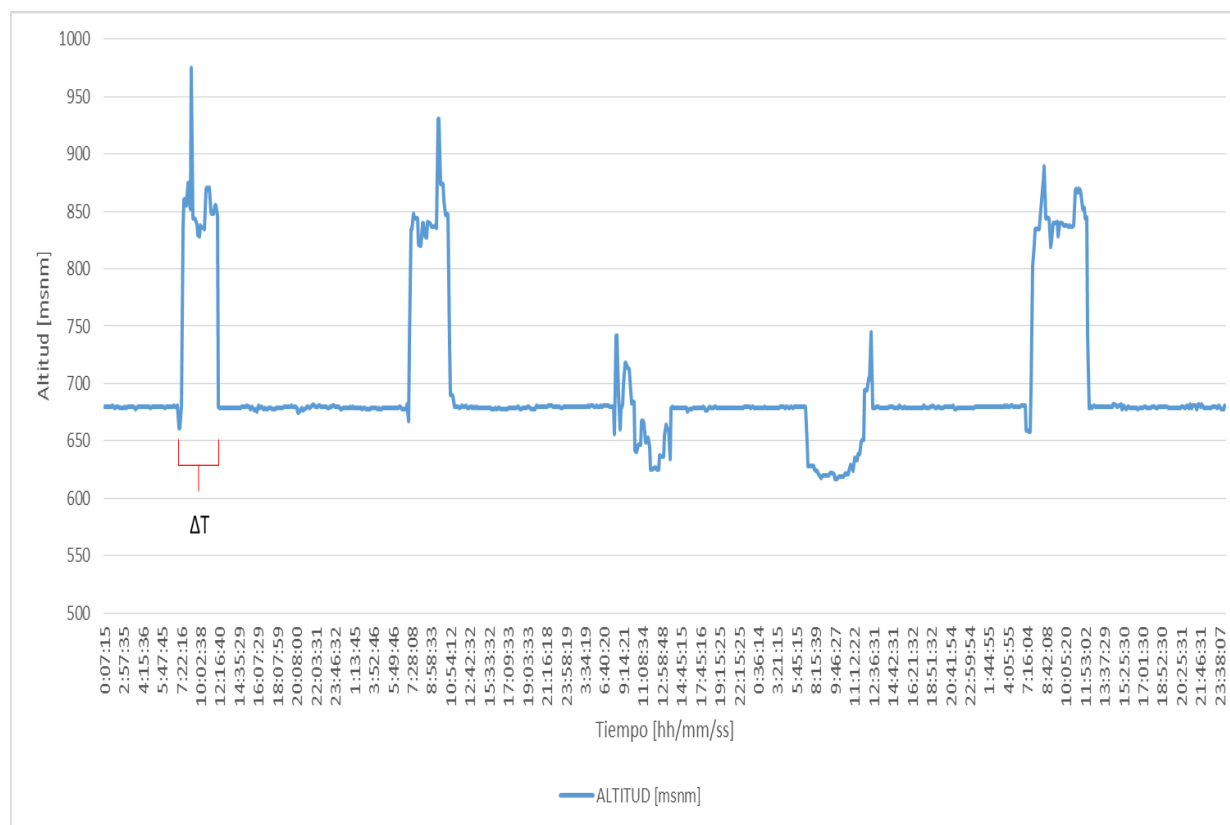
Nota: Fuente propia.

5.1.6 Logística en prueba piloto Bucaramanga.

En cuanto al indicador logístico se realizó una estimación de los tiempos de operación por día del vehículo tomando como referencia la variación de la altitud tal y como se evidencia en la Figura 5-7. En donde se identifica un ΔT el cual corresponde al tiempo en el cual el vehículo estuvo realizando entregas, el horario de operación oscila entre las 7:00 a.m. y 8:00 a.m. hasta las 12:00 m y 1:00 p.m., es decir que el vehículo tiene margen de operación de 5 horas diarias.

Al realizar el comparativo con la media de entregas por día, se obtiene que el vehículo realiza un promedio de 10 entregas / h. Se debe resaltar que se pudieron realizar varias entregas en un mismo punto.

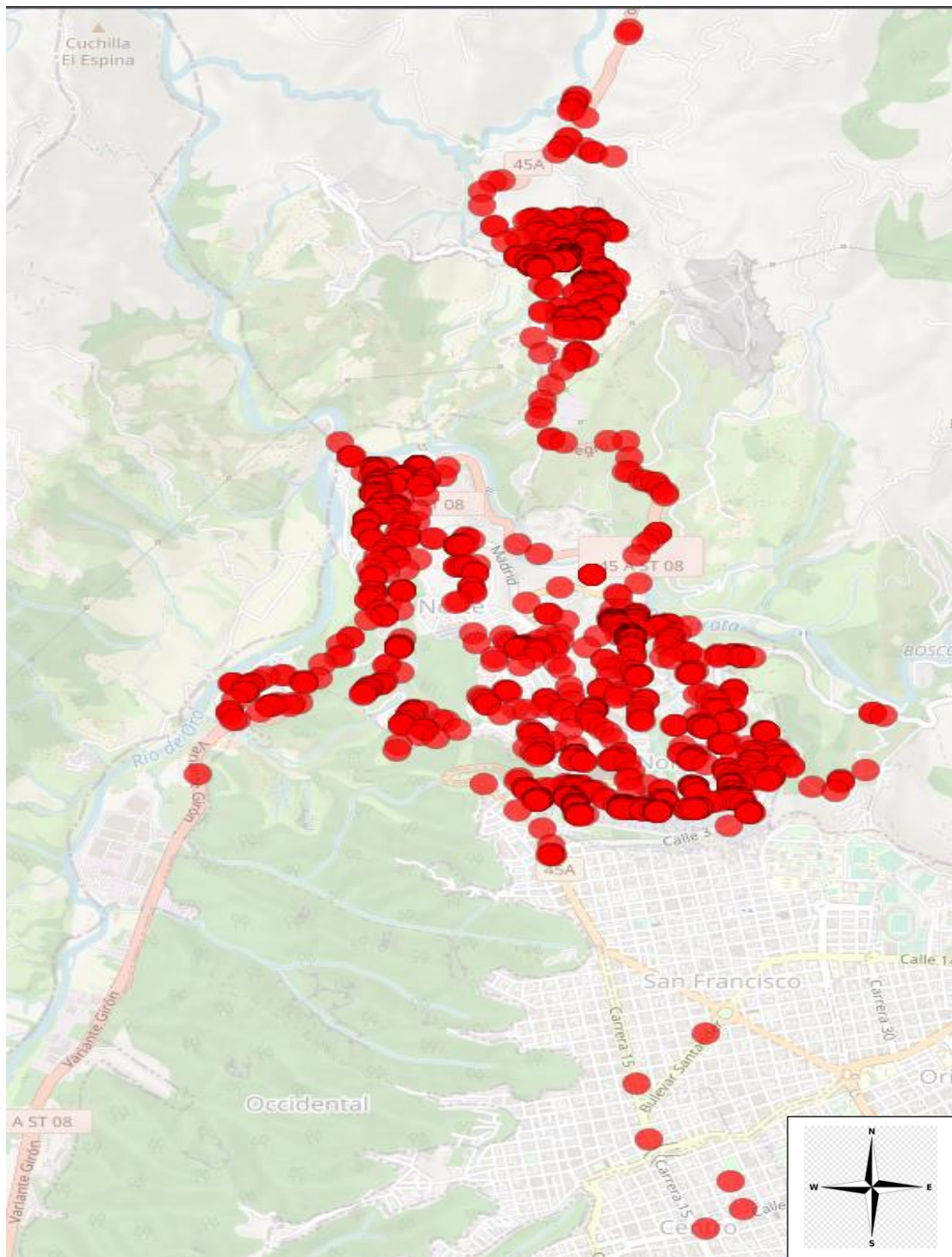
Figura 5-7. Altitud vs tiempo de operación durante 5 días, empresa 1.



Nota: Fuente propia.

En la Figura 5-8 se evidencia las zonas sobre las cuales se realizó el reparto de mercancías de última milla, es notorio que las rutas se realizaron al norte de la ciudad de Bucaramanga y sus municipios aledaños.

Figura 5-8. Georreferenciación de puntos de distribución en Bucaramanga.



Nota: Fuente propia.

5.2 Prueba piloto en la ciudad de Medellín

5.2.1 Datos recolectados en prueba piloto Medellín

Al finalizar la etapa de recolección de datos se obtuvieron los datos reportados en la Tabla 5-9 para la matriz de coordenadas y la matriz de nivel de combustible en el tanque.

Tabla 5-9. Datos recolectados en Medellín.

	Matriz de coordenadas	Matriz de nivel de combustible en el tanque
Días	37	46
Datos recolectados	36.854	33.722

Nota: Fuente propia.

Posterior al cruce de la información y procesamiento de datos encontrados en la matriz de coordenadas y la matriz de nivel de combustible en el tanque, los datos obtenidos se almacenan en la matriz final, tal y como se observa en la Figura 5-9, adicionalmente en la Tabla 5-10 se tiene un resumen general de los días y la cantidad de datos recolectados.

Figura 5-9. Matriz final de datos Medellín.

FECHA INICIAL	HORA INICIAL	TIEMPO [h]	NIVEL FINAL [L]	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD [msnm]	PENDIENTE [°]	DISTANCIA [km]	DISTANCIA ACUMULADA [km]	CONSUMO DE COMBUSTIBLE [L]	CONSUMO DE COMBUSTIBLE CORREGIDO [L]	CONSUMO DE COMBUSTIBLE ACUMULADO [L]	VELOCIDAD [km/h]
4/02/2022	0:24:26	0.00	3.37	6.18489	-75.58908	1520.30	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
4/02/2022	0:37:03	0.21	3.36	6.18495	-75.58912	1520.10	-1.26	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.04
4/02/2022	2:46:17	2.15	3.35	6.18484	-75.58921	1521.00	3.21	0.02	0.05	0.01	0.01	0.02	0.01
4/02/2022	2:54:09	0.13	3.35	6.18484	-75.58912	1520.60	-2.12	0.01	0.06	0.00	0.00	0.02	0.08
4/02/2022	3:12:42	0.31	3.35	6.18488	-75.58919	1520.70	0.46	0.01	0.07	0.00	0.00	0.02	0.03
4/02/2022	3:21:37	0.15	3.35	6.18482	-75.58915	1520.80	0.80	0.01	0.08	0.00	0.00	0.02	0.05
4/02/2022	3:27:21	0.10	3.35	6.18495	-75.58912	1520.10	-2.69	0.01	0.09	0.00	0.00	0.02	0.15
4/02/2022	3:43:00	0.26	3.35	6.18490	-75.58919	1520.60	2.92	0.01	0.10	0.00	0.00	0.02	0.04
4/02/2022	4:10:37	0.46	3.35	6.18484	-75.58916	1520.70	1.09	0.01	0.11	0.00	0.00	0.02	0.02
4/02/2022	4:33:57	0.39	3.34	6.18486	-75.58920	1520.90	1.20	0.00	0.11	0.01	0.01	0.03	0.01
4/02/2022	5:46:38	1.21	3.34	6.18483	-75.58923	1521.10	3.60	0.00	0.12	0.00	0.00	0.03	0.00
4/02/2022	5:47:23	0.01	3.34	6.18479	-75.58931	1521.70	3.43	0.01	0.13	0.00	0.00	0.03	0.79
4/02/2022	6:37:45	0.84	3.31	6.18487	-75.58911	1520.50	-3.03	0.02	0.15	0.03	0.03	0.06	0.03
4/02/2022	6:38:18	0.01	3.06	6.18496	-75.58906	1519.90	-2.75	0.01	0.16	0.25	0.25	0.31	1.24
4/02/2022	7:06:22	0.47	3.05	6.18494	-75.58919	1520.40	1.95	0.01	0.18	0.01	0.01	0.32	0.03
4/02/2022	7:32:56	0.44	3.01	6.18495	-75.58909	1520.00	-1.95	0.01	0.19	0.04	0.04	0.36	0.03
4/02/2022	8:03:21	0.51	3.01	6.18486	-75.58923	1521.00	3.03	0.02	0.21	0.00	0.00	0.36	0.04
4/02/2022	8:27:05	0.40	3.01	6.18486	-75.58904	1520.30	-1.89	0.02	0.23	0.00	0.00	0.36	0.05
4/02/2022	8:38:51	0.20	3.00	6.18495	-75.58901	1519.80	-2.58	0.01	0.24	0.01	0.01	0.37	0.05
4/02/2022	8:39:51	0.02	2.97	6.18288	-75.59008	1521.10	0.29	0.26	0.50	0.03	0.03	0.40	15.46

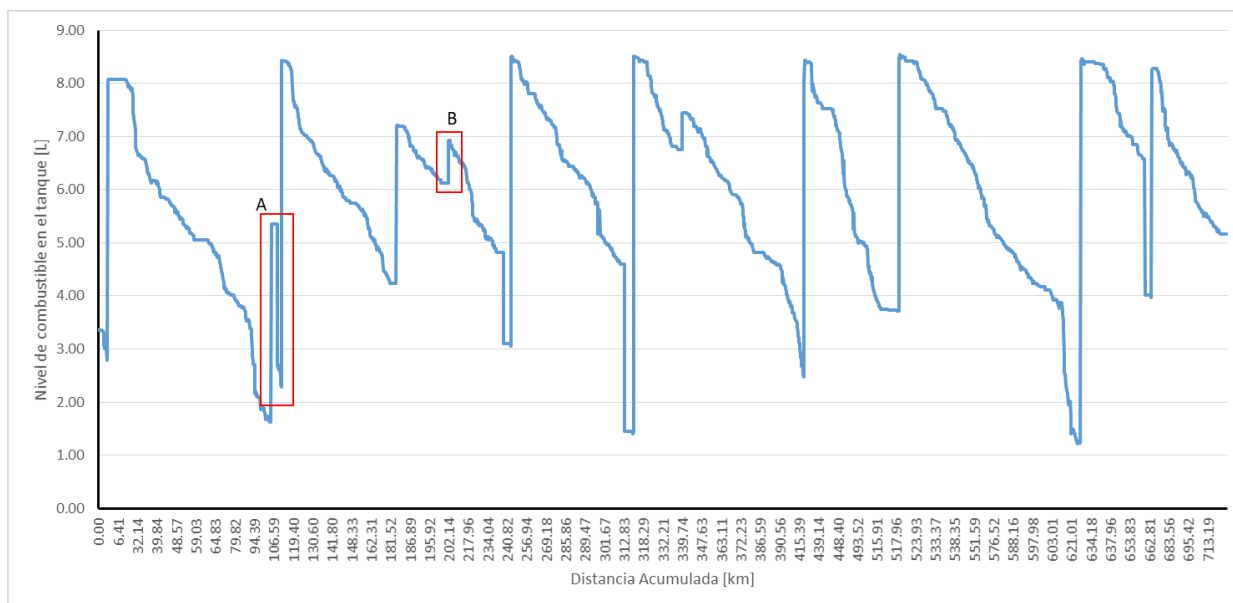
Nota: Fuente propia.

Tabla 5-10. Matriz final de datos en Medellín.

	Matriz final
Días	17
Datos recolectados	2.668

Nota: Fuente propia.

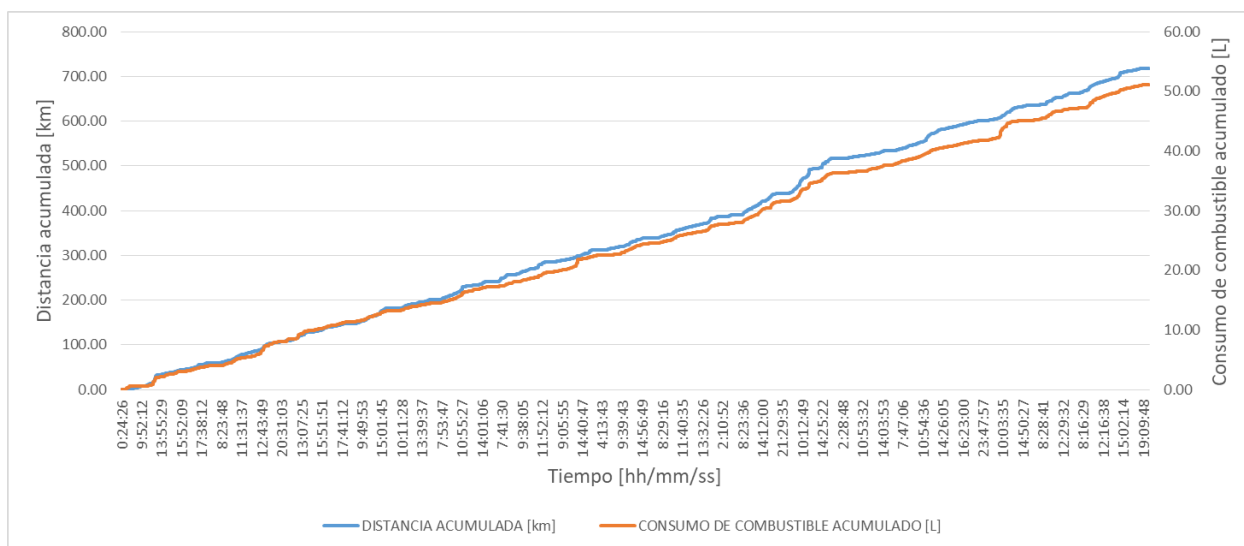
En una primera instancia en la Figura 5-10 se realiza un análisis a partir de los datos del nivel de combustible en el tanque y la distancia acumulada, en donde el sector demarcado como (A) implica que el vehículo fue cargado con combustible, sin embargo se tienen datos atípicos como se evidencia en el sector demarcado como (B), en donde el nivel de tanque incrementó un aproximado de un litro de combustible lo que se puede atribuir a una lectura errónea en el sensor de nivel de tanque de combustible. Dicho lo anterior se determina que el vehículo fue cargado con combustible un total de 8 veces durante toda la prueba piloto.

Figura 5-10. Nivel de combustible en el tanque vs distancia acumulada, motocarro Medellín.

Nota: Fuente propia.

En cuanto al análisis del consumo de combustible acumulado por día de operación se encuentra una relación directamente proporcional respecto a la distancia acumulada por día que recorre el vehículo, tal y como se evidencia en la Figura 5-11, este análisis no aplica para el nivel de combustible en el tanque, ya que como se describió anteriormente en el nivel de tanque se evidencian aumentos de combustible, por ende su relación no es directamente proporcional a la distancia recorrida.

Figura 5-11. Distancia acumulada y consumo de combustible acumulado vs tiempo, motocarro Medellín.



Nota: Fuente propia.

5.2.2 Eficiencia energética del motocarro en Medellín

A partir de los datos de distancia y el consumo de combustible corregido, se obtiene el rendimiento del motocarro en términos de la cantidad de combustible empleada para realizar un desplazamiento, en la Tabla 5-11 se muestran los resultados de rendimiento del vehículo obtenidos diariamente, como también se evidencia una agrupación de días los cuales corresponden a las semanas de operación.

Tabla 5-11. Rendimiento de motocarro Medellín.

SEMANA	FECHA	Suma de DISTANCIA [km]	Promedio de ALTITUD [msnm]	Promedio de PENDIENTE [°]	Promedio de VELOCIDAD [km/h]	Suma de CONSUMO DE COMBUSTIBLE CORREGIDO [L]	Suma de RENDIMIENTO [km/L]
1	4/02/2022	59.16	1571.64	0.01	7.94	4.04	14.64
	5/02/2022	47.68	1590.91	0.23	10.05	3.97	12.01
	7/02/2022	41.44	1544.94	0.29	8.29	3.35	12.37
2	8/02/2022	33.42	1519.71	0.27	10.32	1.85	18.07
	10/02/2022	20.43	1537.77	0.04	6.87	1.36	15.02
	14/02/2022	38.65	1585.90	0.32	9.40	2.61	14.81
3	16/02/2022	45.24	1527.89	0.16	10.31	2.55	17.74
	17/02/2022	26.85	1560.42	0.54	10.13	2.77	9.69
	19/02/2022	26.87	1557.66	0.13	6.61	2.02	13.30
4	23/02/2022	46.83	1552.09	0.17	9.53	3.21	14.59
	24/02/2022	52.81	1510.37	-0.02	9.61	3.87	13.65
	25/02/2022	78.38	1498.41	0.27	15.40	4.80	16.33
5	26/02/2022	16.42	1548.78	0.25	5.29	1.28	12.83
	28/02/2022	66.81	1565.32	0.18	12.50	4.06	16.46
	1/03/2022	34.42	1551.70	0.34	8.82	3.42	10.07
6	2/03/2022	27.29	1531.09	0.05	7.80	2.01	13.58
	4/03/2022	56.10	1564.89	0.10	10.72	3.93	14.27

Nota: Fuente propia.

Con el fin de evidenciar una comparación entre los rendimientos obtenidos semanalmente, se hace uso del diagrama de caja el cual es utilizado para el análisis de datos explícitos. Se realiza uso de la definición del diagrama de cajas del apartado 5.1.2 .

Dado lo anterior, se realiza la construcción del diagrama de cajas para el rendimiento del vehículo motocarro, en la Figura 5-12 se muestran los campos calculados y en la Figura 5-13 se evidencia el diagrama de cajas obtenido.

Figura 5-12. Campos calculados para el diagrama de cajas Medellín.

Rendimiento de combustible [km/L]						
Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	
14.64	18.07	17.74	14.59	12.83	13.58	
12.01	15.02	9.69	13.65	16.46	14.27	
12.37	14.81	13.30	16.33	10.07		

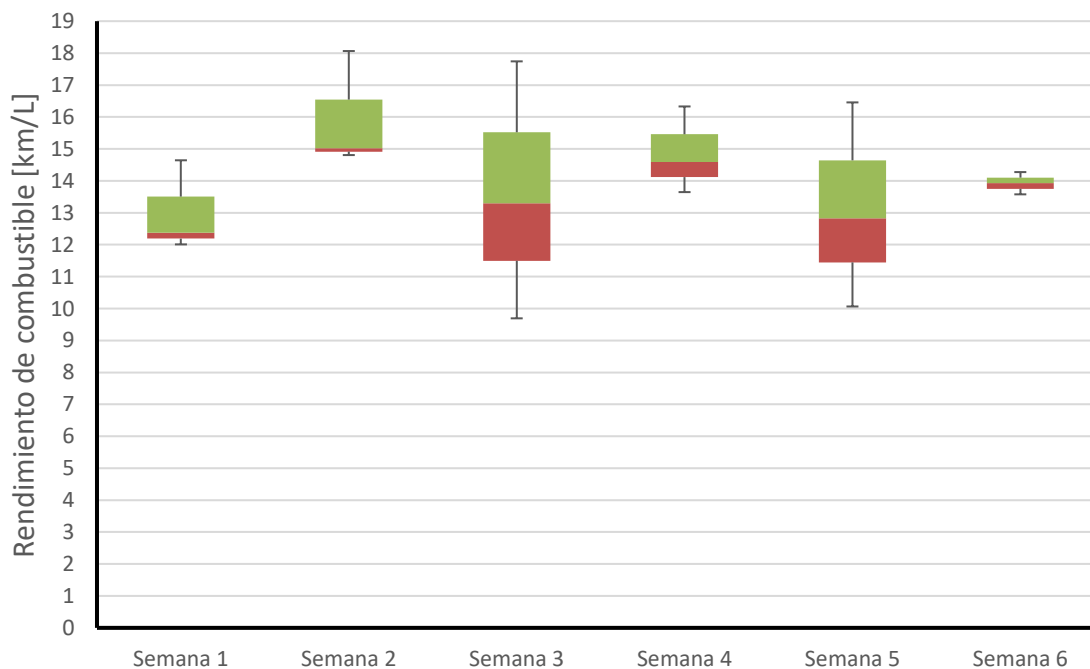
Columna1	Cuartil	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6
MIN	0	12.01	14.81	9.69	13.65	10.07	13.58
Q1	1	12.19	14.92	11.50	14.12	11.45	13.75
MEDIANA	2	12.37	15.02	13.30	14.59	12.83	13.93
Q3	3	13.51	16.54	15.52	15.46	14.64	14.10
MAX	4	14.64	18.07	17.74	16.33	16.46	14.27

CAJA 1		12.19	14.92	11.50	14.12	11.45	13.75
CAJA 2		0.18	0.11	1.80	0.47	1.38	0.17
CAJA 3		1.14	1.52	2.22	0.87	1.82	0.17

BIGOTE SUPERIOR		1.14	1.52	2.22	0.87	1.82	0.17
BIGOTE INFERIOR		0.18	0.11	1.80	0.47	1.38	0.17

Nota: Fuente propia.

Figura 5-13. Diagrama de cajas para rendimiento de combustible en Medellín.



Nota: Fuente propia.

Se evidencia que en la semana 6 se obtuvo un menor rango entre los datos de rendimiento de combustible, esto se debe a que los días de operación del vehículo durante esta semana fueron reducidos a 2, El pico más alto de eficiencia de combustible se obtuvo en la semana 2, lo ideal es tener un diagrama de cajas con baja dispersión, sin embargo esto se dificulta debido a que los trayectos o rutas no eran las mismas cada día, como tampoco el vehículo transportaba la misma cantidad de masa, es decir que a pesar de recorrer distancias más cortas el vehículo obtuvo un mayor consumo de combustible que cuando recorrió las distancias más largas.

Con el fin de obtener un intervalo de confianza para el rendimiento de combustible del vehículo motocarro en el piloto desarrollado en Medellín, se hace uso de la media, la desviación estándar, el número de datos, el nivel de significancia y el intervalo ,en la Tabla 5-12 se observa el intervalo de confianza obtenido.

Tabla 5-12. Intervalo de confianza de rendimiento de combustible en motocarro Medellín.

Media	14,08
Desviación estándar	2,33
Número de datos	17
Nivel de significancia	0,05
Intervalo	1,20
Intervalo de confianza	12,88 – 15,28

Nota: Fuente propia.

De lo anterior se concluye que con un nivel de confianza del 95% el cual es equivalente al nivel de significancia del 0.05, la media del rendimiento de combustible en el motocarro implementado en la prueba piloto de Medellín es de 14,08 [km/L] con un intervalo de confianza entre 12,88 [km/L] y 15,28 [km/L].

5.2.3 Emisiones contaminantes generadas por el vehículo motocarro en Medellín.

A partir del factor de emisión de CO₂ determinado en la Tabla 3-2, se realiza la estimación de los gramos de contaminante generados teniendo en cuenta el desplazamiento total que realizó el vehículo al finalizar la prueba piloto. En la Tabla 5-11 se evidencia las distancias recorridas para cada día de operación, realizando la sumatoria de estas se obtiene un total de 718,79 km de recorrido.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 5-13 se evidencia la cantidad en gramos de contaminante generados por el vehículo durante su operación.

Tabla 5-13. Emisiones generadas por motocarro en Medellín.

Contaminante criterio	Cantidad emitida [g]
CO ₂	56.087,18

Nota: Fuente propia.

5.2.4 Costo de combustible durante operación en Medellín

Teniendo en cuenta que el combustible que utiliza el vehículo motocarro es gasolina, se realiza una estimación del costo total de combustible a partir de la media de rendimiento de combustible, el costo de un galón de gasolina, y el desplazamiento total que realizó el vehículo. En (5-3) se evidencia el total de galones consumidos en base a la media de rendimiento de combustible.

$$718,79 [km] * \frac{1 [L]}{14,08 [km]} = 51,05 [L] \quad (5-3)$$

A partir de los valores establecidos en la Tabla 5-6 para el precio de 1 litro de gasolina en la ciudad de Medellín, en (5-4) se obtiene el costo total del combustible consumido durante la operación del vehículo motocarro.

$$51,05 [L] * \frac{\$2.500,12[COP]}{1[L]} = \$127.632,19 [COP] \quad (5-4)$$

5.2.5 Consolidados de carga para el motocarro en Medellín.

Teniendo en cuenta la información recopilada a través de los consolidados de carga que se generan antes de iniciar el reparto de última milla, en la Tabla 5-14 se evidencian los resultados obtenidos a partir fecha en la que se origina el consolidado, la cantidad de facturas entregadas y la masa equivalente a estas.

Tabla 5-14. Consolidado de carga motocarro Medellín.

Fecha	# Facturas	Masa transportada [kg]
4/02/2022	201	914.00
5/02/2022	47	407.35
7/02/2022	119	33.60
8/02/2022	10	80.48
10/02/2022	6	59.89
14/02/2022	62	398.92
16/02/2022	30	207.61
17/02/2022	1136	110.44
19/02/2022	25	104.66
23/02/2022	80	354.26
24/02/2022	98	666.69
25/02/2022	82	559.88
26/02/2022	22	127.72
28/02/2022	65	234.92
1/03/2022	77	313.00
2/03/2022	15	174.72
4/03/2022	76	328.91

Nota: Fuente propia

Por último en la Tabla 5-15 se obtiene el total de facturas entregadas, la media de facturas entregadas, el total de masa transportada y la media de masa transportada; para el vehículo motocarro de la empresa 2.

Tabla 5-15. Totales y medias de consolidados de motocarro empresa 2.

Empresa	Total de entregas	Media de entregas por día	Total de masa transportada [kg]	Media de masa transportada por día [kg]
2	2151	126,52	5077,04	298,64

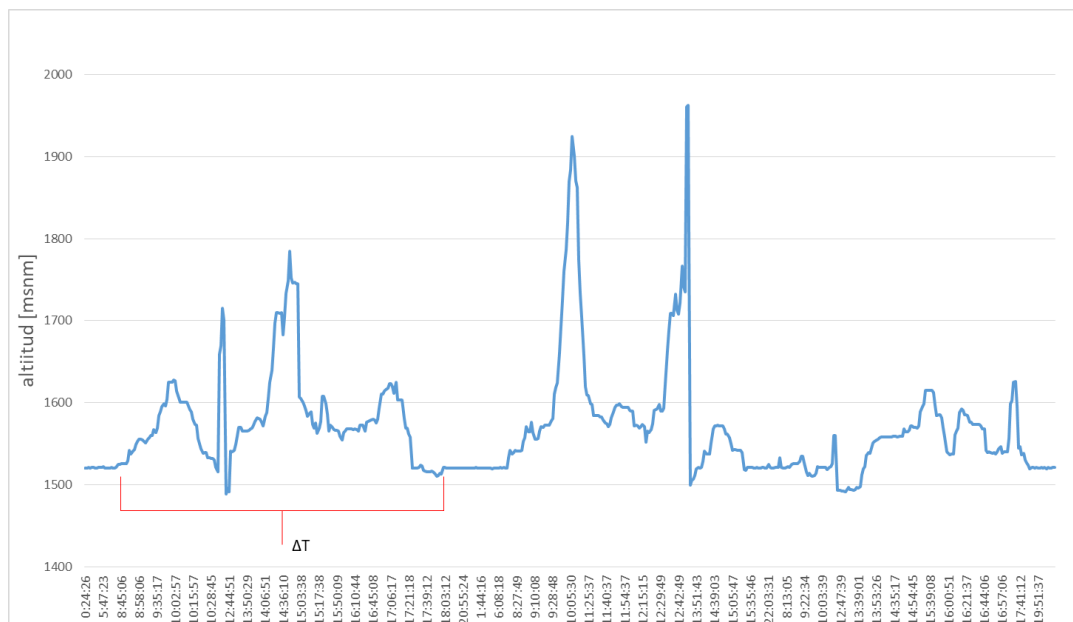
Nota: Fuente propia.

5.2.6 Logística en prueba piloto Medellín.

En cuanto al indicador logístico se realizó una estimación de los tiempos de operación por día del vehículo tomando como referencia la variación de la altitud tal y como se evidencia en la Figura 5-14. En donde se identifica un ΔT el cual corresponde al tiempo en el cual el vehículo estuvo realizando entregas, el horario de operación oscila entre las 8:00 a.m. y 9:00 a.m. hasta las 5:00 p.m. y 6:00 p.m., es decir que el vehículo tiene margen de operación de 8 horas diarias.

Al realizar el comparativo con la media de entregas por día, se obtiene que el vehículo realiza un promedio de 16 entregas / h. Se debe resaltar que se pudieron realizar varias entregas en un mismo punto.

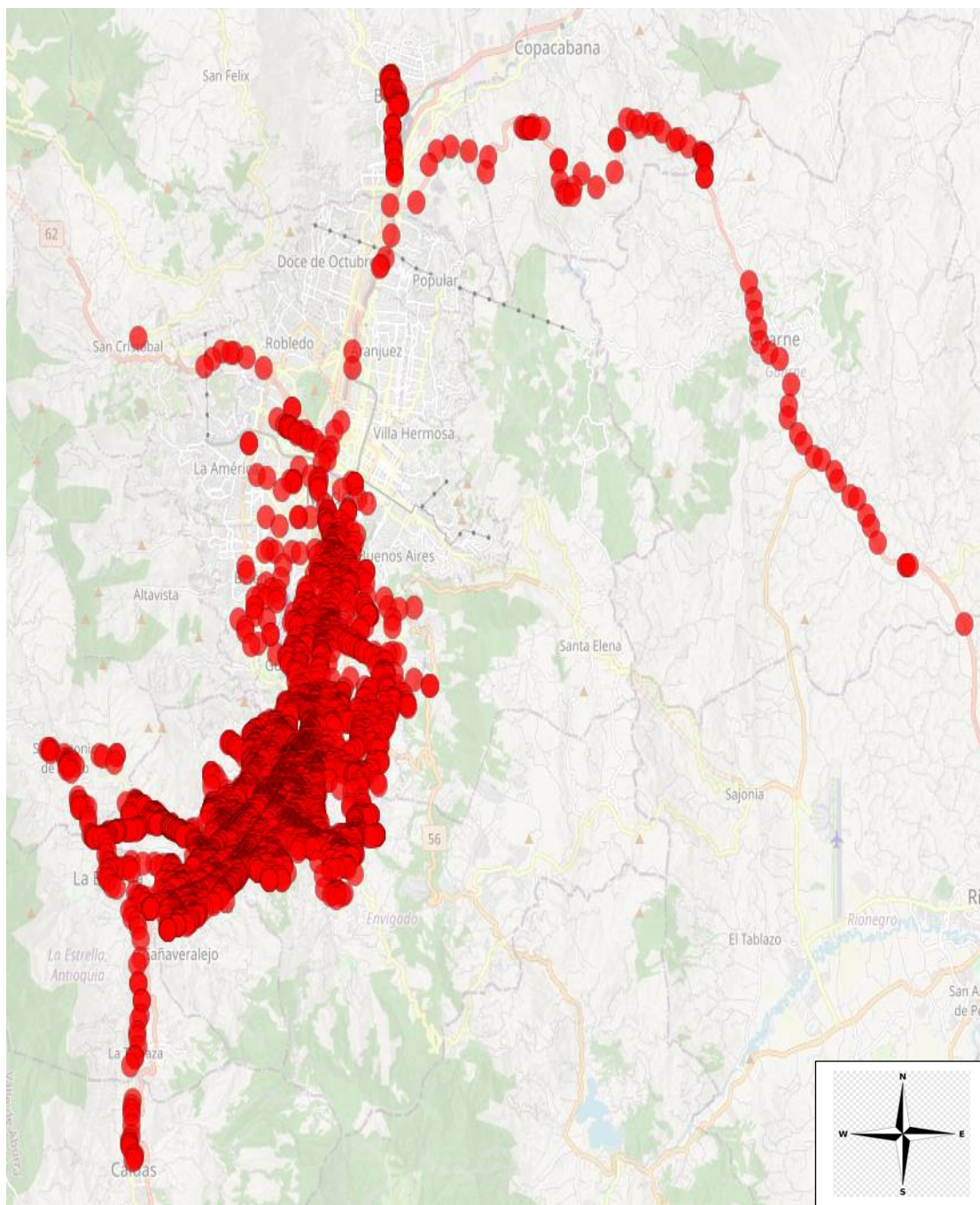
Figura 5-14. Altitud vs tiempo de operación durante 3 días, empresa 2.



Nota: Fuente propia.

En la Figura 5-15 se evidencia las zonas sobre las cuales se realizó el reparto de mercancías de última milla, es notorio que las rutas se realizaron al sur de la ciudad de Medellín y sus municipios aledaños.

Figura 5-15. Georreferenciación de puntos de distribución en Medellín.



Nota: Fuente propia.

5.3 Prueba piloto en la ciudad de Bogotá

5.3.1 Datos recolectados en prueba piloto Bogotá

Al finalizar la etapa de recolección de datos se obtuvieron los datos reportados en la Tabla 5-16 para la matriz de coordenadas y la matriz de nivel de combustible en el tanque.

Tabla 5-16. Datos recolectados en Bogotá.

	Matriz de coordenadas	Matriz de nivel de combustible en el tanque
Días	40	47
Datos recolectados	89.798	32.021

Nota: Fuente propia.

Posterior al cruce de la información y procesamiento de datos encontrados en la matriz de coordenadas y la matriz de nivel de combustible en el tanque, los datos obtenidos se almacenan en la matriz final, tal y como se observa en la Figura 5-16, adicionalmente en la Tabla 5-17 se tiene un resumen general de los días y la cantidad de datos recolectados.

Figura 5-16. Matriz final de datos Bogotá.

FECHA INICIAL	HORA INICIAL	TIEMPO [h]	NIVEL FINAL [L]	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD [msnm]	PENDIENTE [°]	DISTANCIA [km]	DISTANCIA ACUMULADA [km]	CONSUMO DE COMBUSTIBLE [L]	CONSUMO DE COMBUSTIBLE CORREGIDO [L]	CONSUMO DE COMBUSTIBLE ACUMULADO [L]	VELOCIDAD [km/h]
14/02/2022	0:06:28	0.00	4.18	4.68515	-74.13913	2548.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14/02/2022	0:10:28	0.07	4.18	4.68522	-74.13915	2548.70	-0.23	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.12
14/02/2022	0:14:28	0.07	4.18	4.68523	-74.13918	2548.70	0.92	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05
14/02/2022	0:18:28	0.07	4.18	4.68522	-74.13918	2548.80	0.63	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02
14/02/2022	0:22:28	0.07	4.18	4.68519	-74.13915	2548.70	-0.34	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.07
14/02/2022	0:26:28	0.07	4.18	4.68517	-74.13912	2548.70	-0.92	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.06
14/02/2022	0:30:28	0.07	4.18	4.68520	-74.13911	2548.60	-1.15	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.05
14/02/2022	0:34:28	0.07	4.18	4.68522	-74.13911	2548.60	-0.69	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03
14/02/2022	0:38:28	0.07	4.18	4.68521	-74.13912	2548.60	1.60	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02
14/02/2022	0:42:28	0.07	4.18	4.68520	-74.13912	2548.60	0.69	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02
14/02/2022	0:46:28	0.07	4.18	4.68518	-74.13915	2548.70	1.66	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.06
14/02/2022	0:50:28	0.07	4.18	4.68521	-74.13918	2548.80	0.34	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.07
14/02/2022	0:54:28	0.07	4.18	4.68518	-74.13919	2548.80	0.80	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.05
14/02/2022	0:58:28	0.07	4.18	4.68519	-74.13915	2548.70	-1.09	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.07
14/02/2022	1:02:28	0.07	4.18	4.68515	-74.13912	2548.70	-0.34	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.08
14/02/2022	1:06:28	0.07	4.18	4.68518	-74.13915	2548.70	0.57	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.07
14/02/2022	1:10:28	0.07	4.18	4.68521	-74.13915	2548.70	-0.63	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.05
14/02/2022	1:14:28	0.07	4.18	4.68514	-74.13912	2548.70	0.00	0.01	0.07	0.00	0.00	0.00	0.13
14/02/2022	1:18:28	0.07	4.18	4.68517	-74.13915	2548.70	0.57	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.07
14/02/2022	1:22:28	0.07	4.18	4.68516	-74.13915	2548.80	0.63	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.02

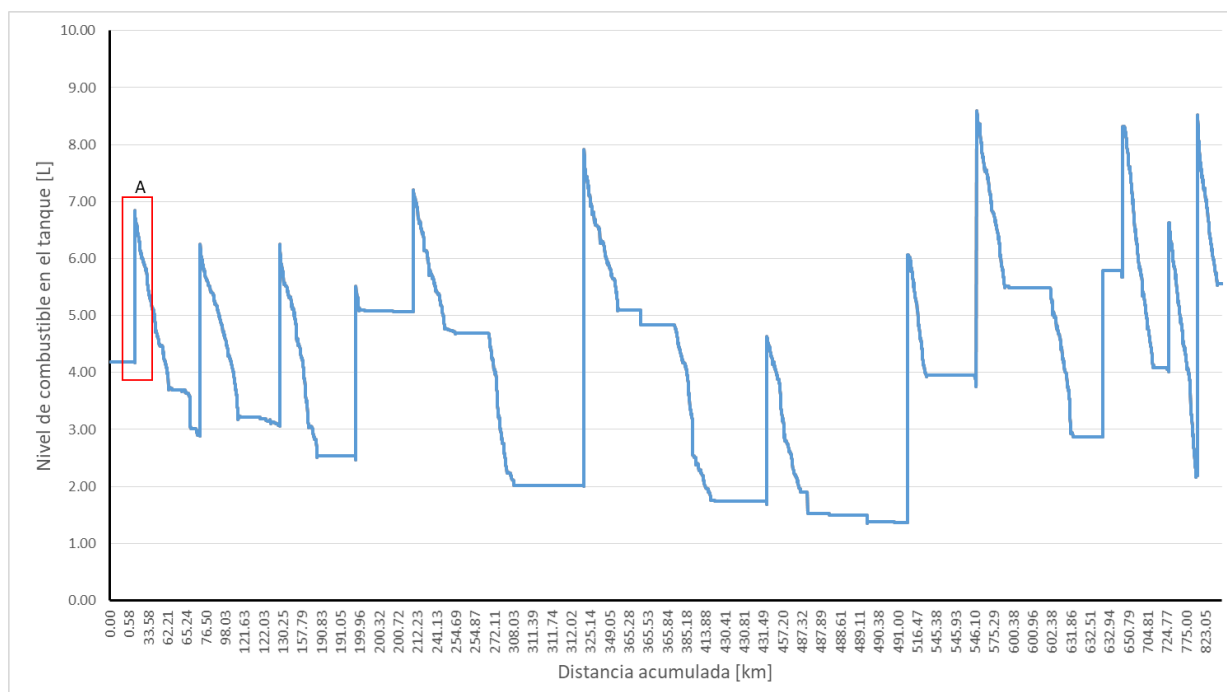
Nota: Fuente propia.

Tabla 5-17. Matriz final de datos en Bogotá.

	Matriz final
Días	15
Datos recolectados	6.656

Nota: Fuente propia.

En una primera instancia en la Figura 5-17 se realiza un análisis a partir de los datos del nivel de combustible en el tanque y la distancia acumulada, en donde el sector demarcado como (A) implica que el vehículo fue cargado con combustible, sin embargo no se tienen datos atípicos como en las anteriores ciudades. Dicho lo anterior se determina que el vehículo fue cargado con combustible un total de 12 veces durante toda la prueba piloto.

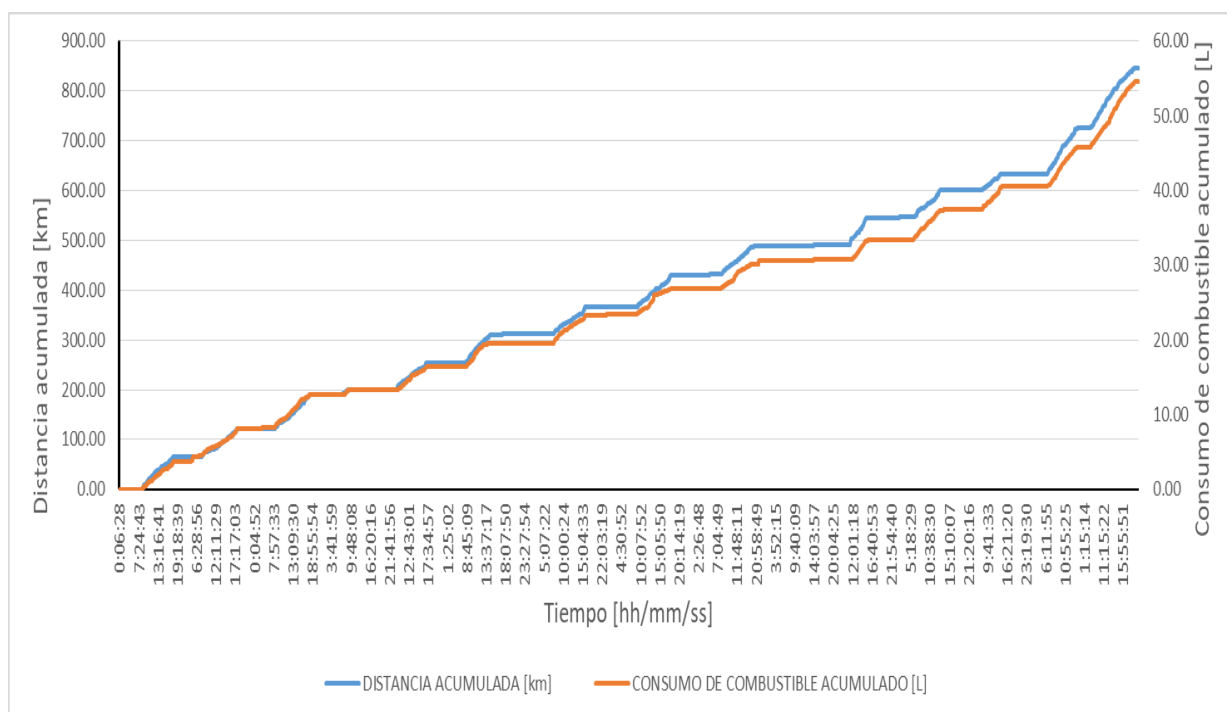
Figura 5-17. Nivel de combustible en el tanque vs distancia acumulada, motocarro Bogotá.

Nota: Fuente propia.

En cuanto al análisis del consumo de combustible acumulado por día de operación se encuentra una relación directamente proporcional respecto a la distancia acumulada por día que

recorre el vehículo, tal y como se evidencia en la Figura 5-18, este análisis no aplica para el nivel de combustible en el tanque, ya que como se describió anteriormente en el nivel de tanque se evidencian aumentos de combustible, por ende su relación no es directamente proporcional a la distancia recorrida.

Figura 5-18. Distancia acumulada y consumo de combustible acumulado vs tiempo, motocarro Bogotá.



Nota: Fuente propia.

5.3.2 Eficiencia energética del motocarro en Bogotá

A partir de los datos de distancia y el consumo de combustible corregido, se obtiene el rendimiento del motocarro en términos de la cantidad de combustible empleada para realizar un desplazamiento, en la Tabla 5-18 se muestran los resultados de rendimiento del vehículo obtenidos diariamente, como también se evidencia una agrupación de días los cuales corresponden a las semanas de operación.

Tabla 5-18. Rendimiento de motocarro Bogotá.

SEMANA	FECHA	Suma de DISTANCIA [km]	Promedio de ALTITUD [msnm]	Promedio de PENDIENTE [°]	Promedio de VELOCIDAD [km/h]	Suma de CONSUMO DE COMBUSTIBLE CORREGIDO [L]	Suma de RENDIMIENTO [km/L]
1	14/02/2022	65.20	2559.58	-0.18	3.91	3.70	17.62
	15/02/2022	56.73	2547.47	-0.01	3.46	4.46	12.72
	16/02/2022	69.06	2559.57	-0.08	4.00	4.52	15.28
2	17/02/2022	9.96	2548.66	-0.01	0.61	0.62	16.06
	18/02/2022	53.85	2547.89	-0.01	4.31	3.20	16.83
	19/02/2022	56.97	2550.69	0.02	2.98	3.08	18.50
3	22/02/2022	53.65	2548.33	0.03	2.76	3.66	14.66
	26/02/2022	65.03	2549.75	0.04	3.47	3.60	18.06
	28/02/2022	57.05	2549.26	0.00	3.52	3.33	17.13
4	5/03/2022	3.83	2549.02	-0.01	0.18	0.57	6.73
	8/03/2022	54.64	2555.42	0.02	4.20	2.59	21.10
	9/03/2022	55.13	2549.78	0.01	3.12	4.05	13.61
5	12/03/2022	31.80	2548.26	0.01	2.49	3.14	10.13
	14/03/2022	91.71	2555.23	-0.03	7.17	5.19	17.69
	15/03/2022	121.49	2559.33	-0.01	9.54	8.82	13.78

Nota: Fuente propia.

Con el fin de evidenciar una comparación entre los rendimientos obtenidos semanalmente, se hace uso del diagrama de caja el cual es utilizado para el análisis de datos explícitos. Se realiza uso de la definición del diagrama de cajas del apartado 5.1.2.

Dado lo anterior, se realiza la construcción del diagrama de cajas para el rendimiento del vehículo motocarro, en la Figura 5-19 se muestran los campos calculados y en la Figura 5-20 se evidencia el diagrama de cajas obtenido.

Figura 5-19. Campos calculados para el diagrama de cajas Bogotá.

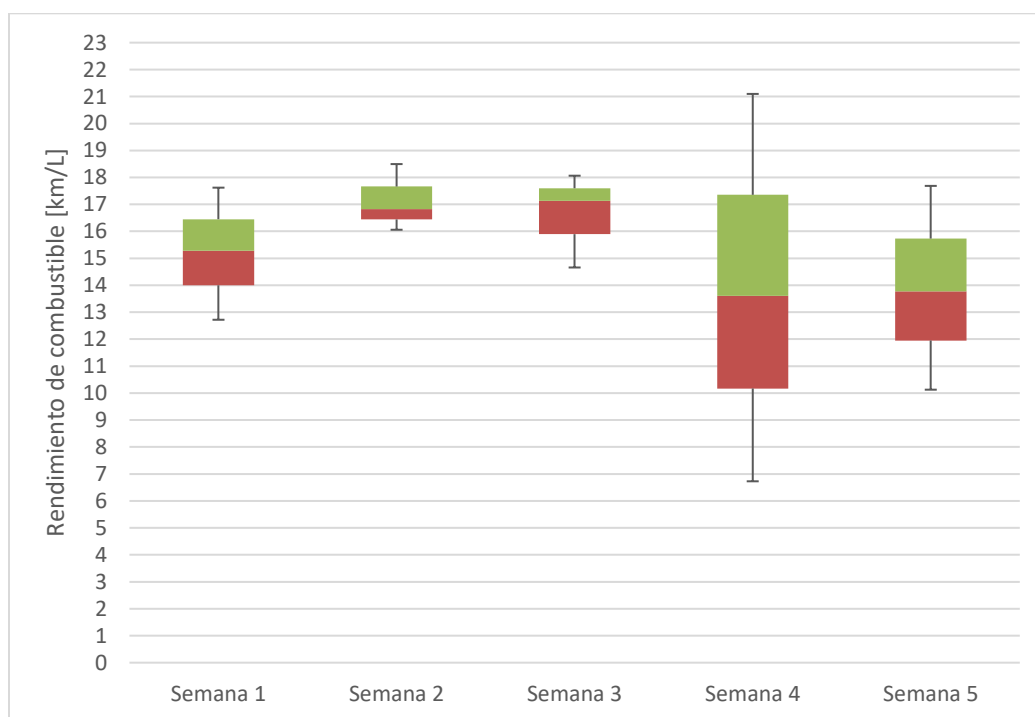
Rendimiento de combustible [km/L]						
Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	
17.62	16.06	14.66	6.73	10.13	0	
12.72	16.83	18.06	21.10	17.69	0	
15.28	18.50	17.13	13.61	13.78	0	
					0	
					0	

Columna1	Cuartil	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6
MIN	0	12.72	16.06	14.66	6.73	10.13	0
Q1	1	14.00	16.44	15.90	10.17	11.95	0
MEDIANA	2	15.28	16.83	17.13	13.61	13.78	0
Q3	3	16.45	17.66	17.60	17.35	15.73	0
MAX	4	17.62	18.50	18.06	21.10	17.69	0

CAJA 1		14.00	16.44	15.90	10.17	11.95	0
CAJA 2		1.28	0.38	1.24	3.44	1.83	0
CAJA 3		1.17	0.83	0.47	3.74	1.95	0

BIGOTE SUPERIOR		1.17	0.83	0.47	3.74	1.95	0
BIGOTE INFERIOR		1.28	0.38	1.24	3.44	1.83	0

Nota: Fuente propia.

Figura 5-20. Diagrama de cajas para rendimiento de combustible en Bogotá.

Nota: Fuente propia.

Se evidencia que en la semana 4 se obtuvo un mayor rango entre los datos de rendimiento de combustible, esto se debe a que los trayectos o rutas no eran las mismas cada día, como tampoco el vehículo transportaba la misma cantidad de masa, es decir que a pesar de recorrer distancias más cortas el vehículo obtuvo un mayor consumo de combustible que cuando recorrió las distancias más largas, adicionalmente la inclinación del terreno influye de manera considerable.

Con el fin de obtener un intervalo de confianza para el rendimiento de combustible del vehículo motocarro en el piloto desarrollado en Bogotá, se hace uso de la media, la desviación estándar, el número de datos, el nivel de significancia y el intervalo ,en la Tabla 5-19 se observa el intervalo de confianza obtenido.

Tabla 5-19. Intervalo de confianza de rendimiento de combustible en motocarro Bogotá.

Media	15,32
Desviación estándar	3,59
Número de datos	15
Nivel de significancia	0,05
Intervalo	1,99
Intervalo de confianza	13,33 – 17,31

Nota: Fuente propia.

De lo anterior se concluye que con un nivel de confianza del 95% el cual es equivalente al nivel de significancia del 0.05, la media del rendimiento de combustible en el motocarro implementado en la prueba piloto de Bogotá es de 15,32 [km/L] con un intervalo de confianza entre 13,33 [km/L] y 17,31 [km/L].

5.3.3 Emisiones contaminantes generadas por el vehículo motocarro en Bogotá.

A partir del factor de emisión de CO₂ determinado en la Tabla 3-2, se realiza la estimación de los gramos de contaminante generados teniendo en cuenta el desplazamiento total que realizó el vehículo al finalizar la prueba piloto. En la Tabla 5-18 se evidencia las distancias recorridas para cada día de operación, realizando la sumatoria de estas se obtiene un total de 846,10 km de recorrido.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 5-20 se evidencia la cantidad en gramos de contaminante generados por el vehículo durante su operación.

Tabla 5-20. Emisiones generadas por motocarro en Bogotá.

Contaminante criterio	Cantidad emitida[g]
CO ₂	66.021,18

Nota: Fuente propia.

5.3.4 Costo de combustible durante operación en Bogotá

Teniendo en cuenta que el combustible que utiliza el vehículo motocarro es gasolina, se realiza una estimación del costo total de combustible a partir de la media de rendimiento de combustible, el costo de un galón de gasolina, y el desplazamiento total que realizó el vehículo. En (5-5) se evidencia el total de galones consumidos en base a la media de rendimiento de combustible.

$$846,10 [km] * \frac{1 [L]}{15,32 [km]} = 55,22 [L] \quad (5-5)$$

A partir de los valores establecidos en la Tabla 5-6 para el precio de 1 litro de gasolina en la ciudad de Bogotá, en (5-6) se obtiene el costo total del combustible consumido durante la operación del vehículo motocarro.

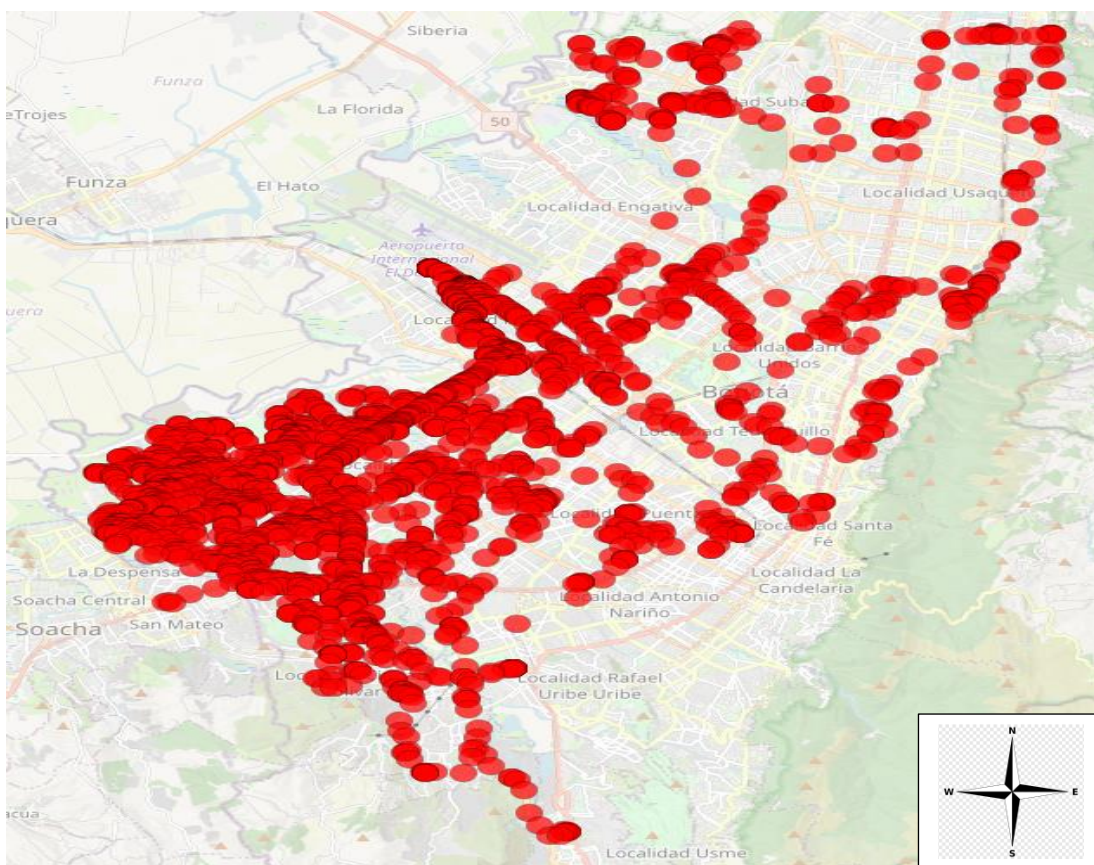
$$55,22 [L] * \frac{\$ 2.515,71[COP]}{1[L]} = \$138.917,50 [COP] \quad (5-6)$$

5.3.5 Logística en prueba piloto Bogotá.

En la prueba piloto realizada en la ciudad de Bogotá, no se obtuvieron consolidados de carga por parte de la empresa, debido a pérdida de información en las bases de datos. Debido a lo anterior, no se calcularon indicadores logísticos asociados a la cantidad de entregas realizadas por día de operación.

En la Figura 4-21 se evidencia las zonas sobre las cuales se realizó el reparto de mercancías de última milla, es notorio que las rutas se realizaron en el centro y sur de la ciudad de Bogotá.

Figura 5-21. Georreferenciación de puntos de distribución en Bogotá.



Nota: Fuente propia.

6 Descripción del vehículo de línea base utilizado en cada Ciudad.

6.1 Empresa 1-Bucaramanga

El vehículo base utilizado para la distribución de mercancías de última milla en la ciudad de Bucaramanga es la camioneta Changan MD201 Cargo Box la cual posee un MCI cuyo combustible es gasolina y tiene una capacidad de carga de 900 kg. En la Figura 6-1 se evidencian las principales características técnicas del vehículo base tomadas de la ficha técnica del fabricante. En la Figura 6-2 se evidencia la apariencia física del vehículo descrito anteriormente.

Figura 6-1. Especificaciones técnicas Changan MD201 Cargo Box.

MD201	MD201 PICK UP		MS201	MD201	M201
	CABINA SIMPLE XL	CABINA SIMPLE	CABINA DOBLE	CARGO BOX	FURGÓN CARGO
MOTOR Y CAJA:					
Tipo DOHC 16-válvulas 4 cilindros	1.5L			1.2L	
Cilindrada (cc)	1.493			1.243	
Relación de compresión	10.5:1			11.0:1	
Potencia máxima (HP/RPM)	110/6.000			97/ 6.000	
Par máximo (NM/RPM)	142/4.500			119/ 4.800	
Alimentación de combustible	(MPI) Inyección de electrónica multipunto				
Material block y culata	Aleación de aluminio				
Capacidad de combustible (L)	40				
Tipo de tracción	Trasera 2WD				
Tipo de transmisión	Manual de 5 velocidades				
Relación de engranajes					
I:	3.769		3.358		
II:	2.045		1.858		
III:	1.376		1.315		
IV:	1.000		1.000		
V:	0.838		0.801		
Reversa:	4.128		4.452		
Final Ratio:	4.778		4.778		
Dirección asistida electrónicamente	✓	Opcional	✓	✓	Opcional
DIMENSIONES Y CAPACIDADES:					
Número de puertas	2	2	4	4	5
Número de pasajeros	2	2	5	2	2
Largo total (mm)	4.860	4.564	4.660	4.615	3.980
Ancho total (mm)	1.600	1.645	1.620	1.620	1.620
Alto total (mm)	1.890	1.870	1.890	2.265	1.890
Distancia entre ejes (mm)	3.060	2.900	2.900	2.900	2.560
Trocha delantera y trasera (mm)	1.360	1.360	1.360	1.360	1.360
Distancia mínima al suelo (mm)	155	155	155	155	155
Peso en orden de marcha	1.190	1.650	1.070	1.750	1.100
Peso bruto vehicular (Kg)	2.165	2.150	2.135	2.250	1.730
Capacidad de carga útil (Kg)	1.000	1.000	800	900	780
Volumen de carga útil (m3)	-	-	-	5,9	4,3
Ángulo de ataque (Grados)	30°	30°	30°	30°	30°
Largo total de la caja de carga (mm)	3.000	2.700	2.060	2.625	2.430
Ancho total de la caja de carga (mm)	1.520	1.520	1.520	1.500	1.390
Alto total de la caja de carga (mm)	370	370	370	1.500	1.270
Rendimiento Mixto (Km/L)	12,8	13,7	13,7	13,7	14,4
Rendimiento Carretera (Km/L)	15,2	15,9	15,9	15,9	16,6
Rendimiento Ciudad (Km/L)	10	11,1	11,1	11,1	11,6
Nota:					

Nota: Fuente [45]

Figura 6-2. Changan MD201 Cargo Box.



Nota; Fuente [45]

6.2 Empresa 2-Medellín

El vehículo base utilizado para la distribución de mercancías de última milla en la ciudad de Medellín es un camión Chevrolet NPR el cual posee un MCI cuyo combustible es Diesel y tiene una capacidad de carga de 4,7 Toneladas. En la Figura 6-3 se evidencian las principales características técnicas del vehículo base tomadas de la ficha técnica del fabricante. En la Figura 6-4 se evidencia la apariencia física del vehículo descrito anteriormente.

Figura 6-3. Especificaciones técnicas de camión Chevrolet NPR.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS		CAMIÓN NPR REWARD EURO IV		AF
MOTOR				
Marca / Código	ISUZU 4HK1-TCN			
Tipo	INTERCOOLER 5.2L			
Ubicación	Longitudinal Delantero			
Desplazamiento (cc)	5.193			
Nro. de Cilindros	4 en Línea			
Potencia (hp @ rpm)	153 @ 2.600			
Torque (kg-m @ rpm)	42.73 @ 1.600			
Alimentación	Inyección Directa			
Sistema de Inyección	Common Rail			
Nivel de Emisiones	Euro IV			
Combustible	Diesel			
TRANSMISIÓN				
Tipo	ISUZU/MYY6S			
Marca / Código	T/M 6 VEL.(0/D)			
Relaciones 1ª	5,979			
6ª	0,759			
Reversa	5,701			
Relación Final de Eje	4,777			
Tracción	4x2			
PESOS Y CAPACIDADES				
Peso Bruto Vehicular (kg)	7.500			
Capacidad de Carga (kg)	4.782			
Capacidad max. de Ejes: Delantero (Kg)	3.100			
Trasero (Kg)	6.600			
Tanque de Combustible (L)	140			
CHASIS				
Dirección	Asistida Hidráulicamente			
	Tipo Ballesta en eje rígido			
Suspensión Delantera	Resorte Semi-elíptico			
	Capacidad (kg) 3.020			
	Tipo Ballesta en eje rígido			
Suspensión Trasera	Resorte Semi-elíptico			
	Capacidad (kg) 5.760			
Amortiguadores	Hidráulicos, telescópicos de doble acción			
	Tipo Hidráulico			
Sistema de Freno	ABS + EBD + ASR SI			
Bastidor	Sección de canal escalonado			
EQUIPAMIENTO				
Interruptor freno de ahogo	SI			
Freno de parqueo	SI			
Interruptor de aceleración manual	SI			
Luces frontales halógenas	SI			
Manija llave de pernos	SI			
Portavasos	SI			
Radio	SI			
Asientos en vinilo	SI			
Bolsillo trasero asiento del conductor	SI			
Dirección	Ajustable en altura			
DIMENSIONES				
OL (Longitud total, mm)	5.985			
WB (Distancia entre ejes, mm)	3.365			
BL (Longitud carrozable, mm)	4.305			
FOH (Voladizo delantero, mm)	1.110			
ROH (Voladizo trasero, mm)	1.510			
RTW (Ancho de llantas traseras, mm)	2.115			
FTW (Ancho de trocha, mm)	2.040			

Nota: Fuente [46]

Figura 6-4. Camión Chevrolet NPR.



Nota: Fuente [46]

6.3 Empresa 3- Bogotá

El vehículo base utilizado para la distribución de mercancías de última milla en la ciudad de Bogotá es triciclo eléctrico HUIHAI H5 el cual posee un motor DC con una potencia nominal de 800 W y tiene una capacidad de carga de 320 kg. En la Figura 6-5 se evidencian las principales características técnicas del vehículo base tomadas de la ficha técnica del fabricante. En la Figura 6-6 se evidencia la apariencia física del vehículo descrito anteriormente.

Figura 6-5. Especificaciones técnicas de triciclo eléctrico de carga.

Tamaño global	3020*980*1705mm
Tipo de caja de carga	1400*900*950mm
Tamaño de la caja de carga	caja de carga cerrada
Tipo de motor	Motor integrado/DC síncrono/onda cuadrada/altura del imán 45
Potencia nominal	800W
La punta del Poder	2200W
Modo de transmisión	Engranaje transmitido
Controlador	18 tubos
máx.Actual	42A
Suspensión delantera	Absorbedor de tubo dúplex/φ33 mm/720 mm
Tipo de suspensión trasera	Resorte de hoja de 6 piezas + amortiguador de resorte
Amortiguador trasero	/
Eje posterior	Eje cónico/1:10/φ60 mm/grosor 3,5 mm
mín.Radio de giro	6500 mm
mín.Clareza del piso	150 mm
Ballesta	6 uds ballesta/ancho 45mm/grosor 5mm
Neumático (F/R)	3,50/3,50-12
Tipo de freno	Freno mecánico
Modo de freno	tambor / tambor
máx.Velocidad	28 km/h
Batería	60V/60Ah
Kilometraje por carga	110km
Tiempo de carga	6-8 horas
peso en vacío	260 kg
Peso bruto nominal	560kg
máx.Peso bruto diseñado	650kg
Cantidad de embalaje del contenedor 40HQ.	ERC 48 juegos
Características	<ol style="list-style-type: none"> 1. Panel de instrumentos multimedia, alarma inteligente de un botón 2. Tecnología de aplicación del sistema de almacenamiento de energía eléctrica de litio. 3. Pasamanos con freno de mano integrado 4. Módulo de posicionamiento inteligente integrable 5. Amplia visión para conducir

Nota: Fuente [47]

Figura 6-6. Triciclo eléctrico HUAIHAI H5.



Nota: Fuente [47]

6.4 Factores de emisión de vehículos línea base

Debido a que la ficha técnica no incluye un factor de emisión de los vehículos anteriormente descritos, se realiza una estimación a partir de la revisión bibliográfica de la siguiente manera:

- Para el vehículo Chevrolet NPR se estima el factor de emisión a partir del informe final de convenio 003 de 2021 celebrado entre la Universidad de Antioquia y la UPME [48], en donde en la fase 2,1 se realiza la determinación de los factores de emisión de vehículos pesados de carga (camiones y tractocamiones) a la altitud del área metropolitana de la ciudad de Bucaramanga. El vehículo usado en este estudio fue un camión Chevrolet NPR modelo 2018, 5.200 cc y capacidad de carga aproximada de 5 toneladas. Este vehículo cumple con las características técnicas del vehículo de Chevrolet NPR correspondiente a la empresa 1 ubicada en la ciudad de Medellín.
- Para la determinación del factor de emisión del vehículo Changan MD201 se tomó como soporte el Inventario de Emisiones de Bogotá, contaminantes atmosféricos 2020, dicha

estimación se basó en “una recopilación de factores estimados para Bogotá por la Universidad de La Salle (Universidad de La Salle, SDA, & Ecopetrol, 2018) utilizando el software MOVES” [49]. Se determina un factor de emisión que corresponda a un valor cercano del cilindraje del vehículo, ya que no se encontró un inventario de emisiones para este tipo de vehículos en particular.

- Es de resaltar que el triciclo eléctrico no consume combustible y por ende no genera emisiones contaminantes a través del tubo de escape durante su operación. Sin embargo, se generan emisiones indirectas de CO₂ debido al consumo energético del vehículo, este es tomado en cuenta siempre y cuando en el proceso de generación eléctrica se consuma combustibles fósiles. Según el informe presentado por el Ministerio de Minas y Energía, la UPME y XM [50] el factor de emisión de la red de energía eléctrica en Colombia para inventarios de GEI o huella de carbono en el año 2021 es de 126 g CO₂ equivalente / kWh. Con base en este valor, en el desarrollo del trabajo se calculará la cantidad de contaminante emitida a la atmosfera por el vehículo como equivalente de una recarga de la batería del mismo.

A partir de los datos anteriormente recolectados se construye la Tabla 6-1, se hace énfasis en que el único factor de emisión a determinar es para el CO₂, ya que en la metodología del trabajo es el contemplado para realizar un comparativo del desempeño ambiental.

Tabla 6-1. Factores de para vehículos de línea base.

Categoría	Modelo	Cilindraje (cc)	Norma de emisión	Capacidad de carga (Ton)	FE de CO₂ ($\frac{g}{km}$)
C2 mediano	2.018	5.200	Euro IV	< 5	571,4
Camioneta	-	< 1.400	-	-	344,9
Eléctrico	-	no aplica	no aplica	-	0

Nota: Fuente [49], [48]

6.5 Emisiones contaminantes generadas por vehículos de línea base

A partir de los factores de emisión determinados para los principales contaminantes gaseosos expresados en la Tabla 6-1, se realiza la estimación de los gramos de contaminante generados teniendo en cuenta el desplazamiento total que realizó cada vehículo, es indispensable mencionar que para poder determinar un punto de comparación entre vehículo de línea base y vehículo motocarro se recurrió a la distancia que recorrió cada motocarro durante toda la operación y esta fue tomada como distancia que recorrió el vehículo de línea base, el cálculo de la distancia se realizó en capítulo 5. En la Tabla 6-2 se evidencian los resultados obtenidos de emisiones de CO₂ para cada tipo de vehículo de línea base. Debido a que el vehículo de línea base de la empresa 3 es de tipo eléctrico se realiza el siguiente análisis:

Para el vehículo eléctrico se tiene una batería de 60 V con una magnitud de intensidad de corriente de 60 Ah, este valor corresponde a la carga eléctrica almacenada en la batería, con el fin de determinar la capacidad de la batería en kWh la cual corresponde a la energía almacenada por la batería, se realiza la equivalencia correspondiente en (6-1).

$$\text{Capacidad de la batería} = \frac{60 \text{ Ah} * 60 \text{ V}}{1000} = 3,6 \text{ kWh} \quad (6-1)$$

Es decir que con una energía almacenada de 3,6 kWh el triciclo eléctrico recorre una distancia aproximada de 110 km por cada carga de batería, según los datos suministrados por el fabricante. Se tiene que la distancia recorrida por el triciclo eléctrico fue de 846,10 km, por lo tanto en (6-2) se realizan los cálculos para conocer el consumo de energía total.

$$\text{consumo de energía total} = \frac{846,10 \text{ km} * 3,6 \text{ kWh}}{110 \text{ km}} = 26,69 \text{ kWh} \quad (6-2)$$

Dado lo anterior se encuentra que para realizar un recorrido de 846,10 km, fue necesario recargar la batería del vehículo un aproximado de 7,5 ciclos.

Por último para conocer la cantidad emitida de contaminante se realiza el producto entre el factor de emisión de la red de energía eléctrica nacional y el consumo de energía total del vehículo.

Tabla 6-2. Emisiones generadas por vehículos de línea base.

vehículo	Distancia [km]	Factor de emisión CO_2 [g/km]	Cantidad emitida [g CO_2]
Camión Chevrolet NPR	718,79	571,4	410.716,60
Changan MD201 Cargo Box	250,17	344,9	86.283,63
Triciclo eléctrico HUAIHAI H5	846,10	126 [g/kWh]	3.362,94

Nota: Fuente propia.

Se evidencia que el vehículo Camión NPR al realizar el segundo mayor desplazamiento y poseer el factor de emisión de CO_2 más alto debido a sus especificaciones técnicas fue el vehículo que mayor cantidad de g de CO_2 emitió a la atmosfera durante su operación. Por otro lado el vehículo eléctrico a pesar de realizar el mayor desplazamiento presentó una baja cantidad de emisiones de CO_2 a la atmosfera asociadas con la energía consumida para recargar su batería, esto se debe a el alto kilometraje que recorre por cada carga de la batería.

6.6 Eficiencia Energética de vehículos de línea base

Como se mencionó anteriormente el rendimiento del combustible depende de una gran variedad de factores, sin embargo para este estudio se tomaron los valores relacionados por el fabricante de consumo de combustible por distancia recorrida y el consumo de energía por distancia recorrida tal y como se evidencia en la Tabla 6-3. Con el fin de evaluar el indicador de rendimiento del vehículo eléctrico se realiza la relación expresada en (6-3) entre el kilometraje por carga y la capacidad de la batería.

$$\text{Indicador de rendimiento} = \frac{110 \text{ km}}{3,6 \text{ kWh}} = 30,55 \frac{\text{km}}{\text{kWh}} \quad (6-3)$$

Este indicador de rendimiento puede ser relacionado con la distancia recorrida por litro de gasolina, donde según [51] un litro de gasolina proporciona 9,2 kWh y un litro de Diesel que tiene mayor densidad proporciona 10,7 kWh. Esta relación hace referencia al poder calorífico inferior del combustible, es decir la cantidad de energía por unidad de masa o volumen que se genera al producirse una reacción química. A partir de lo anterior se realiza el cálculo para el IRR (indicador de rendimiento relacionado) en (6-4).

$$\text{IRR} = 30,55 \frac{\text{km}}{\text{kWh}} * \frac{9,2 \text{ kWh}}{1 \text{ litro de gasolina}} = 281,05 \frac{\text{km}}{\text{L}} \quad (6-4)$$

El indicador de rendimiento relacionado debe ser ajustado, debido a que según [52] un motor de gasolina de ciclo Otto tiende a poseer una eficiencia energética del 30% en el mejor de los casos, sin embargo en un motor eléctrico se tiene una eficiencia alrededor del 90% o superior. Teniendo en cuenta lo anterior se plantea un factor de equivalencia del 0,3 para conocer el IRRA (indicador de rendimiento relacionado ajustado), tal y como se evidencia en (6-5).

$$\text{IRRA} = 281,05 \frac{\text{km}}{\text{l}} * 0,3 = 84,31 \frac{\text{km}}{\text{l}} \quad (6-5)$$

Tabla 6-3. Eficiencia energética vehículos línea base.

Vehículo	Indicador de rendimiento [km/L]	Media de rendimiento [km/L]
Changan MD201 Cargo Box	11-13	12
Camión Chevrolet NPR	6-8	7
triciclo eléctrico HUAIHAI H5	84,31	84,31

Nota: Elaboración propia a partir de [45] [46] [47]. El indicador de rendimiento para el triciclo eléctrico, proviene de cálculo de equivalencia con el consumo en gasolina.

6.7 Costos de combustible en vehículos de línea base

Teniendo en cuenta la ciudad y el combustible que utiliza cada vehículo establecido en la Tabla 5-6, se realiza una estimación del costo total de combustible a partir de la media de rendimiento de combustible, el costo de un litro de combustible, y la distancia total que realizó el vehículo. En (6-6) se representa una forma general para obtener el combustible total.

$$\text{Combustible total} = \text{distancia total [km]} * \frac{1 [\text{litro}]}{\text{Media de rendimiento [km]}} \quad (6-6)$$

Posteriormente en (6-7) se reemplaza el valor obtenido en la ecuación (6-6) y así se obtiene el costo total del combustible consumido durante la operación del vehículo.

$$\text{Costo total de combustible} = (\text{ecuación (6-6)}) * \frac{\text{Precio de combustible [COP]}}{1 [\text{litro}]} \quad (6-7)$$

A partir de lo anterior en la Tabla 6-4 se obtiene el costo total de combustible para cada uno de los vehículos de línea base.

Tabla 6-4. Costo total de combustible en vehículos de línea base.

Vehículo	Combustible	Distancia [km]	Combustible total [litro]	Costo total de combustible [COP]
Changan MD201 Cargo Box	Gasolina	250,17	20,84	\$66.851,55
Camión Chevrolet NPR	Diesel	718,79	102,68	\$252.572,53
Triciclo eléctrico HUIHAI H5	Equivalencia en gasolina	846,10	10,03	\$25.246,61

Nota: El consumo total de combustible en el triciclo eléctrico se presenta como una equivalencia de su consumo energético en gasolina, tal cual se aclara en la Tabla 6-3. Fuente propia.

6.8 Consolidados de carga de vehículos de línea base

Teniendo en cuenta la información recopilada a través de los consolidados de carga que se generan antes de iniciar el reparto de última milla, en la Tabla 6-5 se evidencian los resultados obtenidos para la empresa 1, en la Tabla 6-6 los resultados de la empresa 2. Respecto a la empresa 3, no se logró obtener información de la cantidad de entregas diarias, como tampoco la masa que transportó el vehículo durante su operación.

El consolidado de carga o manifiesto de carga presenta la información de la fecha en la que se origina, la cantidad de facturas entregadas y la masa equivalente a estas.

Tabla 6-5. Consolidado de carga línea base empresa 1.

Fecha	# Facturas	Masa transportada [kg]
1/02/2022	152	287.58
3/02/2022	122	222.40
4/02/2022	145	274.34
7/02/2022	168	191.28
8/02/2022	140	264.88
9/02/2022	161	314.01
10/02/2022	130	434.15
11/02/2022	130	245.96
14/02/2022	178	336.78
15/02/2022	183	226.24
16/02/2022	138	256.87
22/02/2022	188	287.32
1/03/2022	145	274.34
2/03/2022	162	290.30
3/03/2022	120	215.04
5/03/2022	171	322.33
7/03/2022	123	231.85
9/03/2022	135	254.40
10/03/2022	168	316.60
11/03/2022	183	344.90

Nota: La empresa 1 corresponde al vehículo Changan MD201 Cargo Box .Fuente propia.

Tabla 6-6. Consolidado de carga línea base empresa 2.

Fecha	# Facturas	Masa transportada [kg]
4/02/2022	691	3939.00
5/02/2022	502	1706.58
7/02/2022	268	1568.96
8/02/2022	439	2702.59
10/02/2022	795	3939.00
14/02/2022	1020	3939.00
16/02/2022	264	2368.36
17/02/2022	644	3939.00
19/02/2022	226	1485.22
23/02/2022	229	2009.02
24/02/2022	367	2130.73
25/02/2022	621	3939.00
26/02/2022	291	1385.76
28/02/2022	381	3774.08
1/03/2022	1406	3939.00
2/03/2022	307	1844.58
4/03/2022	266	1895.71

Nota: La empresa 2 corresponde al vehículo camión Chevrolet NPR. Fuente propia.

Por último en la Tabla 6-7 se obtiene el total de facturas entregadas, la media de facturas entregadas, el total de masa transportada y la media de masa transportada; para el vehículo base de la empresa 1 y 2. Los valores total equivalen a toda la operación que realizó el vehículo de línea base, mientras que la media de entregas hace referencia al promedio de entregas y masa transportada por día de operación.

Tabla 6-7. Totales y medias de consolidados de empresa 1 y 2.

Empresa	Total de entregas	Media de entregas por día	Total de masa transportada [kg]	Media de masa transportada por día [kg]
1	3.042	152,10	5.591,57	279,58
2	8.717	512,76	46.505,56	2.735,62

Nota: La empresa 1 corresponde al vehículo Changan MD201 Cargo Box. La empresa 2 corresponde al vehículo camión Chevrolet NPR Fuente propia.

6.9 Costos de vehículos de línea base.

A partir de la información recolectada en la Tabla 6-8 se evidencian una aproximación de los valores comerciales en el mercado colombiano para cada vehículo, esto se debe a que el precio del vehículo aumenta o disminuye conforme a la cantidad de equipamiento interior o exterior que este posea. Con respecto al vehículo eléctrico tiene un precio cercano a los \$5'000.000 en el mercado de China, sin embargo deben ser tenidos en cuenta los costos de importación y aranceles declarados por el gobierno Colombiano.

Tabla 6-8. Valores comerciales de vehículos línea base en COP.

Changan MD201 Cargo Box	Camión Chevrolet NPR	Triciclo eléctrico HUIHAI H5
\$52'000.000	\$184'730.000	\$15'000.000

Nota: Elaborado a partir de [45], [46] y [47].

7 Análisis comparativo

7.1 Comparativo de Motocarro y vehículo de línea base empresa 1.

7.1.1 Desempeño técnico

A partir de la información obtenida en los capítulos anteriores se elabora la Tabla 7-1, en donde se calcula una relación y una diferencia porcentual la cual se refiere a la diferencia entre el valor a comparar y el valor base de comparación, esto dividido en el valor base de comparación.

Tabla 7-1. Comparación de características técnicas de vehículos en empresa 1.

Criterio	Changan MD201 Cargo Box	Motocarro piloto Bucaramanga	Relación	Diferencia %
Motor	Tipo DOHC 16-valvulas 4 cilindros	4 TIEMPOS SISTEMA DTS-i	-	
Cilindraje [cm^3]	1243	236,2	5,26	-81

Criterio	Changan MD201 Cargo Box	Motocarro piloto Bucaramanga	Relación	Diferencia %
Potencia máxima [HP/ RPM]	97 /6000	10,5/4500	9,24	-89
Par máximo [Nm/ RPM]	119/4800	19/3500	6,26	-84
Tipo de combustible	Gasolina	Gasolina	-	
Transmisión	Manual de 5 velocidades + reversa	Manual de 4 velocidades + reversa	-	
Capacidad del tanque de combustible [L]	40	12	3,33	-70
Capacidad de carga [kg]	1.000	515	1,94	-49
Dimensiones totales [cm]	Largo=461,5, Ancho=162, Alto=226,5	Largo=323, Ancho=149,3, Alto=181,8	-	
Pasajeros	2	1	2	-50
Volumen que ocupa el vehículo [cm³]	16,93	8,76	1,60	-48
Capacidad de carga [m³]	5,9	3,5	1,63	-41
Rendimiento según fabricante [km/L]	12	23,77	1,98	98
Prom. de masa transportada [kg]	279,57	100,91	2,77	-64
Prom. de facturas entregadas	152,1	51,75	2,94	-66
Prom. de rendimiento [km/L]	12	8,1	1,48	-33
Consumo de combustible durante la operación [L]	20,84	30,88	1,48	48

Nota: Fuente propia

Con base en lo anterior se evidencian las siguientes relaciones con respecto a los datos técnicos de base para cada vehículo:

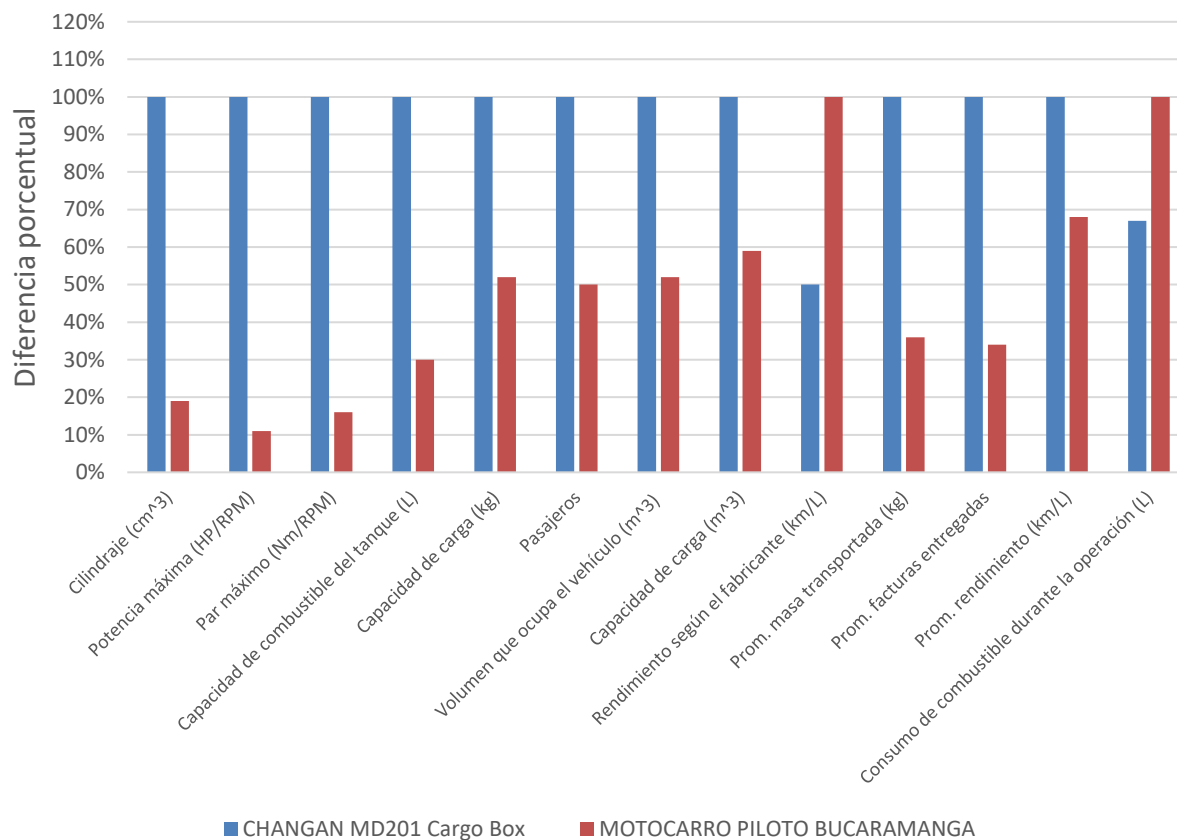
- El vehículo motocarro posee 5,26 veces menos cilindraje que el vehículo de línea base.
- El vehículo motocarro posee 9,24 veces menos potencia que el vehículo de línea base.
- El vehículo motocarro posee 6,26 veces menos torque que el vehículo de línea base.
- El vehículo motocarro posee 3,33 veces menos capacidad del tanque de combustible que el vehículo de línea base.
- El vehículo de línea base posee 1,94 veces más capacidad de carga que el vehículo motocarro.
- El vehículo de línea base puede transportar 2 veces más cantidad de pasajeros que el vehículo motocarro
- El vehículo de línea base ocupa 1,93 veces más volumen en las vías que el vehículo motocarro.
- El vehículo motocarro tiene 1,69 veces menos capacidad de carga en términos de volumen que el vehículo de línea base.
- Según las fichas técnicas de los fabricantes, el vehículo motocarro posee 1,98 veces más rendimiento que el vehículo de línea base.

Con respecto a los datos técnicos calculados a partir del levantamiento de información de la línea base y los obtenidos a través de la prueba piloto del motocarro, se encuentran las siguientes relaciones:

- El vehículo motocarro transportó un promedio de 2,77 veces menos carga en términos de masa que el vehículo de línea base.

- El vehículo motocarro realizó un promedio de 2,94 veces menos entregas que el vehículo de línea base.
- El vehículo motocarro obtuvo un rendimiento de combustible 1,48 veces menor al del vehículo de línea base, adicionalmente esta relación es directamente proporcional al consumo de combustible en el tanque.

Teniendo en cuenta las diferencias porcentuales, en la Figura 7-1 se puede apreciar que el vehículo motocarro solo obtuvo dos relaciones porcentuales superiores a la del vehículo de línea base en cuanto al rendimiento según el fabricante y el consumo de combustible durante la operación. A partir de lo anterior se tiene que el vehículo motocarro posee un 50 % más de rendimiento según el fabricante que el vehículo de línea base, adicionalmente el vehículo motocarro consumió un 33% más combustible que el vehículo de línea base; por lo tanto no es un indicador que beneficie al mismo. Por último se evidencia que el motocarro ocupa un 48 % menos de volumen en el espacio vehicular que el vehículo de línea base, lo que facilita su movilidad por el tráfico vehicular.

Figura 7-1. Comparación de características técnicas de vehículos en empresa 1.

Nota: Fuente propia.

7.1.2 Desempeño económico

A partir de la Tabla 6-8 y el valor comercial del vehículo motocarro enunciado en el apartado 3.2, se construye la Tabla 7-2 donde se evidencia que el vehículo motocarro es 2,6 veces menos costoso que el vehículo Changan MD201 Cargo Box. Adicionalmente se determina que al adquirir un vehículo motocarro en el mercado se tiene un ahorro económico del 61% con respecto a la adquisición de un vehículo Changan MD201 Cargo Box.

Tabla 7-2. Comparación de valores comerciales de vehículos empresa 1.

Criterio	Changan MD201 Cargo Box	Motocarro Piloto Bucaramanga	Diferencia	Diferencia %
Valor comercial [COP]	\$52'000.000	\$20'000.000	2,6	-61

Nota: Fuente propia.

Con respecto al costo de consumo de combustible se realiza el análisis a partir de la Tabla 6-4 en donde se calculó el costo total de combustible consumido por el vehículo de línea base y el apartado 5.1.4 donde se calculó el costo total de combustible consumido por el vehículo motocarro, dado lo anterior se construye la Tabla 7-3 en donde se evidencia que el vehículo motocarro consume 1,13 veces más combustible que el vehículo Changan MD201 Cargo Box.

Tabla 7-3. Comparación de costo del combustible consumido de vehículos empresa 1.

Criterio	Changan MD201 Cargo Box	Motocarro Piloto Bucaramanga	Diferencia	Diferencia %
Costo total de combustible consumido [COP]	\$66.851,55	\$75.678,23	1,13	12

Nota: Fuente propia.

Adicionalmente se determina que el vehículo motocarro tiene un costo adicional por consumo de combustible del 12% con respecto al vehículo Changan MD201 Cargo Box.

7.1.3 Desempeño ambiental empresa 1.

A partir de la Tabla 6-2 y la Tabla 5-5 se construye la Tabla 7-4 en donde se evidencia que el vehículo motocarro genera 4,42 veces menos CO_2 que el vehículo Changan MD201 Cargo Box.

Tabla 7-4. Comparativo de emisiones contaminantes generadas empresa 1.

Contaminante Criterio [g]	Changan MD201 Cargo Box	Motocarro Piloto Bucaramanga	Diferencia	Diferencia %
CO₂	86.283,63	19.520,76	4,42	<i>-77</i>

Nota: Fuente propia.

Adicionalmente se determina que el vehículo motocarro reduce la emisión de este gas de efecto invernadero en un 77% con respecto al vehículo Changan MD201 Cargo Box.

7.1.4 Análisis conjunto para vehículos en empresa 1.

A partir de los análisis realizados anteriormente, es de resaltar que el vehículo motocarro presenta grandes diferencias en cuanto a la mayoría de aspectos técnicos, sin embargo el de mayor influencia es el promedio de facturas que el vehículo entregó diariamente, debido a que por medio de la revisión de la literatura en la distribución de mercancías de última milla se resalta la importancia de realizar la mayor cantidad de entregas, en el menor tiempo posible y con un mínimo de costo de entrega, para suplir el promedio de entregas diarias que se dio en la operación se necesitarían un aproximado de 3 vehículos motocarro, lo que generaría un aumento en el costo por consumo de combustible cercano al 227% y a su vez los 3 vehículos motocarro superan el valor comercial de la Changan MD201 Cargo Box en un valor de \$8'000.000 COP, adicionalmente se requiere contratar un operario adicional para que conduzca el tercer motocarro, sin embargo es de resaltar que la utilización de 3 vehículos motocarro, seguirían reduciendo las emisiones de CO₂ en un 32% con respecto a la utilización del vehículo Changan MD201 Cargo Box.

Como análisis de causalidad de los resultados anteriormente mencionados se tiene que el vehículo motocarro tan solo transportó un promedio del 20 % del total de la capacidad de carga para la que está diseñado, mientras que el vehículo de línea base usó un 30 % de la capacidad de carga durante la operación.

7.2 Comparativo de Motocarro y vehículo de línea base empresa 2.

7.2.1 Desempeño económico

A partir de la Tabla 6-8 y el valor comercial del vehículo motocarro enunciado en el apartado 3.2, se construye la Tabla 7-5 donde se evidencia que el vehículo motocarro es 9,23 veces menos costoso que el vehículo camión Chevrolet NPR. Adicionalmente se determina que al adquirir un vehículo motocarro en el mercado se tiene un ahorro económico del 89% con respecto a la adquisición de un vehículo Camión Chevrolet NPR.

Tabla 7-5. Comparación de valores comerciales de vehículos empresa 2.

Criterio	Camión Chevrolet NPR	Motocarro Piloto Medellín	Diferencia	Diferencia %
Valor comercial [COP]	\$184'730.000	\$20'000.000	9,23	-89

Nota: Elaboración propia.

Con respecto al costo de consumo de combustible se realiza el análisis a partir de la Tabla 6-4 en donde se calculó el costo total de combustible consumido por el vehículo de línea base y el apartado 5.2.4 donde se calculó el costo total de combustible consumido por el vehículo motocarro, dado lo anterior se construye la Tabla 7-6 en donde se evidencia que el vehículo motocarro consume 1,97 veces menos combustible que el vehículo camión Chevrolet NPR.

Tabla 7-6. Comparación de costo del combustible consumido de vehículos empresa 2.

Criterio	Camión Chevrolet NPR	Motocarro Piloto Medellín	Diferencia	Diferencia %
Costo total de combustible consumido [COP]	\$252.572,53	\$127.632,19	1,97	-49

Nota: Fuente propia.

Adicionalmente se determina que el vehículo motocarro tiene una reducción de costo por consumo de combustible del 49% con respecto al vehículo Camión Chevrolet NPR.

7.2.2 Desempeño técnico

A partir de la información obtenida en los capítulos anteriores se elabora la Tabla 7-7, en donde se calcula una relación y una diferencia porcentual la cual se refiere a la diferencia entre el valor a comparar y el valor base de comparación, esto dividido en el valor base de comparación.

Tabla 7-7. Comparación de características técnicas de vehículos en empresa 2.

Criterio	Camión Chevrolet NPR	Motocarro piloto Medellín	Relación	Diferencia %
Motor	ISUZU 4HK1-TCN INTERCOOLER, 4 CILINDROS EN LINEA	4 TIEMPOS SISTEMA DTS-i	-	-
Cilindraje [cm^3]	5.193	236,2	21,99	-95
Potencia máxima [HP/ RPM]	153/2.600	10,5/4.500	14,57	-93
Par máximo [Nm/ RPM]	419/1.600	19/3.500	22,05	-95
Tipo de combustible	DIESEL	GASOLINA	-	-
Transmisión	MANUAL DE 6 VELOCIDADES + RESERVA	MANUAL DE 4 VELOCIDADES + REVERSA	-	-
Capacidad del tanque de combustible [L]	140	12	11,67	-91
Capacidad de carga [kg]	4782	515	9,29	-89
Dimensiones totales [cm]	Largo=598,5 , Ancho=211,5, Alto=226	Largo=323, Ancho=149,3, Alto=181,8	-	-
Pasajeros	3	1	3,00	-67
Volumen que ocupa el vehículo [cm^3]	28,6	8,76	3,26	-69
Capacidad de carga [m^3]	13,04	3,5	3,73	-73
Rendimiento según fabricante [km/L]	7	23,77	3,40	240

Criterio	Camión Chevrolet NPR	Motocarro piloto Medellín	Relación	Diferencia %
Prom. de masa transportada [kg]	2.735,62	298,64	9,16	-89
Prom. de facturas entregadas	512,76	126,52	4,05	-75
Prom. de rendimiento [km/L]	7	14,08	2,01	101
Consumo de combustible durante la operación [L]	102,68	51,05	2,01	-50

Nota: Fuente propia

Con base en lo anterior se evidencian las siguientes relaciones con respecto a los datos técnicos de base para cada vehículo:

- El vehículo motocarro posee 21,99 veces menos cilindraje que el vehículo de línea base.
- El vehículo motocarro posee 14,57 veces menos potencia que el vehículo de línea base.
- El vehículo motocarro posee 22,05 veces menos torque que el vehículo de línea base.
- El vehículo motocarro posee 11,67 veces menos capacidad del tanque de combustible que el vehículo de línea base.
- El vehículo de línea base posee 9,29 veces más capacidad de carga que el vehículo motocarro.
- El vehículo de línea base puede transportar 3 veces más cantidad de pasajeros que el vehículo motocarro.

- El vehículo de línea base ocupa 3,26 veces más volumen en las vías que el vehículo motocarro.
- El vehículo motocarro tiene 3,73 veces menos capacidad de carga en términos de volumen que el vehículo de línea base.
- Según las fichas técnicas de los fabricantes, el vehículo motocarro posee 3,40 veces más rendimiento que el vehículo de línea base.

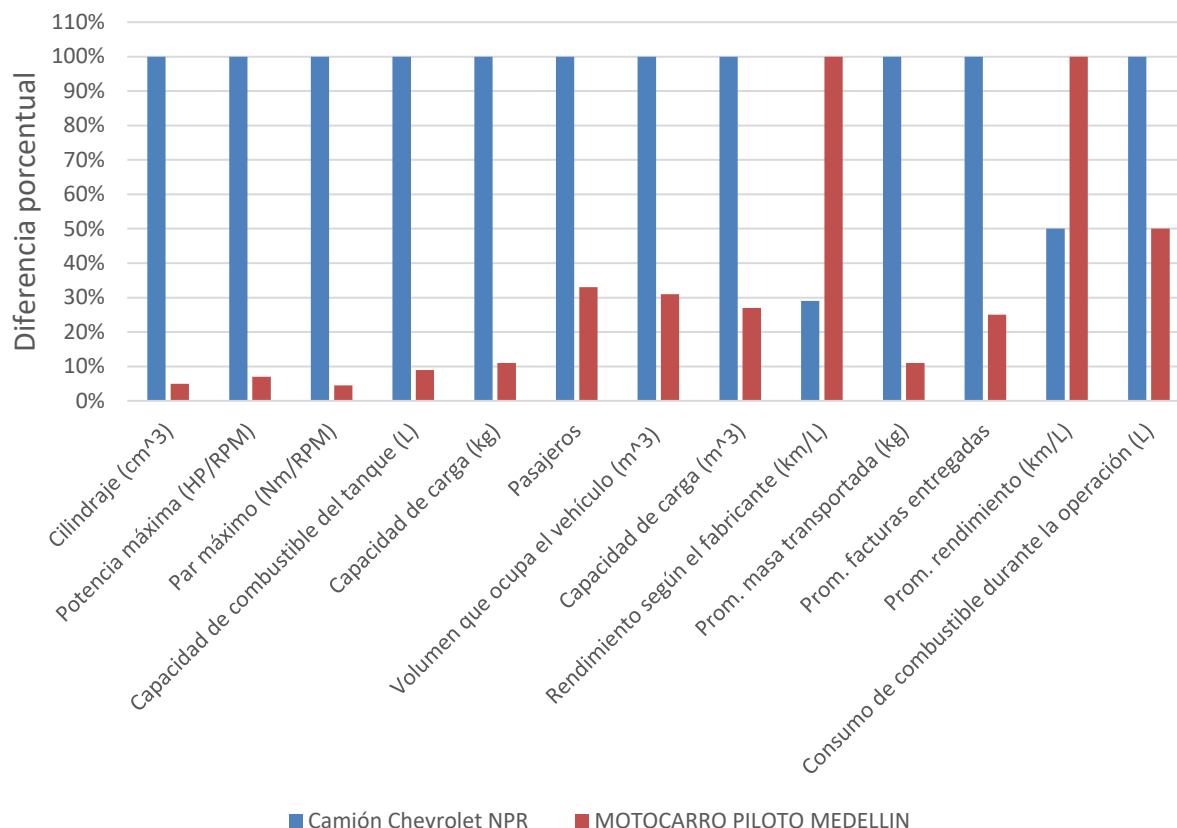
Con respecto a los datos técnicos calculados a partir del levantamiento de información de la línea base y los obtenidos a través de la prueba piloto del motocarro, se encuentran las siguientes relaciones:

- El vehículo motocarro transportó un promedio de 9,16 veces menos carga en términos de masa que el vehículo de línea base.
- El vehículo motocarro realizó un promedio de 4,05 veces menos entregas que el vehículo de línea base.
- El vehículo motocarro obtuvo un rendimiento de combustible 2,01 veces mayor al del vehículo de línea base, adicionalmente esta relación es directamente proporcional al consumo de combustible en el tanque.

Teniendo en cuenta las relaciones porcentuales, en la Figura 7-2 se puede apreciar que el vehículo motocarro obtuvo dos relaciones porcentuales superiores a la del vehículo de línea base en cuanto al rendimiento según el fabricante y el promedio de rendimiento de la operación. A partir de lo anterior se tiene que el vehículo motocarro posee un 240 % más de rendimiento según el fabricante que el vehículo de línea base, adicionalmente el vehículo motocarro posee un 101 % más de rendimiento promedio que el vehículo de línea base.

Por último se resalta que le vehículo motocarro consumió un 50% menos de combustible que el vehículo de línea base y adicionalmente se evidencia que el motocarro ocupa un 69 % menos de volumen en el espacio vehicular que el vehículo de línea base, lo que facilita su movilidad por el tráfico vehicular.

Figura 7-2. Comparación de características técnicas de vehículos en empresa 2.



Nota: Fuente propia.

7.2.3 Desempeño ambiental empresa 2.

A partir de la Tabla 6-2 y la Tabla 5-13 se construye la Tabla 7-8 en donde se evidencia que el vehículo motocarro genera 7,32 veces menos CO_2 que el vehículo camión Chevrolet NPR.

Tabla 7-8. Comparativo de emisiones contaminantes generadas empresa 2.

Contaminante Criterio [g]	Camión Chevrolet NPR	Motocarro Piloto Medellín	Diferencia	Diferencia %
CO_2	410.716,60	56.087,18	7,32	-87

Nota: Fuente propia.

Adicionalmente se determina que el vehículo motocarro reduce la emisión de este gas de efecto invernadero en un 87% con respecto al vehículo camión Chevrolet NPR.

7.2.4 Análisis conjunto para vehículos en empresa 2.

A partir de los análisis realizados anteriormente, es de resaltar que el vehículo motocarro presenta diferencias en cuanto a la mayoría de aspectos técnicos, sin embargo el de mayor influencia es el promedio de facturas que el vehículo entregó diariamente, debido a que por medio de la revisión de la literatura en la distribución de mercancías de última milla se resalta la importancia de realizar la mayor cantidad de entregas, en el menor tiempo posible y con un mínimo de costo de entrega, para suplir el promedio de entregas diarias que se dio en la operación se necesitarían un aproximado de 4 vehículos motocarro, lo que generaría un aumento en el costo por consumo de combustible cercano al 50%, sin embargo al adquirir 4 vehículos motocarro equivaldría a un 44% del valor comercial del camión Chevrolet NPR, es decir que se tendría una reducción de costos por adquisición de transporte de \$104'730.000 COP, adicionalmente se requiere contratar un operario adicional para que conduzca el cuarto motocarro, por último se resalta que a pesar de utilizar 4 vehículos motocarro, estos seguirían reduciendo las emisiones de CO_2 en un 40% con respecto a la utilización del vehículo tipo camión Chevrolet NPR.

Como análisis de causalidad de los resultados anteriormente mencionados se tiene que el vehículo motocarro tan solo transportó un promedio del 58 % del total de la capacidad de carga para la que está diseñado, mientras que el vehículo de línea base usó un 57 % de la capacidad de carga durante la operación.

7.3 Comparativo de Motocarro y vehículo de línea base empresa 3.

7.3.1 Desempeño técnico

A partir de la información obtenida en los capítulos anteriores se elabora la Tabla 7-9, en donde se calcula una relación y una diferencia porcentual la cual se refiere a la diferencia entre el valor a comparar y el valor base de comparación, esto dividido en el valor base de comparación.

Tabla 7-9. Comparación de características técnicas de vehículos en empresa 3.

Criterio	Triciclo HUIHAI H5	Motocarro piloto Bogotá	Diferencia	Diferencia %
Motor	MOTOR ELECTRICO INTEGRADO DC SINCRONO,ON DA CUADRADA	4 TIEMPOS SISTEMA DTS-i	-	-
Cilindraje [cm^3]	-	236,2	-	-
Batería	60 V /60 Ah	12 V /32 Ah	-	-
Potencia máxima	800 W	10,5/4.500 [HP/ RPM]	-	-
Par máximo [Nm/ RPM]	-	19/3.500	-	-
Tipo de combustible	ELECTRICIDAD	GASOLINA	-	-
Transmisión	ENGRANAJES	MANUAL DE 4 VELOCIDADES + REVERSA	-	-
Capacidad del tanque de combustible [L]	-	12	-	-
Capacidad de carga [kg]	320	515	1,61	61
Dimensiones totales [cm]	Largo=287.7, Ancho=96.4, Alto=172.4	Largo=323, Ancho=149.3, Alto=181.8	-	-
Pasajeros	1	1	1,00	0
Volumen que ocupa el vehículo [cm^3]	4,78	8,76	1,83	83
Capacidad de carga [m^3]	1,1	3,5	3,18	218

Criterio	Triciclo HUIHAI H5	Motocarro piloto Bogotá	Diferencia	Diferencia %
Rendimiento según fabricante [km/L]	84,31	23,77	3,55	-72
Prom. de masa transportada [kg]	-	-	-	-
Prom. de facturas entregadas	-	-	-	-
Prom. de rendimiento [km/L]	84,31	15,32	5,50	-82
Consumo de combustible durante la operación [L]	10,03	55,2	5,50	450

Nota: Fuente propia

Con base en lo anterior se evidencian las siguientes relaciones con respecto a los datos técnicos de base para cada vehículo:

- El vehículo de línea base posee 1,61 veces menos capacidad de carga que el vehículo motocarro.
- Tanto el vehículo de línea base como el motocarro pueden transportar 1 solo pasajero.
- El vehículo de línea base ocupa 1,83 veces menos volumen en las vías que el vehículo motocarro.
- Según las fichas técnicas de los fabricantes, el vehículo motocarro posee 3,55 veces menos rendimiento que el vehículo de línea base.

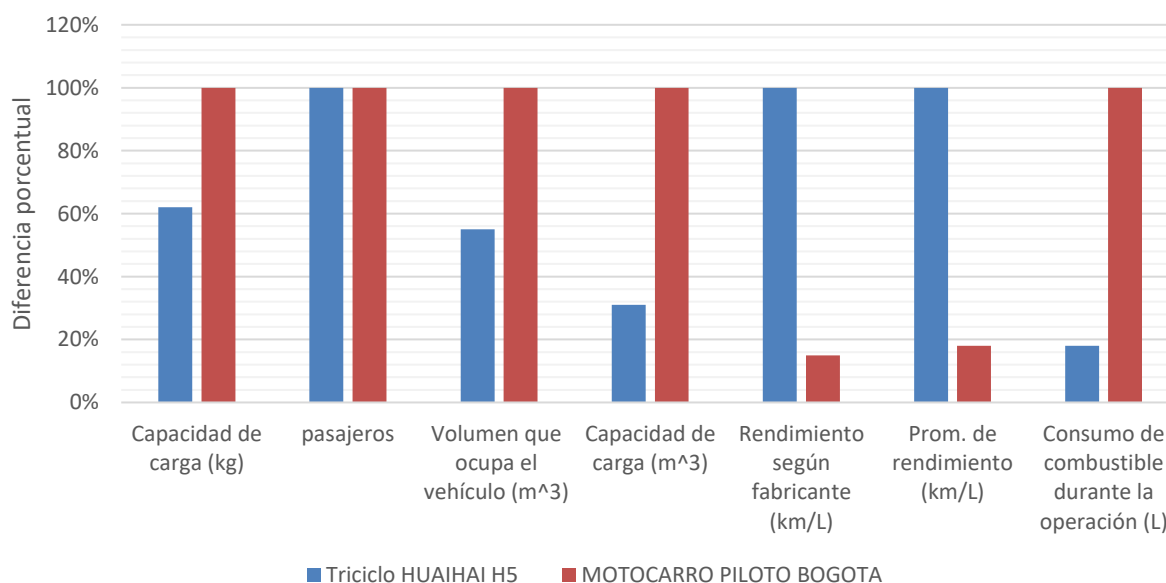
Con respecto a los datos técnicos calculados a partir del levantamiento de información de la línea base y los obtenidos a través de la prueba piloto del motocarro, se encuentran las siguientes relaciones:

- El vehículo motocarro obtuvo un rendimiento de combustible 5,50 veces menor al del vehículo de línea base, adicionalmente esta relación es directamente proporcional al consumo de combustible en el tanque.

Teniendo en cuenta las relaciones porcentuales, en la Figura 7-3 se puede apreciar que el vehículo motocarro obtuvo cuatro relaciones porcentuales superiores a la del vehículo de línea base en cuanto a la capacidad de carga en masa y volumen, el volumen que ocupa el vehículo, y el consumo de combustible durante la operación. A partir de lo anterior se tiene que el vehículo motocarro posee un 38% más de capacidad de carga en términos de masa y es un 69% superior en términos de volumen que el vehículo de línea base.

Por último se resalta que el vehículo motocarro consumió un 82% más de combustible que el vehículo de línea base y adicionalmente se evidencia que el motocarro ocupa un 45 % más de volumen en el espacio vehicular que el vehículo de línea base, lo que infiere que el vehículo de línea base tiene una mayor agilidad por el tráfico vehicular.

Figura 7-3. Comparación de características técnicas de vehículos en empresa 3.



Nota: Fuente propia.

7.3.2 Desempeño económico

A partir de la Tabla 6-8 y el valor comercial del vehículo motocarro enunciado en el apartado 3.2, se construye la Tabla 7-10 donde se evidencia que el vehículo motocarro es 1,33 veces más costoso que el vehículo tipo triciclo eléctrico HUAIHAI H5.

Tabla 7-10. Comparación de valores comerciales de vehículos empresa 3.

	Triciclo HUAIHAI H5	Motocarro Piloto Bogotá	Diferencia	Diferencia %
Valor comercial [COP]	\$15'000.000	\$20'000.000	1,33	33

Nota: Elaboración propia.

Con respecto al costo de consumo de combustible se realiza el análisis a partir de la Tabla 6-4 en donde se calculó el costo total de combustible consumido por el vehículo de línea base y el apartado 5.3.4 donde se calculó el costo total de combustible consumido por el vehículo motocarro, dado lo anterior se construye la Tabla 7-11 en donde se evidencia que el vehículo motocarro consume 5,50 veces más combustible que el vehículo triciclo HUAIHAI H5.

Tabla 7-11. Comparación de costo del combustible consumido de vehículos empresa 3.

Criterio	Triciclo HUAIHAI H5	Motocarro Piloto Bogotá	Diferencia	Diferencia %
Costo total de combustible consumido [COP]	\$25.246,61	\$138.917	5,50	450

Nota: Fuente propia.

Adicionalmente se determina que el vehículo motocarro tiene un costo adicional por consumo de combustible del 450% con respecto al vehículo de línea base.

7.3.3 Desempeño ambiental empresa 3.

A partir de la Tabla 6-2 y la Tabla 5-20 se construye la Tabla 7-12 en donde se evidencia que el vehículo motocarro genera veces más CO_2 que el vehículo triciclo HUAIHAI H5.

Tabla 7-12. Comparativo de emisiones contaminantes generadas empresa 3.

Contaminante Criterio [g]	Triciclo HUAIHAI H5	Motocarro Piloto Bogotá	Diferencia	Diferencia %
CO₂	3.362,94	66.021,18	19,63	5

Nota: Fuente propia.

Adicionalmente se determina que el vehículo motocarro aumenta la emisión de este gas de efecto invernadero en un 95% con respecto al vehículo tipo triciclo eléctrico HUAIHAI H5.

7.3.4 Análisis conjunto para vehículos en empresa 3.

A partir de los análisis realizados anteriormente, es de resaltar que el vehículo motocarro presenta diferencias en cuanto a la mayoría de aspectos técnicos, debido a que no se obtuvo información de entregas diarias para ninguno de los dos vehículos, se resalta que el vehículo de línea base es la mejor elección debido a su bajo costo tanto comercial como de rendimiento de combustible y las emisiones de CO₂ que se generan a partir de la huella de carbono son muy bajas en comparación al vehículo motocarro.

7.4 Comparativo entre la operación de motocarros de las 3 empresas.

7.4.1 Comparativo de promedio de entregas por hora entre empresa 1 y empresa 2.

Debido a que en la ciudad de Bogotá no se obtuvieron datos por parte de la empresa transportadora respecto a los consolidados de carga, en la Tabla 7-13 se establece la comparación entre la empresa 1 y 2 en donde en la ciudad de Medellín se obtuvo una mayor media de entregas por hora.

Tabla 7-13. Entregas por hora en empresa 1 y 2.

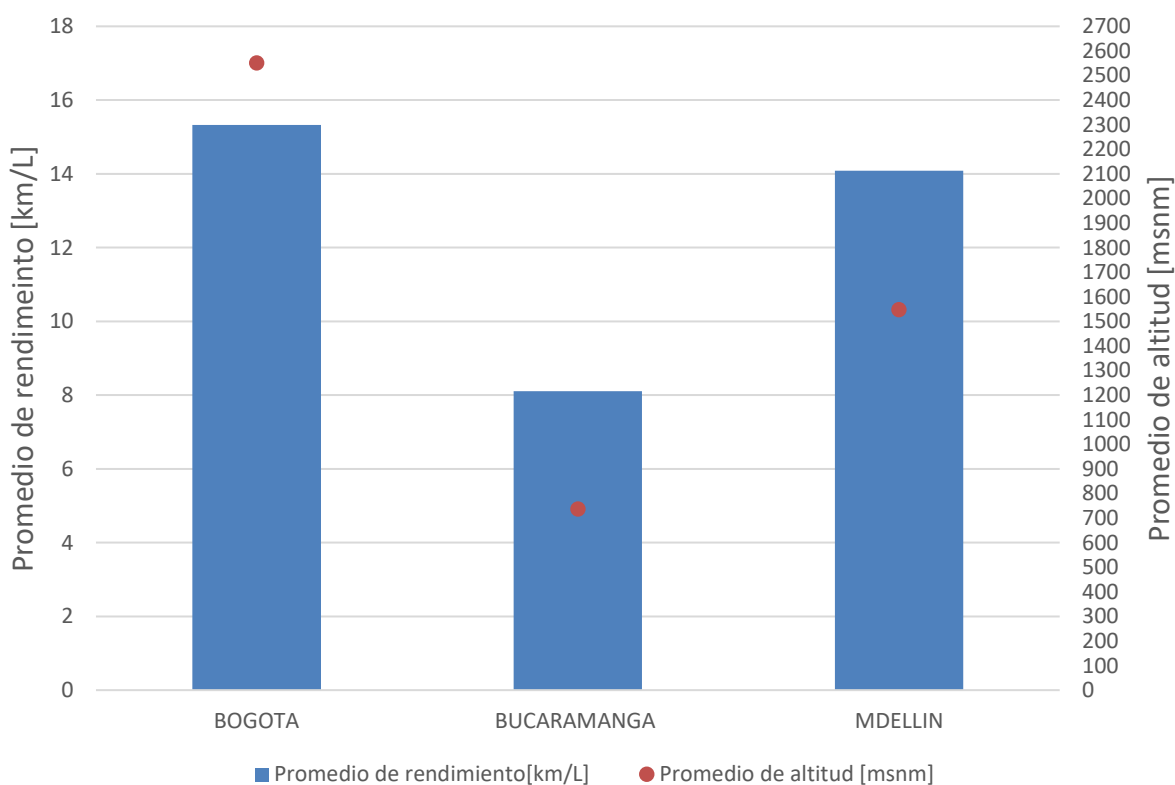
Ciudad	Cantidad de entregas/hora
Bucaramanga	10
Medellín	15

Nota: Fuente propia.

7.4.2 Comparativo de altitud y rendimiento de combustible.

A partir del promedio de altitud obtenido durante la operación del vehículo motocarro en cada una de las ciudades, en la Figura 7-4 se evidencia que para las ciudades de Bogotá y Medellín en donde se tiene una altitud promedio de operación de 2.551,88 y 1.548,21 [msnm] respectivamente, se obtuvo una mayor eficiencia de consumo de combustible que en la operación realizada en Bucaramanga la cual se encontraba a una menor altitud.

Figura 7-4. Altitud promedio vs rendimiento promedio en las 3 ciudades de operación.



Nota: Fuente propia.

7.4.3 Análisis de modelo de regresión lineal múltiple

Hay muchas técnicas de regresión en función del tipo de variables, las más elementales y potentes son las regresiones lineales, esta supone una relación entre dos variables la cual se le

conoce como “simple” pero esta suele ser insuficiente a la hora de entender fenómenos de mayor complejidad y que dependa de más de dos variables; a esta se le conoce como “múltiple”. [53]

Este análisis de regresión múltiple permite determinar que tanto se ajusta un modelo a los datos obtenidos por indicadores, para conocer este modelo se hace uso de (7-1).

$$y = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + b_3 * x_3 + b_4 * x_4 + b_5 * x_5 \quad (7-1)$$

Donde Y es la variable endógena o dependiente, x las variables exógenas o independientes y b los coeficientes estimados del efecto marginal entre cada x e y.

Para el caso de aplicación se desea conocer la relación de la distancia [km], altitud [msnm], pendiente [°], velocidad [km/h] y el consumo de combustible [L] con el rendimiento de combustible [km/L]. Debido a que la velocidad es una variable que depende de la distancia, no se analiza.

Dado anterior se agrupan los resultados obtenidos para cada una de las ciudades tal y como se evidencia en la Tabla 7-14.

Tabla 7-14. Variable dependiente y variables independientes de la regresión lineal múltiple.

y	X1	X2	X3	X4
Suma de RENDIMIENTO [km/L]	Suma de DISTANCIA [km]	Promedio de ALTITUD [msnm]	Promedio de PENDIENTE [°]	Suma de CONSUMO DE COMBUSTIBLE CORREGIDO [L]
14.54	10.47	705.84	0.26	0.72
5.34	5.44	708.09	0.08	1.02
8.16	9.95	674.39	0.18	1.22
10.25	6.97	666.51	0.21	0.68
8.53	6.05	716.65	-0.27	0.71
7.35	11.62	702.37	0.03	1.58
8.68	13.97	719.41	0.75	1.61
7.77	12.98	681.24	0.50	1.67
8.41	7.65	671.62	0.04	0.91
6.66	13.39	710.96	1.09	2.01

y	X1	X2	X3	X4
Suma de RENDIMIENTO [km/L]	Suma de DISTANCIA [km]	Promedio de ALTITUD [msnm]	Promedio de PENDIENTE [°]	Suma de CONSUMO DE COMBUSTIBLE CORREGIDO [L]
5.11	8.17	712.89	-0.80	1.60
5.88	12.41	734.78	0.82	2.11
6.97	13.80	798.49	-0.19	1.98
5.99	14.67	795.64	0.49	2.45
10.43	14.81	802.35	-0.05	1.42
7.65	22.27	813.69	0.54	2.91
6.96	16.84	779.82	-0.30	2.42
6.69	16.45	805.72	-0.15	2.46
9.93	17.18	802.87	-0.04	1.73
10.84	15.07	748.01	0.09	1.39
14.64	59.16	1571.64	0.01	4.04
12.01	47.68	1590.91	0.23	3.97
12.37	41.44	1544.94	0.29	3.35
18.07	33.42	1519.71	0.27	1.85
15.02	20.43	1537.77	0.04	1.36
14.81	38.65	1585.90	0.32	2.61
17.74	45.24	1527.89	0.16	2.55
9.69	26.85	1560.42	0.54	2.77
13.30	26.87	1557.66	0.13	2.02
14.59	46.83	1552.09	0.17	3.21
13.65	52.81	1510.37	-0.02	3.87
16.33	78.38	1498.41	0.27	4.80
12.83	16.42	1548.78	0.25	1.28
16.46	66.81	1565.32	0.18	4.06
10.07	34.42	1551.70	0.34	3.42
13.58	27.29	1531.09	0.05	2.01
14.27	56.10	1564.89	0.10	3.93
17.62	65.20	2559.58	-0.18	3.70
12.72	56.73	2547.47	-0.01	4.46
15.28	69.06	2559.57	-0.08	4.52
16.06	9.96	2548.66	-0.01	0.62
16.83	53.85	2547.89	-0.01	3.20
18.50	56.97	2550.69	0.02	3.08
14.66	53.65	2548.33	0.03	3.66
18.06	65.03	2549.75	0.04	3.60
17.13	57.05	2549.26	0.00	3.33

y	X1	X2	X3	X4
Suma de RENDIMIENTO [km/L]	Suma de DISTANCIA [km]	Promedio de ALTITUD [msnm]	Promedio de PENDIENTE [°]	Suma de CONSUMO DE COMBUSTIBLE CORREGIDO [L]
6.73	3.83	2549.02	-0.01	0.57
21.10	54.64	2555.42	0.02	2.59
13.61	55.13	2549.78	0.01	4.05
10.13	31.80	2548.26	0.01	3.14
17.69	91.71	2555.23	-0.03	5.19
13.78	121.49	2559.33	-0.01	8.82

Nota: Fuente propia

A partir de la hoja de cálculo de Excel, se halla la regresión lineal múltiple tal y como se observa en la Figura 7-5.

Figura 7-5. Resumen de regresión lineal múltiple.

Estadísticas de la regresión						
Coefficiente de correlación múltiple	0.940031481					
Coefficiente de determinación R ²	0.883659184					
R ² ajustado	0.873757838					
Error típico	1.498208814					
Observaciones	52					
ANÁLISIS DE VARIANZA						
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión	4	801.3001882	200.325047	89.2463695	2.41259E-21	
Residuos	47	105.4975935	2.244629649			
Total	51	906.7977817				
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	
b0	Intercepción	10.8192	0.668512775	16.18403536	7.59734E-21	9.474360161
b1	Variable X 1	0.3453	0.027679645	12.4753922	1.60227E-16	0.289630168
b2	Variable X 2	0.0008	0.000428933	1.955527964	0.056480593	-2.41114E-05
b3	Variable X 3	1.2122	0.738100668	1.642373401	0.107187641	-0.272630113
b4	Variable X 4	-4.5744	0.412177941	-11.09803466	9.98199E-15	-5.40356014
				Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
				12.16410863	9.474360161	12.16410863
				0.400998696	0.289630168	0.400998696
				0.001701693	-2.41114E-05	0.001701693
				2.697103923	-0.272630113	2.697103923
				-3.745170013	-5.40356014	-3.745170013

Nota: Fuente propia.

Debido a que el coeficiente de correlación múltiple es del 94% esto significa que hay una relación fuerte entre las variables y por tanto vale la pena hacer el análisis. Por último se

reemplazan los valores obtenidos en (5-2) y se obtiene la ecuación de regresión lineal múltiple. Se evidencia que el coeficiente de relación de la variable independiente de altitud es muy cercano a cero, esto implica que para todo valor de altitud que se ingrese en la ecuación este no tendrá un efecto representativo en el cambio del rendimiento.

$$\text{Rendimiento [km/L]} = 10,8192 + 0,3453 (\text{Distancia km}) + 0,0008(\text{Altitud msnm}) + 1,2122(\text{Pendiente } ^\circ) - 4,5744 (\text{consumo de combustible L}) \quad (7-2)$$

Por último se realiza un análisis de regresión lineal múltiple para cada ciudad, el procedimiento es igual al anteriormente descrito, por tanto los resultados se presentan en la Tabla 7-15.

Tabla 7-15. Regresión lineal múltiple para cada ciudad.

Ciudad	Regresión lineal múltiple	Coefficiente de correlación
Bucaramanga	Rendimiento [km/L] = 7,0012 + 0,6918 (Distancia km) + 0,0024(Altitud msnm) + 0,3787 (Pendiente °) – 5,7737 (consumo de combustible L)	93 % , R ² ajustado 82%
Medellín	Rendimiento [km/L] = 14,7306 + 0,3134 (Distancia km) + 0,0000(Altitud msnm) - 0,5068 (Pendiente °) – 4,6132 (consumo de combustible L)	96%, R ² ajustado 90%
Bogotá	Rendimiento [km/L] = 153,9917 + 0,3410 (Distancia km) – 0,0555(Altitud msnm) + 2,6123 (Pendiente °) – 4,4920 (consumo de combustible L)	88%, R ² ajustado 68%

Nota: Fuente propia.

Se evidencia que el coeficiente de altitud para la ciudad de Medellín tiende a ser cero, por ende es la ciudad en donde menos afecta esta variable en el rendimiento del vehículo.

7.4.4 Comparativo de emisiones generados en las 3 ciudades.

A partir de la Tabla 7-16 se puede evidenciar que la operación en la que el vehículo emitió mayor cantidad de CO_2 a la atmosfera fue en la ciudad de Bogotá, esto tiene coherencia ya que es donde el vehículo realizó el recorrido más largo.

Tabla 7-16. Emisiones generadas por motocarro en cada ciudad.

Ciudad	Distancia recorrida [km]	Cantidad de g de CO_2 emitido
Bucaramanga	250,17	19.520,77
Medellín	718,79	56.087,18
Bogotá	846,10	66.021,18

Nota: Fuente propia.

Es importante resaltar que estos resultados fueron determinados a partir de un único factor de emisión, sin embargo se tiene claridad que para futuros trabajos es necesario determinar un factor de emisión para cada ciudad por medio de la determinación de un ciclo de conducción representativo.

Conclusiones

En este estudio se realizó la implementación de una prueba piloto de 3 vehículos motocarro en la distribución de mercancías de última milla, la operación de los vehículos se dio en las ciudades de Bucaramanga, Medellín y Bogotá, en donde por medio de un GPS Concox GT06F, un sensor de combustible ultrasónico Concox USFSCX y la plataforma de visualización VisualSat, se obtuvieron datos en un periodo \approx de 6 semanas. Los motocarros utilizados cuentan con un motor de 4 tiempos mono cilíndrico de 236 cc y una potencia de 10,5 HP, una capacidad de carga de 515 kg y un tanque de combustible con capacidad para 12 L de gasolina.

Los datos obtenidos por medio de los sistemas de telemetría fueron recopilados en dos matrices, por lo tanto se realizó un cruce de información tomando como valor en común la fecha y hora en la que el sensor reportó una lectura, a partir de los datos de fecha y hora, longitud, latitud y nivel de combustible en el tanque, se obtuvieron las variables de intervalo de tiempo, altitud, ángulo de la pendiente, intervalo de distancia, velocidad, consumo de combustible en el tanque. Posteriormente se realizó un procesamiento de datos donde se descartan valores atípicos, distancias en las que el vehículo no se desplazó y los retanqueos que se realizaron en la operación, como también magnitudes que desde un punto de vista físico son imposibles de obtener.

Se determinaron aspectos técnicos en cuanto a la obtención de un indicador de rendimiento del vehículo en unidades de [km/L] para cada día de operación, como también un promedio de la operación total, consumo de combustible determinado por el fabricante, esto último tanto para motocarro como para vehículos de línea base. Por medio de los consolidados de carga se obtuvo los indicadores logísticos del promedio de la cantidad de [entregas/día/h] y el promedio de la [masa transportada/día], estos solo se consolidaron para la ciudad de Bucaramanga y Medellín, debido a que en la ciudad de Bogotá no se brindó información de los consolidados de carga. Se determinaron

los aspectos económicos en cuanto al costo de adquisición del vehículo motocarro en [COP] y el costo del combustible consumido durante toda la operación [COP]. En cuanto a los aspectos ambientales se estimó un factor de emisión de 78,03 [g/km] en base a un estudio realizado en el municipio de Soledad-Atlántico para vehículos *auto-rickshaw* y a partir de la distancia total que recorrió el motocarro en toda la operación se determinó una cantidad de g de CO_2 emitidos a la atmosfera.

Se estableció un comparativo del vehículo motocarro y la camioneta Changan MD201 cargo box en la ciudad de Bucaramanga, un motocarro y el camión Chevrolet NPR en la ciudad de Medellín y un motocarro y triciclo eléctrico Huaihai H5 en la ciudad de Bogotá. Debido a que no se contaba con información de telemetría de los vehículos de línea base, se estableció como parámetro de comparación la distancia recorrida por el motocarro igual a la distancia recorrida por el vehículo de línea base, con base en las fichas técnicas de los fabricantes se determinó la potencia del motor, la capacidad de carga en términos de masa y volumen, el rendimiento del vehículo [km/L], por medio de la información recopilada en los consolidados de carga se obtuvo los indicadores logísticos del promedio de la cantidad de [entregas/día/h] y el promedio de la [masa transportada/día], estos solo se consolidaron para la ciudad de Bucaramanga y Medellín, debido a que en la ciudad de Bogotá no se brindó información de los consolidados de carga de la línea base.

Se evidenció que para la ciudad de Bucaramanga el vehículo motocarro pese a ser menos robusto y poseer un motor de menor cilindrada, obtuvo un 33 % menos de rendimiento promedio, esto implicó un consumo de combustible superior del 48% y por ende un 12% más de costos de operación, esto se debe principalmente a que el valor comparado de rendimiento de combustible del vehículo de línea base es netamente teórico y calculado bajo condiciones ideales, es por esto que se hace necesario el calcular los consumos de combustible para vehículos de línea base de

operación, adicionalmente se determinó que el vehículo motocarro obtuvo un promedio de entregas menor del 66% y finalmente se obtuvo una reducción de emisiones de CO_2 del 77%; lo anteriormente descrito fue en comparación al vehículo camioneta Changan MD201 cargo box.

Para la ciudad de Medellín el vehículo motocarro al ser menos robusto y poseer un motor de menor cilindrada, obtuvo un 101 % más de rendimiento promedio, esto implicó un consumo de combustible inferior del 50% y por ende un 49% menos de costos de operación, esto se debe principalmente a que el valor comparado de rendimiento de combustible del vehículo de línea base es netamente teórico y calculado bajo condiciones ideales, es por esto que se hace necesario el calcular los consumos de combustible para vehículos de línea base de operación adicionalmente se determinó que el vehículo motocarro obtuvo un promedio de entregas menor del 75% y finalmente se obtuvo una reducción de emisiones de CO_2 del 87%. Lo anteriormente descrito es en comparación al vehículo camión Chevrolet NPR.

Para la ciudad de Bogotá el vehículo motocarro al ser más robusto y poseer un MCI obtuvo un 72 % menos de rendimiento promedio, esto implicó un consumo de combustible superior del 450% y por ende un 450% más de costos de operación, la razón principal se debe a que la eficiencia energética del vehículo de línea base es muy superior al vehículo motocarro pese a que sus especificaciones técnicas en cuanto a dimensiones de chasis y capacidad de carga son muy parecidas. Finalmente se obtuvo un aumento de emisiones de CO_2 del 95%. Lo anteriormente descrito es en comparación al vehículo triciclo eléctrico HUIHAI H5.

Se estableció un comparativo entre las operaciones realizadas por los vehículos motocarros en cada una de las ciudades por medio de la regresión lineal múltiple donde se determinó un coeficiente de correlación del 94 % tomando como variables independientes la distancia, el promedio de altitud, promedio del ángulo de la pendiente, el consumo de combustible y como

variable dependiente el rendimiento de combustible, esto determinó que el promedio de altitud no tiene una influencia en el rendimiento de combustible.

En términos generales el vehículo motocarro resulta ser una buena opción en la distribución de última milla, siempre y cuando se deba realizar entrega de mercancía proveniente del *ecommerce*, ya que si lo que se desea es transportar una gran cantidad de mercancía a puntos específicos resulta ser más eficiente la utilización de un vehículo de gran capacidad de carga. Adicionalmente se resalta que el vehículo motocarro obtiene una mayor capacidad para ingresar a lugares que no cuentan con una infraestructura vial adecuada, como también el espacio que ocupa para estacionarse, permite el flujo de vehículos son obstaculizar el tráfico.

Recomendaciones

En búsqueda de continuar con la línea de investigación propuesta en este estudio, se propone determinar un ciclo de conducción representativo a partir de la implementación de una flota de aproximadamente 10 vehículos motocarros por cada ciudad donde se desee implementar el piloto en un periodo de 3 meses, con el fin de estimar el consumo de combustible, determinar emisiones en el tubo de escape y realizar comparación de desempeño entre vehículos en la entrega de mercancías de última milla. Para esto es necesario mejorar el dispositivo de telemetría instalado en los vehículos; se propone implementar un GPS/Garmin 16x el cual posee un receptor de 12 canales de alta sensibilidad y una frecuencia de muestreo de 1 Hz, a su vez se recomienda el uso de un medidor de combustible instantáneo para caudales bajos y aplicación en motocicletas, por último se hace indispensable un analizador de gases para la obtención de los factores de emisión. Si se desea realizar un análisis comparativo entre el vehículo motocarro y los vehículos de línea base implementados en cada empresa, bien sea camiones, camionetas, triciclos, entre otros. Se

hace necesario realizar mediciones de posición, consumo de combustible y GEI, tanto para los vehículos motocarro como los vehículos de línea base, de tal modo que ambos vehículos posean un patrón en común el cual permita establecer de forma experimental un indicador de comparación, ya sea distancia recorrida, nivel de combustible en el tanque, masa transportada, cantidad de mercancía transportada en masa o volumen.

Se propone la implementación de una matriz origen-destino, la cual permita determinar los puntos de latitud y longitud en donde se realizó cada entrega, como también la cantidad de entregas en el mismo punto y la masa equivalente de la mercancía entregada, esto con el fin de determinar factores logístico de [cantidad de entregas/h], [intervalo de tiempo de entrega], [costo de entrega], entre otros.

Referencias Bibliográficas

- [1] EMBER, «Global Electricity Review 2022,» Londres, 2022.
- [2] U. d. P. Minero-Energético, «Proyeccion Demanda Electrica Gas Natural y Combustibles Liquidos 2022-2036,» 2022.
- [3] A. Martinez O., «Transición Energética y Retos del sector energético en Colombia,» Bogotá D.C., 2021.
- [4] E. T. d. L. DNP-DIES, «Encuesta Nacional Logística 2020,» www.puntoaparte.com.co, Bogotá D.C., 2020.
- [5] A. Saldarriaga Castrillón, «Modelación de la elección del motocarro como medio de transporte público en zonas rurales aplicación al municipio de Girardota,» Medellín, 2011.
- [6] A. Robledo Acosta , J. C. Venencia Miranda y R. N. Alvarez De La Cruz, «Evaluación del desempeño de un motocarro con motor de dos tiempos convertido a gas natural vehicular (GNV),» *PROSPECTIVA*, vol. 4, n° 2, pp. 74-79, 2006.
- [7] A. Gil Gallego, «La optimización de la última milla como clave para la implantación de una estrategia omnicanal caso de la empresa Pikolin,» n° 400, pp. 87-100, 2016.
- [8] S. K. Bermudez Gomez y C. E. Moreno Camacho, «Inclusión de motocarros eléctricos para el transporte de carga, que permita culminar los procesos logísticos en Bogotá de la organización Colombiana de Encomiendas S.A.,» Bogotá, Colombia, 2021.
- [9] L. E. Angulo Pérez y C. E. Romero Escudero, «Propuesta sobre la Importación de Motocarros en Colombia,» Bogotá, 2016.

- [10] S. Peláez Noguera y V. Dómine Redondo , «Modos de transporte eléctricos y logística urbana. Aplicación al caso valencia,» Valencia, 2019.
- [11] GS1 México, «GS1 México,» [En línea]. Available: <https://blog.gs1mexico.org/distribucion-de-ultima-milla-como-mejorarla>. [Último acceso: 23 Octubre 2022].
- [12] Rama legislativa, poder público, «Ley 769 de 2002,» Bogotá, 2002.
- [13] Ministerio de Transporte de Colombia, «Decreto 4125,» Bogotá D.C, 2008.
- [14] J. D. R. y J. I. H. C. N. Giraldo Peralta, «Conducción Eficiente Organización Corona,» Bogotá D.C, 2015.
- [15] A. . S. Muñoz Hoyos y V. Barrera Villegas, «Problema de localización y ruteo en ambientes de última milla,» Pereira, 2020.
- [16] A. Mujica, «driv.in,» 4 Abril 2022. [En línea]. Available: <https://n9.cl/xs2u3>. [Último acceso: 20 Septiembre 2022].
- [17] A. . A. Tejada Arana, M. V. Prado Coronado , A. Cárdenas Saavedra, T. Carranza Estela, J. C. Manrique Céspedes y V. I. Romani Franco, Administracion y logistica para los negocios, Guayaquil-Ecuador: Grupo Compás, 2022.
- [18] Ministerio de transporte de Colombia, «Consultoría para el diagnóstico integral de la prestación de servicio público del transporte terrestre automotor de pasajeros por carretera y mixto,» Bogotá, 2013.
- [19] A. Casanovas y L. Cuatrecasas, Logística Empresarial, Barcelona: Gestión 2000, 2003.
- [20] F. Maximilian Kreuzer y G. Wilmsmeier, «Eficiencia energética y movilidad en América Latina y el Caribe,» Santiago de Chile, 2014.

- [21] I. D. Cardenas Barbosa, Y. Borbon, T. Verlinden, E. Van de Voorde, T. Vanelslander y W. Dewulf, «City logistics, urban goods distribution and last mile delivery and collection. Competition and Regulation in Network Industries,» *Competition and regulation in network industries*, 2017.
- [22] J. A. C. Galindo, «Propuesta de modelo logístico de tracking para el transporte del producto terminado en la empresa BIG COFFEE,» Bogotá , 2020.
- [23] Dimerca, «Dimerca,» 2022. [En línea]. Available: <https://dimerca.com/producto/ape-extra-x-pick-up/>. [Último acceso: 02 Octubre 2022].
- [24] International Energy Agency, «Indicadores de eficiencia energética: Fundamentos estadísticos.,» París (France), 2016.
- [25] J. Villalobos Contreras, «Eficiencia energética en el transporte de carga por carretera,» Boletín FAL No. 281, 2010.
- [26] L. M. Calero Tascón, «Impactos del sector de la logística colombiana en el medio ambiente,» Universidad Piloto de Colombia, Bogotá D.C., 2014.
- [27] RCN Radio, «RCN Radio - Medio Ambiente,» 24 Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.rcnradio.com/estilo-de-vida/medio-ambiente/medellin-bogota-y-cali-son-las-ciudades-colombianas-con-mayor-0>. [Último acceso: 05 10 2022].
- [28] F. Y. N. (. ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, «Factores de Emision de los Combustibles Colombianos,» Bogotá, 2003.
- [29] Y. A. Fernandez Romero, «Análisis de consumo de combustible de vehículos de carga al aplicar técnicas de conducción eficiente,» Bogotá D.C., 2020.

- [30] N. A. Bedoya Padilla, «Implementación del sistema de telemetría,» Ciudad de México, 2019.
- [31] Taringa, «Taringa!,» 2010. [En línea]. Available: https://www.taringa.net/+autos_motos/formula-1-la-telemetria-y-sensores_xq5qr. [Último acceso: 1 Agosto 2022].
- [32] MCI telecom, «MCI telecom,» 2022. [En línea]. Available: <https://mcitelecom.com/rastreo-gps/>. [Último acceso: 01 Agosto 2022].
- [33] G. UMA, «Grupo UMA,» 2022 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://n9.cl/84p3l>. [Último acceso: 4 Octubre 2022].
- [34] O. D. Eljaik Gómez, «Estimación del consumo de combustible y emisiones de CO2 en auto-rickshaws bajo la metodología de microviajes en el municipio de Soledad - Colombia,» Barranquilla, 2022.
- [35] O. Gómez, «Estimación del consumo de combustible y emisiones de CO2 en auto-rickshaws bajo la metodología de micro viajes en el municipio de Soledad-Atlántico.,» Soledad, 2022.
- [36] K. Palacios, «Motocarros generan hasta un 22% de ahorro,» *América Retail*, 2022.
- [37] «RedGps,» [En línea]. Available: <https://www.redgps.com/dispositivos-gps/concox-gt06f>. [Último acceso: 09 septiembre 2022].
- [38] Concox, «Ultrasonic Fuel Level Sensor, User Manual».
- [39] VisualSat, «Visualsatco,» [En línea]. Available: <https://www.visualsatco.com/visualsat.com/>. [Último acceso: 01 Octubre 2022].

- [40] Adam Schneider, «GPS Visualizer,» Octubre 2002. [En línea]. Available: <https://www.gpsvisualizer.com/>. [Último acceso: 24 Septiembre 2022].
- [41] C. D. Amaya Jaramillo y D. P. Carrera Chicaiza, «Sistema de monitoreo pasivo para vehículos mediante GPS,» Quito, 2010.
- [42] TuDashboard, «TuDashboard,» 7 Julio 2021. [En línea]. Available: <https://n9.cl/11g6k>. [Último acceso: 6 Octubre 2022].
- [43] A. F. Beltran, «Caso 21 Distribución T Student. Intervalo de confianza.,» 2022.
- [44] infobae, «Increíble coincidencia entre Gustavo Petro y el Centro Democrático por el precio de los combustibles,» *infobae*, 2022.
- [45] C. AUTO, «Ficha técnica MD201 Cargo Box».
- [46] Chevrolet, «Ficha técnica camión NPR Reward EURO IV,» 2022.
- [47] HUAIHAI, «huaihaiglobal,» [En línea]. Available: <http://es.huaihaiglobal.com/logistics-electric-vehicle-product/>. [Último acceso: 1 Octubre 2022].
- [48] Universidad de Antioquia ; UPME, «Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos,» Bucaramanga, 2021.
- [49] Secretaría de ambiente, «Inventario de emisiones de bogotá, contaminantes atmosféricos 2020,» Bogotá, 2020.
- [50] Minenergía, upme y xm, «Factores de emisiones de la red de energía eléctrica en Colombia.,» 2021.
- [51] S.M, «Eléctricos vs combustión: diferencias de consumo, rendimiento y coste por kilómetro.,» *ABC Motor*, 2020.
- [52] Ibáñez, «"El motor de combustión es el más eficiente hoy": FALSO,» *motorpasión*, 2012.

- [53] R. Montero Granados, «Modelos de regresión lineal múltiple,» Granada-España, 2016.
- [54] B. Saini , R. Verma, . S. Himanshu y S. Gupta, «Analysis of exhaust emissions from gasoline powered vehicles in a sub-urban Indian town Analysis of Exhaust Emissions from Gasoline Powered Vehicles in a Sub-urban Indian Town,» Asia, 2013.
- [55] J. D. Murcia, «Conozca cuánto puede llegar a reducir su huella de carbono si se moviliza en bicicleta,» *La República*, 24 Marzo 2022.