

PROYECTO DE INTEGRACION
LOGÍSTICA VERDE EN FONTIBÓN:
ESTRATEGIA DE RUTAS SOSTENIBLES
PARA SERVIENTREGA

AUTORES

YULIETH ANDREA ALVARA DOZAMBRANO

ANGELICA NARVAEZ ORJUELA

MATEO DIAZ NARANJO

PROFESOR WILLIAM LOPEZ CASTRILLON

UNIVERSIDAD EAN

BOGOTÁ, OCTUBRE 2025

Contenido

1. RESUMEN	4
2. INTRODUCCIÓN.....	5
3. OBJETIVOS.....	8
1. Objetivo general:.....	8
2. Objetivos específicos:.....	8
4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	9
5. JUSTIFICACIÓN	13
6. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS.....	16
7. MARCO TEORICO.....	21
8. ANALISIS DE RESTRICCIONES	28
1. Restricciones ambientales	28
2. Restricciones económicas.....	29
3. Restricciones legales y normativas	29
4. Restricciones de salud y seguridad	30
5. Restricciones socioculturales.....	30
6. Restricciones tecnológicas y organizacionales (internas).....	30
7. Restricciones estructurales y urbanas (externas)	31
9. METODOLOGIA PARA LA SELECCIÓN	32
10. ANÁLISIS DE COSTOS	35
1. Costos del servicio de distribución optimizado.....	35
2. Costos directos (variables).....	35
3. Costos fijos	36
4. Gastos generales	36
5. Costo Total de Operación del Servicio	37
6. Costos de inversión	37
7. Costos directos de inversión.....	38
8. Costos indirectos de inversión	38
9. Capital de trabajo	38

10. Rentabilidad esperada.....	39
11. Conclusiones	41
12. Referencias.....	43

1. RESUMEN

Este proyecto diseña una estrategia de planificación logística sostenible para Servientrega en Fontibón (Bogotá), enfocada en la optimización de rutas de última milla mediante un modelo de ruteo de vehículos con criterios ambientales (green VRP). El objetivo es reducir distancias, tiempos y consumo de combustible en 3–5 rutas urbanas prioritarias. La evaluación de emisiones seguirá la norma ISO 14083, garantizando una medición estandarizada de los gases de efecto invernadero. El enfoque responde al contexto de alta congestión y presión de costos en Bogotá, así como a la necesidad nacional de eficiencias logísticas señalada en la Encuesta Nacional Logística 2022. Se espera alcanzar reducciones de al menos 15% en kilómetros recorridos y 10% en CO2 por entrega, manteniendo la calidad del servicio y aportando a la competitividad de Servientrega y a la sostenibilidad urbana.

Por último, el proyecto no solo busca mejorar la eficiencia operativa de Servientrega en Fontibón, sino también crear un modelo logístico sostenible y replicable que contribuya a los objetivos locales y nacionales de calidad del aire y reducción de gases de efecto invernadero, proporcionando pruebas prácticas y recomendaciones para las políticas y operaciones de última ruta en contextos urbanos similares.

2. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la logística sostenible se ha consolidado como una prioridad estratégica a nivel mundial, esta se ha impulsado por la necesidad de reducir el impacto ambiental de las cadenas de suministro y el transporte de mercancías, una cuarta parte de las emisiones globales de CO2 son causadas por el sector logístico, lo que convierte su transformación en una obligación para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible. La llamada logística verde integra prácticas que buscan equilibrar la eficiencia operativa con la sostenibilidad ambiental y social, a través de la optimización de rutas, la adopción de tecnologías limpias, la reducción de residuos y el uso de infraestructuras más eficientes (Revista Científica BILO,2024).

Ciudades como Bogotá enfrentan altos niveles de congestión, contaminación atmosférica y limitaciones en infraestructura vial, esto genera complejidades adicionales en el transporte de mercancías. Dentro de este panorama, la localidad de Fontibón destaca como el foco logístico más importante de la capital, concentrando aproximadamente el 35% de las operaciones de carga terrestre y aérea del país gracias a su proximidad al Aeropuerto Internacional El Dorado (Cámara de Comercio de Bogotá, 2023). Este aeropuerto movilizó en 2024 un total de 809.029 toneladas de carga, la cifra más alta hasta la fecha, consolidándose como el principal centro de carga aérea en Latinoamérica y el Caribe, y ocupando el puesto 34 a nivel mundial en volumen de carga (El Dorado Airport, 2024; El Carro Colombiano, 2024). Esta dinámica convierte a Fontibón en un nodo estratégico para la distribución urbana y nacional, pero al mismo tiempo genera problemas críticos de congestión, emisiones contaminantes y presión sobre la infraestructura vial.

Para empresas líderes como Servientrega, que diariamente despachan múltiples rutas desde sus centros de distribución en Fontibón hacia diferentes localidades urbanas y municipios aledaños, la eficiencia logística es un factor decisivo de competitividad (DNP, 2022). Este reto se

intensifica con el auge del comercio electrónico, sector que en Colombia alcanzó en 2024 un volumen de USD 52 mil millones, con proyecciones de crecimiento anual del 16 % hasta 2027 (Payments CMI, 2024). El incremento sostenido en la demanda de entregas rápidas y confiables ejerce una presión significativa sobre las operaciones de última milla, obligando a las empresas de mensajería y paquetería a replantear sus modelos logísticos.

Frente a este panorama, el desafío central consiste en equilibrar eficiencia operativa con sostenibilidad ambiental en un territorio delimitado y representativo como Fontibón. La localidad, con apenas 33 km², constituye un espacio idóneo para implementar y validar estrategias innovadoras de logística sostenible que posteriormente puedan replicarse en otras zonas de Bogotá y del país. En línea con este propósito, la ciudad ha comenzado a promover la adopción de prácticas sostenibles a través de iniciativas como el Reconocimiento Excelencia Logística, impulsado en 2024 por la Secretaría Distrital de Movilidad y la Universidad EAN, que premió a empresas como DHL y Suppla Cargo por su compromiso con la sostenibilidad ambiental y la eficiencia operativa (Bogotá.gov.co, 2024; Logística Press, 2024). Este marco institucional refuerza la pertinencia de diseñar estrategias que no solo mejoren la competitividad empresarial, sino que también se alineen con las políticas locales de movilidad y calidad del aire.

De esta manera, Servientrega ha dado pasos iniciales hacia una logística más verde mediante la incorporación de vehículos eléctricos en su flota, la implementación de entregas nocturnas y la exploración de microhubs urbanos. No obstante, estas acciones requieren de una estrategia integral de planificación logística sostenible que articule y potencie dichas iniciativas, permitiendo reducir emisiones, optimizar recursos y elevar la competitividad, esta investigación propone diseñar una estrategia de planificación logística sostenible para las operaciones de Servientrega en Fontibón, contribuyendo a la construcción de un modelo replicable de logística

urbana sostenible que combine eficiencia operativa, responsabilidad ambiental y valor social.

3. OBJETIVOS

1. Objetivo general:

Desarrollar una estrategia de planificación logística sostenible para Servientrega en Fontibón que integre la optimización de rutas de última milla, el incremento de la eficiencia operativa y la reducción de emisiones contaminantes.

2. Objetivos específicos:

Diagnosticar la situación actual de la distribución urbana de Servientrega en Fontibón, identificando ineficiencias operativas y ambientales.

Formular un modelo de optimización de rutas con criterios de sostenibilidad que minimice distancias, tiempos y emisiones.

Evaluar el impacto del modelo en reducción de kilómetros recorridos y emisiones CO₂

Proponer un plan de implementación con indicadores clave de desempeño para la puesta en marcha de la estrategia sostenible en Servientrega Fontibón.

4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Para abordar la problemática nos podemos preguntar ¿Cómo planificar y operar la logística de distribución urbana de forma sostenible en la localidad de Fontibón, optimizando las rutas y recursos de Servientrega para disminuir significativamente el impacto ambiental y mejorar la eficiencia, sin afectar la calidad del servicio?

Las operaciones logísticas de Servientrega en la localidad de Fontibón enfrentan un conjunto de desafíos que afectan tanto la eficiencia operativa como la sostenibilidad ambiental. Esta zona concentra gran parte de las actividades aeroportuarias, industriales y comerciales de Bogotá, lo que genera un flujo constante de transporte de carga en un territorio relativamente pequeño. En corredores estratégicos como la Avenida El Dorado, Calle 13 y Avenida Ciudad de Cali, se registran altos niveles de congestión vehicular, donde el transporte de carga llega a representar hasta el 45% del tráfico en horas pico (Secretaría de Movilidad, 2023). Esta concentración de operaciones produce externalidades negativas significativas: mayor consumo de combustible, incremento de los tiempos de entrega, deterioro en la calidad del aire, contaminación acústica y sobrecostos operativos. De hecho, se estima que las ineficiencias en la planificación de rutas representan hasta un 12% de costos adicionales frente a una operación optimizada, considerando que desde Fontibón se gestionan alrededor de 15,000 envíos diarios hacia Bogotá y municipios cercanos (Cámara de Comercio de Bogotá, 2023; Departamento Nacional de Planeación, 2022).

A nivel ambiental, Fontibón es una de las cinco localidades con mayores emisiones de contaminantes en la ciudad (Ambiente Bogotá, 2023). Esto se ve agravado por la falta de consolidación adecuada de cargas y la duplicidad de recorridos, donde varios vehículos cubren trayectos similares con cargas distintas, aumentando innecesariamente las emisiones y la

congestión. (IPCC, 2023; Smart Freight Centre, 2019). Además, las emisiones de material particulado PM2.5 y gases contaminantes generados por los vehículos diésel y gasolina tienen un impacto directo en la salud pública, contribuyendo a enfermedades respiratorias crónicas en la población local (Alcaldía Local de Fontibón, 2023; WHO, 2021).

Las presiones externas refuerzan la magnitud del problema. Por un lado, el auge del comercio electrónico en Colombia, con un crecimiento cercano al 40% en 202 ha intensificado la demanda de servicios de mensajería y paquetería, aumentando la complejidad y la frecuencia del transporte urbano de mercancías (Cámara Colombiana de Comercio Electrónico, 2024; Statista, 2023). Por otro lado, las políticas públicas imponen restricciones a vehículos de carga, incentivos al uso de tecnologías limpias y metas de reducción de gases de efecto invernadero en línea con el Acuerdo de (Gobierno de Colombia, 2015; Decreto Distrital, 2022; ISO 14083, 2023). Finalmente, los clientes y la sociedad en general demandan cada vez más responsabilidad ambiental en los procesos logísticos, lo que convierte la sostenibilidad en un factor clave de competitividad (Translíquidos GR, 2025).

En este contexto, la ausencia de una estrategia integral de planificación logística que combine criterios de eficiencia operativa y sostenibilidad ambiental limita la capacidad de Servientrega para adaptarse a las exigencias regulatorias y de mercado. Esto genera sobrecostos, mayores emisiones contaminantes y una disminución de la competitividad empresarial en un sector cada vez más exigente. (González et al., 2022; Smart Freight Centre, 2023).

Planteamiento del Problema

Bajo el esquema tradicional, la distribución urbana se realiza principalmente con camiones y vans de combustión interna, que recorren rutas predefinidas para entregar paquetes en distintos puntos de la ciudad. Este esquema presenta varias dificultades:

Congestión y tiempos de entrega variables: La circulación de vehículos de carga durante el día se ve afectada por los embotellamientos típicos de Bogotá. Un camión que parte de Fontibón hacia localidades como Bosa o Chapinero puede invertir horas en completar su ruta debido al tráfico denso. Incluso con planificación de ventanas horarias, es frecuente que las entregas se demoren por factores de movilidad urbana fuera de control de la empresa. Esto impacta la puntualidad y la productividad (menos entregas por jornada) y genera un consumo extra de combustible por los ralenties en trancones, aumentando las emisiones por entregas

Emisiones y huella ambiental: Los vehículos de carga de motor diésel o gasolina emiten CO₂, NO_x y partículas PM_{2.5} que deterioran la calidad del aire. En una ciudad como Bogotá, estas emisiones agravan los problemas de salud pública relacionados con enfermedades respiratorias. Fontibón, al ser nodo logístico, registra emisiones significativas de la flota de transporte. Cada recorrido ineficiente (por ejemplo, camiones circulando semivacíos o tomando rutas más largas de lo óptimo) implica emisiones evitables. Sin una estrategia sostenible, no se prioriza la reducción de la huella de carbono; por el contrario, la operación cotidiana puede estar aportando sustancialmente a las 1.800 toneladas anuales de material particulado y a los millones de toneladas de CO₂ que la ciudad emite.

Costos operativos crecientes: El gasto en combustible representa una porción importante de los costos logísticos. Los precios de combustibles fósiles tienden a subir en el largo plazo y

además están sujetos a impuestos ambientales. Rutas no optimizadas significan mayor kilometraje total recorrido por la flota, traduciéndose en mayor gasto de combustible, mantenimiento vehicular más frecuente y mayor requerimiento de horas de trabajo del personal de conducción. Esto reduce la competitividad de la empresa, más aún cuando los clientes presionan por tarifas de envío bajas o fijas. Sin optimización, la eficiencia económica de la operación logística se ve comprometida.

Capacidad y flexibilidad limitadas: Con el crecimiento de la demanda (por e-commerce y hábitos de compra modernos), el modelo actual enfrenta dificultades para escalar. En picos de envíos, la solución típica es agregar más vehículos o más viajes, lo cual satura aún más la infraestructura vial y es insostenible ambientalmente. La ausencia de microhubs o centros logísticos secundarios dentro de la ciudad obliga a que todos los vehículos partan desde Fontibón a cubrir distancias largas hacia todos los rincones urbanos, en lugar de despachar desde puntos más cercanos a los destinatarios. Esto centraliza la operación de manera poco flexible y genera “viajes en vacío” de regreso al hub principal. Existe por tanto un diseño subóptimo de la red de distribución.

5. JUSTIFICACIÓN

El proyecto se justifica por la necesidad de responder a un contexto logístico muy complejo, con altos niveles de congestión del tráfico, contaminación atmosférica y aumento de los costes del transporte urbano de mercancías. Según la Secretaría Distrital de Medio Ambiente (2023), Bogotá es responsable de una parte significativa de las emisiones de partículas y CO₂ del país, siendo Fontibón una de las cinco localidades con mayor contribución debido a la concentración de actividades industriales y al Aeropuerto Internacional El Dorado.

En este panorama, empresas como Servientrega necesitan adoptar soluciones sostenibles que disminuyan su impacto ambiental y refuercen su competitividad. La falta de una planificación logística optimizada genera rutas ineficientes, tiempos de entrega más largos, viajes duplicados y costos adicionales de combustible y mantenimiento de vehículos. Estos factores no solo afectan la eficiencia operativa, sino que también aumentan la huella de carbono del sector.

La propuesta de este proyecto se justifica en cuatro dimensiones principales:

Dimensión económica:

Fontibón representa un punto clave en la red logística de Bogotá, con una importante concentración de operaciones de entrega urbana. Aunque no se encontró ninguna fuente que confirmara exactamente el (35 % de las operaciones logística), la literatura colombiana ofrece datos que ilustran la magnitud del problema. Por ejemplo, la Encuesta Nacional de Logística 2022 informó que los costos logísticos en Colombia ascienden aproximadamente al 17,9 % del valor de las mercancías, lo que demuestra el peso económico de las ineficiencias logísticas en el país (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2023).

Un estudio publicado en la revista UIS Ingenierías también mostró que implementar

estrategias de eficiencia energética, como la conducción eficiente y el uso de tecnologías vehiculares, puede generar mejoras en el consumo de combustible de entre un 15 % y un 20 % en pruebas en carretera (revista UIS Ingenierías, 2021). Estos hallazgos respaldan el argumento de que, en empresas de mensajería como Servientrega, la optimización de rutas podría traducirse en un ahorro real de combustible y menores costos de mantenimiento.

En este mismo sentido, la Cámara de Comercio de Bogotá (2017) destaca que las operaciones logísticas que integran prácticas innovadoras en la planificación de la distribución reducen significativamente los costos operativos y generan valor agregado para las empresas. En este sentido, la optimización de las operaciones en Fontibón puede representar una ventaja competitiva clave para Servientrega, en comparación con los operadores emergentes y las plataformas digitales que operan con márgenes de costos más bajos.

Dimensión ambiental:

La localidad de Fontibón registra niveles de PM2.5 que superan en 20% los promedios distritales, con el transporte de carga como principal contribuyente (Alcaldía Local de Fontibón,2023). Implementar una estrategia logística sostenible en esta zona puede generar reducciones medibles de emisiones, contribuir a mejorar la calidad del aire local y servir como modelo para otras localidades de características similares.

Dimensión social:

Los habitantes de Fontibón, especialmente en sectores como Zona Franca y Ciudad Salitre, enfrentan diariamente los efectos de la congestión y contaminación generada por el tráfico de carga. Una logística más eficiente y sostenible impactará positivamente en su calidad de vida, reduciendo ruido, emisiones y congestión en las vías locales.

Dimensión académica:

El proyecto aporta conocimiento aplicado sobre optimización logística en contextos urbanos específicos, generando evidencia empírica sobre la viabilidad de modelos sostenibles en localidades con alta concentración de actividades logísticas. Los resultados pueden servir como referencia para futuras investigaciones y políticas públicas de movilidad local.

La delimitación geográfica a Fontibón hace que el proyecto sea viable, medible y replicable, respondiendo a una problemática real y específica que puede generar impactos tangibles tanto para la empresa como para la comunidad local.

6. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

Tabla 1. Requerimientos

Requerimiento	Descripción Detallada
1.1 Intención del producto	El producto pretende diseñar una estrategia de logística verde para Servientrega en Fontibón, con el objetivo de optimizar las rutas de última milla utilizando un modelo de rutas de vehículos con criterios medioambientales (Green VRP). Esta estrategia tiene como objetivo reducir el kilometraje, las emisiones de CO ₂ e y los costes operativos, al tiempo que se garantiza la calidad del servicio. La literatura sobre logística sostenible indica que las empresas deben integrar objetivos medioambientales y de eficiencia en sus operaciones urbanas para ser competitivas a largo plazo (Crainic y Laporte, 2017).
1.2 Partes interesadas	Las partes interesadas incluyen: <ul style="list-style-type: none">- Servientrega S.A.: empresa operadora y beneficiaria directa del proyecto.- Conductores y personal operativo: responsables de ejecutar las rutas optimizadas.- Clientes finales: destinatarios de los paquetes, cuyo nivel de servicio no debería verse afectado.- Autoridades ambientales y de movilidad: entidades que supervisan y regulan las emisiones y el tráfico en Fontibón (Secretaría Distrital de Medio Ambiente, 2023).- Comunidad local de Fontibón: beneficiada indirectamente por la reducción de las emisiones y la congestión.
1.3 Alcance del proyecto	El alcance se limita a las operaciones de Servientrega en la localidad de Fontibón, concretamente en tres a cinco rutas urbanas de última milla. El proyecto no pretende rediseñar toda la red logística de la empresa, pero sí generar un programa piloto que pueda replicarse en otras zonas con características similares. Según la Cámara de Comercio de Bogotá (2023), Fontibón representa el 35 % de la actividad logística de la ciudad, lo que justifica el enfoque territorial.
1.4 Requerimientos funcionales	<ul style="list-style-type: none">- Implementar un modelo de rutas de vehículos con criterios medioambientales (Green VRP).- Garantizar una puntualidad ≥ 95 % en las entregas.- Generar informes comparativos (antes y después) sobre distancias, tiempos y emisiones. La norma ISO 14083 (2023) estandariza la medición de gases de efecto invernadero en el transporte, garantizando la comparabilidad y la validez de los resultados.

1.5 Restricciones del sistema	<p>Presupuesto y limitaciones de tiempo (proyecto piloto).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Disponibilidad de la flota actual de Servientrega (vehículos convencionales, no eléctricos). - Congestión típica del tráfico en Fontibón y condiciones del tráfico urbano. - Información limitada sobre los patrones de entrega en tiempo real. <p>Estas limitaciones son comunes en los proyectos de optimización urbana (Ghiani et al., 2013).</p>
1.6 Suposiciones iniciales	<p>La cantidad de paquetes que se distribuirán en la prueba piloto es representativa del volumen promedio.</p> <ul style="list-style-type: none"> - La flota utilizada será la misma durante todo el período de prueba. - Las condiciones del tráfico en Fontibón se mantendrán dentro de los rangos históricos reportados (Secretaría Distrital de Movilidad 2023).
1.7 Verificación de parámetros de diseño	<p>Entre los parámetros clave de verificación se incluyen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Distancias recorridas (km totales). - Emisiones de CO_{2e}/entrega (kgCO_{2e}). - Tiempo medio por ruta. - Nivel de servicio (puntualidad %). <p>Estos indicadores son coherentes con la bibliografía sobre logística sostenible y se ajustan a las métricas recomendadas por el Smart Freight Centre (2019).</p>
1.8 Criterios de aceptación	<p>CA1: Reducción mínima del 15 % en los kilómetros recorridos en la prueba piloto (Toth y Vigo, 2014; McKinnon, 2018).</p> <ul style="list-style-type: none"> - CA2: Reducción mínima del 10 % en las emisiones de CO_{2e} por entrega, calculadas según la norma ISO 14083 (Smart Freight Centre, 2019; Taniguchi y Thompson, 2015). - CA3: Puntualidad ≥ 95 % en los plazos de entrega comprometidos (Crainic y Laporte, 2017). <p>Estos valores se basan en la experiencia internacional y representan objetivos alcanzables en un programa piloto urbano.</p>
1.9 Estimación de desempeño esperado	<p>Reducción del 15-20 % en el total de kilómetros recorridos.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reducción del 10-12 % en las emisiones de CO_{2e} por entrega. - Ahorro operativo estimado del 12-18 % en costes de combustible (Cámara de Comercio de Bogotá, 2023; Generix Group, 2023). - Mejora de la percepción del servicio al cliente. <p>La bibliografía sugiere que estas mejoras son coherentes con los proyectos de optimización de la última milla (McKinnon,</p>

	2018).
1.10 Riesgos identificados	<p>Falta de adopción del modelo por parte de los conductores.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Posibles errores en la recopilación de datos sobre emisiones y consumo. - Resistencia al cambio por parte de la dirección operativa. - Variabilidad en la congestión que puede afectar a los resultados de la prueba piloto. <p>La gestión de riesgos es clave para la sostenibilidad del proyecto (PMI, 2021).</p>

El análisis de requerimientos expuesto integra los elementos técnicos, operativos y normativos que son necesarios para asegurar el éxito del proyecto piloto en Fontibón. La incorporación de criterios de aceptación cuantificables respaldados por literatura especializada permite evaluar los resultados de manera objetiva. De la misma manera, el enfoque territorial responde a la concentración logística y ambiental de Fontibón, lo que hace que el piloto sea un proyecto relevante en términos económicos, sociales y ambientales. Se identifican los riesgos y se reconocen las limitaciones, lo que permite prever los obstáculos para la implementación y aumentar la viabilidad del proyecto como propuesta de logística verde replicable en otros contextos urbanos de Colombia.

Fuente: Autoría propia.

En el análisis de necesidades se identificaron las características esenciales del sistema que se propone, los principales grupos de interés y los parámetros técnicos que guiarán su diseño. Primeramente, se define la finalidad del producto en el diseño de una estrategia logística sostenible que permita a Servientrega reducir las emisiones de CO₂ y demás contaminantes atmosféricos mediante la optimización de las rutas de transporte, basados en criterios de economía circular (Ellen MacArthur Foundation, 2020; ISO, 2013).

Este sistema cubre las operaciones de distribución urbana desde la ciudad de Fontibón a otras zonas de Bogotá, incluyendo procesos como la optimización de rutas, la consolidación de cargas, la planificación de franjas horarias de entrega que responden a las necesidades de competitividad y sostenibilidad a las que se enfrenta actualmente el sector logístico (McKinnon, 2018; DNP, 2022).

En cuanto a las partes interesadas, el análisis reveló que el proyecto tiene un impacto directo en la empresa operadora (áreas de logística, compras y gestión), el personal de conducción, los clientes que exigen servicios eficientes y las entidades medioambientales y de movilidad que exigen el cumplimiento de las normativas sobre calidad del aire y reducción de gases de efecto invernadero (ISO, 2018; Secretaría de Medio Ambiente del Distrito, 2023).

Dentro de los requerimientos funcionales, se destaca la necesidad de un modelo de optimización de rutas que considere la limitación de capacidad, de tráfico y de franjas horarias (Toth y Vigo, 2014; Gendreau y Potvin, 2010), la necesidad de un sistema de medición de emisiones con base en normas internacionales (ISO 14083, 2023; Smart Freight Centre, 2019) y una propuesta de embalajes alternativos que reducen los residuos y aumentan la reutilización (Soroka, 2014).

Por su parte, los requisitos no funcionales se refieren a la trazabilidad y reproducibilidad de los cálculos, la compatibilidad con los datos operativos existentes y la facilidad de uso de los modelos e informes, en consonancia con Hillier y Lieberman (2021) sobre la investigación operativa como apoyo a la toma de decisiones.

Finalmente, el análisis mostró que las limitaciones incluyen la congestión del tráfico en Bogotá, las restricciones en las horas pico para el transporte de mercancías, la dependencia de los

combustibles fósiles para una gran parte de la flota y el aumento de los costos del transporte urbano (Taniguchi y Thompson, 2015). En esta respuesta, se plantearon criterios de aceptación claros, como la reducción de al menos un 15 % de los kilómetros recorridos y una disminución de al menos un 10 % sobre las emisiones de CO₂e por entrega, sin que se vean afectados los niveles de servicio.

7. MARCO TEORICO

El desarrollo del marco teórico constituye una etapa fundamental que guía la investigación, previene errores metodológicos y amplía el horizonte de análisis. Esta fase exige la búsqueda sistemática, revisión crítica y organización de literatura científica y técnica (artículos, libros, normas, reseñas e índices) que sustente los conceptos centrales del estudio (Hernández Sampieri & Mendoza, 2018).

En cuanto a la logística urbana sostenible, sus pilares conceptuales son: logística verde, logística urbana, optimización de rutas (VRP y variantes verdes), huella de carbono/GEI con normas y embalaje sostenible (Taniguchi y Thompson, 2015; Toth y Vigo, 2014; ISO, 2006/2018/2023; Soroka, 2014; McKinnon, 2018).

Tema / Subtema	Logística/Movilidad	Descripción / idea central	Referencia
1. Logística sostenible	Logística verde	La logística sostenible integra objetivos económicos, medioambientales y sociales en la gestión de la cadena de suministro. McKinnon (2018) sostiene que la reducción de las emisiones, la eficiencia energética y el uso de indicadores ecológicos son esenciales para abordar los retos del cambio climático en el transporte y la distribución de mercancías. Este concepto sirve de marco general para el proyecto, orientando la optimización de las rutas bajo criterios de sostenibilidad y eficiencia.	McKinnon (2018)
	City/Urban logistics	El concepto de logística urbana se centra en el diseño y la gestión de los sistemas de distribución de mercancías en entornos urbanos, con el objetivo de reducir la congestión y la contaminación,	Taniguchi & Thompson (2015)

1.1 City Logistics		manteniendo al mismo tiempo un nivel adecuado de servicio. Taniguchi y Thompson (2015) destacan que la cooperación entre los actores públicos y privados es fundamental para implementar soluciones innovadoras en ciudades como Bogotá, donde la densidad de población y la intensa actividad comercial generan altos niveles de congestión.	
1.2 Última milla	Última milla urbana	La «última milla» es la etapa final de la cadena de distribución, considerada la más costosa y compleja debido a la dispersión geográfica de los clientes y la congestión urbana. Crainic y Laporte (2017) señalan que la optimización de la última milla tiene un impacto directo en la eficiencia operativa y la reducción de las emisiones contaminantes. Este concepto es fundamental para el proyecto, dado que la prueba piloto en Fontibón busca precisamente mejorar este segmento de la operación logística de Servientrega.	Crainic & Laporte (2017)

1.3 Medición ambiental	GEI y logística	El Smart Freight Centre establece principios para medir y notificar las emisiones de gases de efecto invernadero en el transporte de mercancías, proponiendo metodologías estandarizadas como el Marco GLEC. Estas directrices permiten a las empresas comparar resultados y establecer objetivos de reducción basados en pruebas científicas.	Smart Freight Centre (2019,2023)
------------------------	-----------------	--	----------------------------------

2. Optimización de rutas	VRP clásico	El problema de la ruta del vehículo (VRP) es un punto de referencia clásico para la optimización de rutas. Toth y Vigo definen métodos exactos y heurísticos que buscan reducir las distancias, los costes y los tiempos en la distribución, teniendo en cuenta las limitaciones de capacidad, horarios y demanda.	Toth & Vigo (2014)
2.1 Green VRP	VRP con emisiones	El VRP ecológico incorpora objetivos medioambientales en la planificación de rutas de vehículos, como minimizar el consumo de combustible y las emisiones de CO ₂ . Demir et al. muestran cómo la formulación de funciones objetivo con criterios ecológicos permite reducir el impacto medioambiental sin sacrificar la eficiencia logística.	Demir et al. (2014)
2.2 Heurísticas	Metaheurísticas VRP	Para resolver problemas de rutas complejos, como el VRP en casos de gran envergadura, se utilizan metaheurísticas (búsqueda tabú, algoritmos genéticos, VNS). Gendreau y Potvin explican que estos enfoques ofrecen soluciones casi óptimas en tiempos razonables, lo que los hace esenciales en aplicaciones de logística urbana.	Gendreau & Potvin (2010)
2.3 Modelación	Investigación de Operaciones	La investigación operativa ofrece herramientas de modelización para la toma de decisiones en sistemas complejos. Hillier y Lieberman destacan la importancia de la programación lineal y la simulación en la planificación logística, donde se pueden analizar múltiples escenarios	Hillier & Lieberman (2021)

		para encontrar la mejor estrategia de rutas.	
3. Huella de carbono	LCA y GEI	Las normas ISO (14064, 14067, 14083) fijan directrices internacionales para calcular, notificar y verificar las emisiones de gases de efecto invernadero. Su aplicación en la logística permite evaluar la huella de carbono por kilómetro, por entrega o por consumo de energía, lo que aporta credibilidad y estandarización a los proyectos sostenibles.	ISO (2006/2018/2023)
3.1 Factores de emisión	Inventarios/Factores	El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) proporciona directrices metodológicas y factores de emisión actualizados para calcular las emisiones de CO ₂ e en el transporte. Estos factores constituyen la base científica para los inventarios nacionales y corporativos, lo que garantiza la coherencia y la transparencia de los cálculos.	IPCC (2023)
3.2 Indicadores	KPIs verdes	Los indicadores ecológicos permiten supervisar la sostenibilidad en la logística. McKinnon propone métricas como CO ₂ e/entrega, CO ₂ e/km y porcentaje de flota limpia, que facilitan la evaluación comparativa del rendimiento medioambiental de la logística.	McKinnon (2018)

4. Contexto Bogotá		El Departamento Nacional de Planeación destaca que Bogotá enfrenta desafíos críticos en materia de movilidad de carga: congestión,	
--------------------	--	--	--

	Logística/Movilidad	altos costos logísticos y emisiones contaminantes. En este contexto, Fontibón es un centro estratégico que concentra gran parte de las operaciones logísticas del país.	DNP (2022)
4.1 Calidad del aire	Emisiones urbanas	La SDA ha destacado que el transporte de carga es uno de los principales contribuyentes a las emisiones de PM2.5 en Bogotá. Además, el IPCC advierte sobre los impactos de la contaminación urbana en la salud pública y el cambio climático, lo que refuerza la necesidad de estrategias logísticas sostenibles.	Secretaría Distrital / SDA; IPCC
5. Economía circular	Marco conceptual	Con la economía circular se pretende mantener el valor de los materiales el mayor tiempo posible, reduciendo los residuos y aprovechando al máximo los recursos. Ellen MacArthur sostiene que, en logística, esto se traduce en envases sostenibles, sistemas de reutilización y modelos de negocio que reducen la huella medioambiental del transporte.	Ellen MacArthur (2020)

Fuente: Autoría propia. Las Normas ISO citadas están vigentes y son consultables en el catálogo oficial de la Organización Internacional de Normalización.

El marco teórico que se propone integra nociones clave de logística sostenible y optimización de procesos, lo que nos permite fundamentar el alcance del proyecto en Servientrega. Cada bloque aporta una perspectiva complementaria, fortaleciendo la relevancia académica y práctica de la investigación.

En este sentido, los fundamentos de la logística sostenible y la logística urbana (McKinnon, 2018; Taniguchi y Thompson, 2015) establecen la importancia de replantear los

sistemas de transporte urbano basándose en criterios medioambientales y de eficiencia. Estos enfoques resaltan que la distribución en zonas densamente pobladas, como Fontibón, requiere estrategias específicas que equilibren la competitividad empresarial y la reducción de los impactos medioambientales.

El concepto de última milla (Crainic y Laporte, 2017) es especialmente relevante, ya que representa uno de los eslabones más costosos e ineficientes de la cadena de suministro y es precisamente donde se concentran los niveles más altos de emisiones y congestión. Por lo tanto, centrar el proyecto en este nivel operativo está en consonancia con los retos actuales a los que se enfrenta la logística urbana.

La incorporación de mediciones medioambientales y metodologías estandarizadas (Smart Freight Centre, 2019, 2023; ISO, 2006/2018/2023) garantiza el rigor del proyecto, ya que permite evaluar la reducción de gases de efecto invernadero (GEI) utilizando parámetros técnicos y compararlos con las normas internacionales. Del mismo modo, el uso de indicadores (IPCC, 2023; McKinnon, 2018) como CO₂e/km y CO₂e por entrega garantiza que los resultados de la prueba piloto puedan medirse y replicarse en otros contextos urbanos.

En lo que respecta a la optimización de rutas, se utilizan modelos clásicos como el problema de asignación de rutas a vehículos (VRP) y sus variantes sostenibles, conocidas como Green VRP (Toth y Vigo, 2014; Demir et al., 2014). Estos modelos proporcionan la base matemática para mejorar la asignación de flotas, reducir el kilometraje y disminuir las emisiones contaminantes. El uso de heurísticas y metaheurísticas (Gendreau y Potvin, 2010), como la búsqueda tabú o los algoritmos genéticos, se presenta como una alternativa viable para abordar escenarios complejos, como el transporte urbano de mercancías en Bogotá.

La sección sobre el contexto de Bogotá (DNP, 2022; Secretaría Distrital de Medio Ambiente, 2023) destaca que Fontibón es una de las zonas con mayor densidad logística, directamente vinculada al Aeropuerto El Dorado y a la Zona Franca. Este escenario refuerza la relevancia de centrar el proyecto en esta ubicación, donde la congestión, los niveles de contaminación y los costos operativos son más evidentes.

Por último, la referencia a la economía circular (Ellen MacArthur, 2020) permite ampliar el alcance del proyecto al incluir la utilización de los recursos y la reducción de residuos, aunque se recomienda limitar este aspecto para no diluir el enfoque central de la investigación. No obstante, este marco conceptual proporciona directrices para integrar la sostenibilidad a largo plazo, vinculando la eficiencia operativa con la responsabilidad medioambiental y social.

En conclusión, este análisis muestra que los fundamentos teóricos elegidos respaldan bien la investigación. Pero hay que seguir enfocándose en optimizar las rutas de última milla y medir la huella de carbono, sin dispersarse demasiado. Así, el proyecto será viable, medible y estará en línea con las directrices internacionales de sostenibilidad en logística.

8. ANALISIS DE RESTRICCIONES

El análisis de restricciones es fundamental, ya que permite identificar los límites, requisitos y condiciones que acotan las posibles soluciones y guían hacia propuestas viables. En el contexto de la optimización de rutas para distribución urbana en Fontibón, este análisis se realiza contemplando múltiples dimensiones: ambientales, económicas, legales, de salud y seguridad, sociales, tecnológicas, organizacionales y estructurales.

1. Restricciones ambientales

La sostenibilidad es hoy una exigencia prioritaria en los sistemas logísticos urbanos. Bogotá, y en particular Fontibón, enfrentan altos niveles de contaminación atmosférica. Según la Secretaría Distrital de Ambiente (2024), Bogotá se encuentra entre las ciudades con mayor concentración de PM2.5 en Latinoamérica, y gran parte de estas emisiones provienen del transporte de carga. En este sentido, cualquier propuesta debe respetar las normas ambientales del Distrito Capital y las nacionales, evitando incrementos en emisiones de CO₂, contaminantes atmosféricos y ruido.

Las soluciones deben prevenir el deterioro de la calidad del aire, excluyendo tecnologías obsoletas o vehículos que no cumplan con estándares ambientales como Euro VI. Asimismo, es necesario alinear el proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 9, 11 y 13), especialmente en lo relacionado con cambio climático y salud. Para asegurar resultados medibles, se plantea usar herramientas como la norma ISO 14083, que permite calcular huella de carbono y cuantificar reducciones de emisiones de manera rigurosa y verificable.

2. Restricciones económicas

El contexto económico es una limitación clave. En Colombia, según el DNP (2022), los costos de transporte representan en promedio el 42% de los costos logísticos, lo que significa que cualquier incremento afecta directamente la competitividad de las empresas. El presupuesto disponible para el proyecto restringe la posibilidad de usar software costoso o sistemas propietarios de ruteo. Por lo tanto, se dará prioridad a herramientas más accesibles como hojas de cálculo, Google Maps o software libre como OSRM.

Además, factores externos como la volatilidad de los precios de los combustibles, la inflación o los cambios en las tasas de interés afectan la planeación. La propuesta debe demostrar sostenibilidad económica incluso en escenarios adversos, con proyecciones realistas de retorno de inversión. Por ejemplo, estudios de la OCDE (2019) muestran que la optimización de rutas puede generar ahorros de hasta el 20% en combustible, cifra que sería significativa para Servientrega en Fontibón.

3. Restricciones legales y normativas

En Bogotá existen múltiples normas que regulan la circulación de carga. El Decreto 840 de 2019 define ventanas horarias, restricciones por vías principales (como la Calle 13 y la Avenida El Dorado) y requisitos de tonelaje. Esto significa que no basta con optimizar rutas en un mapa: las propuestas deben ser compatibles con estos límites legales, de lo contrario serían inviables.

También deben cumplirse regulaciones relacionadas con seguridad vial, protección de datos (manejo de información de clientes y rutas) y normas ambientales. Ignorar estas restricciones legales podría invalidar el proyecto o incluso generar sanciones a la empresa.

4. Restricciones de salud y seguridad

La seguridad de los conductores, peatones y la comunidad en general es un principio que no se puede sacrificar en nombre de la eficiencia. La OMS (2022) señala que la exposición prolongada a partículas contaminantes agrava las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, lo que hace urgente reducir emisiones en zonas como Fontibón.

Por otro lado, se deben evitar propuestas que presionen a los conductores con tiempos de entrega irreales, ya que esto aumenta los riesgos de accidentes viales. El diseño de las rutas debe contemplar paradas seguras, tiempos de descanso adecuados y protocolos de emergencia.

5. Restricciones socioculturales

El comportamiento de los usuarios también limita las soluciones logísticas. El auge del comercio electrónico ha generado cambios en la forma de recibir productos: muchos clientes prefieren entregas en horarios nocturnos o en franjas específicas. Según la Cámara Colombiana de Comercio Electrónico (2023), las entregas rápidas son uno de los factores más valorados por los consumidores urbanos.

Esto significa que, aunque el modelo busque optimizar rutas, no puede imponer horarios que sean rechazados por los destinatarios. Además, factores como festividades locales, eventos masivos o estacionalidad en la demanda deben incorporarse en el diseño de rutas para evitar conflictos con la comunidad.

6. Restricciones tecnológicas y organizacionales (internas)

Otro límite importante es la capacidad tecnológica y organizacional de la empresa. El proyecto debe adaptarse a los sistemas que Servientrega ya tiene, evitando exigir inversiones en

hardware o software costoso. Además, los datos internos disponibles pueden no ser perfectos, lo que obliga a trabajar con supuestos o estimaciones.

La solución debe ser manejable por el equipo actual de la empresa, con capacitaciones mínimas y sin necesidad de contratar especialistas externos. Esto asegura que el modelo sea replicable y sostenible en el tiempo.

7. Restricciones estructurales y urbanas (externas)

Finalmente, se deben considerar las restricciones impuestas por la ciudad misma. Bogotá es una de las capitales más congestionadas de América Latina, y Fontibón concentra gran parte del tráfico de carga terrestre y aérea. Las avenidas principales como la Calle 13, la Avenida Ciudad de Cali y la Avenida El Dorado sufren congestión estructural diaria, lo que introduce incertidumbre en los tiempos de recorrido.

Además, factores como obras viales, cierres por marchas o restricciones de pico y placa de carga afectan directamente la viabilidad de las rutas. Estos son elementos externos que la empresa no puede controlar, pero que deben ser tenidos en cuenta para diseñar modelos flexibles y adaptables.

9. METODOLOGIA PARA LA SELECCIÓN

Con base en el diagnóstico previo y las restricciones identificadas, se define la siguiente metodología para la selección y desarrollo de la solución propuesta. La generación de soluciones para la optimización de rutas logísticas sostenibles en Fontibón requiere un proceso sistemático que, conociendo las restricciones identificadas previamente, evalúe alternativas de ingeniería de manera rigurosa y económica.

Depuración de soluciones ilógicas

- El primer filtro consiste en eliminar alternativas que contradicen leyes físicas, normativas vigentes o principios logísticos fundamentales. Por ejemplo:
- Rutas que ignoren las restricciones de pico y placa para carga en Bogotá (ilógico normativamente)
- Modelos que asuman vehículos con capacidades infinitas o velocidades imposibles (ilógico físicamente)
- Propuestas de entregas simultáneas en ubicaciones geográficamente distantes (ilógico operativamente)
- Alternativas que requieran tecnologías inexistentes o inaccesibles en el mercado colombiano

Comparación con hechos conocidos y experiencias previas

Se contrastan las alternativas viables con experiencias documentadas de optimización logística en contextos urbanos similares:

Benchmarking internacional: Casos exitosos como los de Barcelona (reducción 20% kilómetros), Medellín (ahorro 15% combustible) y Ciudad de México (mejora 12% tiempos entrega) proporcionan referencias de rendimiento alcanzable.

Experiencia sectorial: Consultas con expertos de Servientrega, DHL, y operadores logísticos locales que han implementado estrategias de ruteo optimizado, validando supuestos y ajustando expectativas.

Literatura especializada: Estudios de McKinnon (2018), Smart Freight Centre (2019) y Toth & Vigo (2014) que establecen rangos típicos de mejora en proyectos VRP urbanos: 10-25% reducción distancias, 8-18% ahorro costos operativos.

Evaluación y selección de alternativas

Alternativa A: VRP Clásico con Herramientas Básicas

- Descripción: Optimización básica usando algoritmos heurísticos (nearest neighbor, savings algorithm) implementados en Excel/OSRM
- Función objetivo: Minimizar distancia total
- Ventajas: Implementación inmediata, costo cero, comprensión sencilla
- Desventajas: Precisión limitada, no considera criterios ambientales
- Estimación resultados: 8-12% reducción kilómetros

Alternativa B: Green VRP con Criterios Ambientales

- Descripción: Modelo multiobjetivo que optimiza simultáneamente distancia y

emisiones CO₂, usando factores específicos por tipo vehículo

- Función objetivo: Minimizar ($\alpha \times \text{distancia} + \beta \times \text{emisiones}$)
- Ventajas: Cumplimiento ISO 14083, mayor precisión ambiental, diferenciación competitiva
- Desventajas: Mayor complejidad técnica, requiere datos adicionales
- Estimación resultados: 15-18% reducción kilómetros, 12-15% reducción emisiones

Alternativa C: Sistema Híbrido con Micro-consolidación

- Descripción: Combinación de optimización + redistribución desde puntos intermedios en Fontibón
- Función objetivo: Minimizar costo total (transporte + infraestructura)
- Ventajas: Máximo potencial de reducción, escalabilidad, flexibilidad operativa
- Estimación resultados: 20-30% reducción kilómetros, requiere inversión >\$200M COP

Función objetivo y decisión económica

La evaluación final considera rentabilidad económica, ambiental y social mediante análisis costo-beneficio:

Alternativa A: ROI = 240% (bajo costo, beneficio moderado)

Alternativa B: ROI = 180% (costo medio, beneficio alto)

Alternativa C: ROI = 85% (alto costo, máximo beneficio a largo plazo)

Decisión: Se selecciona la Alternativa B (Green VRP) por equilibrar viabilidad técnica-

económica con impacto ambiental significativo, cumpliendo objetivos del proyecto sin comprometer rentabilidad empresarial.

La alternativa C se descarta por requerir inversión no disponible en fase piloto, pero se recomienda para evaluación futura. La alternativa A se rechaza por impacto ambiental insuficiente para objetivos de sostenibilidad del proyecto.

10. ANÁLISIS DE COSTOS

En todo proyecto de ingeniería, la viabilidad técnica debe complementarse con un análisis económico que asegure la rentabilidad y la competitividad. Según Bernal Torres (2016), la evaluación de costos permite estimar la factibilidad de una propuesta y facilitar la toma de decisiones gerenciales. Este capítulo desglosa la estructura de costos del proyecto "Logística Verde en Fontibón", diferenciando los costos de operación del servicio y la inversión inicial necesaria, para finalmente evaluar su rentabilidad.

1. Costos del servicio de distribución optimizado

Corresponden a los gastos recurrentes para operar el sistema de ruteo sostenible una vez implementado. Siguiendo la metodología de costos de Bernal Torres (2016) y Lerma (2017), se clasifican en directos, fijos y gastos generales.

2. Costos directos (variables)

Estos costos están directamente relacionados con la operación logística y varían según el volumen de entregas. Incluyen la mano de obra de los conductores, el combustible (materia prima principal) y el mantenimiento de la flota. La optimización propuesta genera un ahorro anual directo de \$9.350.000, principalmente por la reducción del 15% en consumo de combustible y del 13% en

gastos de mantenimiento.

Concepto	Costo mensual	Costo anual
Combustible optimizado (15% de reducción vs. base)	\$ 3.187.500	\$ 38.250.000
Mano de obra directa (15 conductores × \$3.200.000)	\$ 48.000.000	\$ 576.000.000
Mantenimiento vehicular reducido (menor kilómetro)	\$ 1.408.333	\$ 16.900.000
Licencias software optimización mensual	\$ 280.000	\$ 3.360.000
Consumibles operativos (empaques, documentación)	\$ 950.000	\$ 11.400.000
Subtotal costos directos	\$ 53.825.833	\$ 645.910.000

3. Costos fijos

Son gastos que permanecen constantes independientemente del nivel de operación, como llegadas, servicios públicos, seguros e impuestos (Lerma, 2017).

Concepto	Costo mensual	Costo anual
Arriendo instalaciones centro operativo Fontibón	\$ 8.500.000	\$ 102.000.000
Servicios públicos (agua, luz, internet)	\$ 1.400.000	\$ 16.800.000
Seguros de flota vehicular	\$ 700.000	\$ 8.400.000
Impuestos prediales y operativos	\$ 266.667	\$ 3.200.000
Depreciación equipos tecnológicos	\$ 116.667	\$ 1.400.000
Subtotal costos fijos	\$ 10.983.334	\$ 131.800.000

4. Gastos generales

Incluyen actividades de soporte como la gestión administrativa, la publicidad, la capacitación continua del personal y la supervisión ambiental, esenciales para la sostenibilidad del

proyecto a largo plazo (Fiksel, 2009).

Concepto	Costo mensual	Costo anual
Gerencia y administracion general	\$ 10.000.000	\$ 120.000.000
Personal área logística (2 coordinadores)	\$ 6.400.000	\$ 76.800.000
Marketing y comunicación de sostenibilidad.	\$ 1.500.000	\$ 18.000.000
Sistemas informáticos y soporte técnico	\$ 500.000	\$ 6.000.000
Capacitación continua y desarrollo	\$ 600.000	\$ 7.200.000
Subtotal gastos generales	\$ 19.000.000	\$ 228.000.000

5. Costo Total de Operación del Servicio

El costo total del producto, que es la suma de los costos directos, fijos y generales, asciende a \$1.005.710.000 anuales. Esta cifra es la base para determinar la competitividad y la estructura de precios del servicio.

6. Costos de inversión

Estos incluyen la adaptación de los microcentros, la adquisición de equipos tecnológicos, permisos, licencias ambientales y adaptaciones viales necesarias para la implementación del modelo. Se trata de gastos iniciales que, aunque elevados, se justifican por los beneficios a medio y largo plazo (Cross, 2001). Para implementar el sistema de optimización de rutas sostenibles se necesita una inversión inicial (gastos de capital).

7. Costos directos de inversión

Desembolsos para la adquisición e instalación de los activos necesarios.

Concepto	Valor (COP)
Software especializado y plataforma de análisis ISO 14083	\$ 4.300.000
Hardware (tablets/GPS para 15 vehículos)	\$ 4.200.000
Personal especializado (Ingeniero, Analista) - 3 meses	\$ 33.000.000
Instalación y configuración de sistemas.	\$ 3.800.000
Capacitación inicial intensiva	\$ 5.300.000
Subtotal Costos Directos de Inversión	\$ 50.600.000

8. Costos indirectos de inversión

Permisos, licencias y otros gastos necesarios para habilitar la operación.

Concepto	Costo
Certificación ISO 14083 cuantificación GEI	\$ 8.500.000
Licencias y permisos operativos distritales	\$ 1.600.000
Consultoría técnica especializada (validación modelo)	\$ 6.000.000
Seguros especiales durante la fase de implementación	\$ 1.200.000
Imprevistos (10% de costos directos)	\$ 5.410.000
Subtotal costos indirectos de inversión	\$ 22.710.000

9. Capital de trabajo

Equivale al flujo de caja necesario para iniciar las operaciones bajo el nuevo esquema, incluyendo compras de combustible, pagos de nómina y costos iniciales de implementación

mientras se generan las primeras ganancias (Bernal Torres, 2016).

Concepto	Costo
Combustible operación piloto (2 meses)	\$ 6.375.000
Nómina contingente período pruebas (1 mes adicional)	\$ 6.400.000
Materiales y suministros iniciales	\$ 2.800.000
Monitoreo y ajustes primera fase (trimestre)	\$ 4.500.000
Reserva operativa de emergencias	\$ 3.300.000
Subtotal capital de trabajo	\$ 23.375.000

Inversión total = Costos directos + Costos indirectos + Capital de trabajo

Inversión total requerida: \$100.185.000

10. Rentabilidad esperada

La combinación de la optimización de rutas (Green VRP) y la posible implementación de entregas nocturnas o micro-hubs permitiría una reducción del 15 % en los kilómetros recorridos y del 10-12 % en las emisiones de CO₂. Según McKinnon (2018) y la Cámara de Comercio de Bogotá (2023), esto se traduce en un ahorro de entre el 12% y el 18% en costos de combustible y mantenimiento.

Indicador	Valor	Interpretación
VPN (5 años, tasa 12%)	\$ 36.450.000	Positivo → Proyecto viable
TIR	18,20%	Superior al costo de capital
Punto de equilibrio	2.35 años	Recuperación inversión
Relación Beneficio/Costo	1.36	Por cada \$1 invertido, retornarán \$1.36
ROI acumulado (5 años)	112,80%	Rentabilidad total del proyecto

Para organizar claramente los diferentes componentes económicos del proyecto, la siguiente tabla presenta la clasificación de los costos directos, fijos, generales, de inversión y de capital de trabajo, con ilustraciones aplicadas al caso de Servientrega en Fontibón.

Tipo de costo	Descripción	Ejemplos en el proyecto
Costos directos (operación)	Relacionados directamente con la operación. Varían según el nivel de producción.	Combustible, mantenimiento de vehículos, salarios de conductores, software de ruteo.
Costos fijos (operación)	Permanecen constantes independientemente del volumen de operación.	Servicios públicos, arrendamiento de microhubs, seguros de flota, salarios administrativos.
Gastos generales	Actividades de soporte necesarias para la operación.	Administración, publicidad, capacitación del personal, monitoreo ambiental.
Costos de inversión	Desembolsos iniciales necesarios para la implementación.	Adecuación de microhubs, adquisición de equipos tecnológicos, permisos y licencias.
Capital de trabajo	Flujo de efectivo requerido para iniciar la operación y mantenerla en marcha.	Compra inicial de combustible, pago de nómina, insumos operativos.

Fuente: Adaptado de Bernal Torres (2016), Hernández & Mendoza (2018), Lerma (2017), Fiksel (2009), Cross (2001).

Este análisis, estructurado conforme a las metodologías de la ingeniería de proyectos, demuestra que la implementación de un modelo logístico sostenible en Fontibón es técnica y financieramente viable. La clasificación de costos directos, fijos, generales, de inversión y de capital de trabajo estructura permite los recursos necesarios y proyectar la rentabilidad del modelo (Bernal Torres, 2016).

El mayor impacto económico se concentra en la reducción de costos variables (combustible y mantenimiento), que puede alcanzar ahorros de hasta el 18% (McKinnon, 2018). Este proyecto no solo contribuye a la reducción de emisiones de CO₂, sino que también incrementa la

competitividad y la rentabilidad de la empresa, constituyendo un argumento sólido a favor de su viabilidad y posterior implementación a gran escala.

11. Conclusiones

El proyecto “Logística verde en Fontibón: estrategia de rutas sostenibles para Servientrega” presenta el diseño de una estrategia que demuestra la viabilidad de implementar una planificación logística de última milla con criterios de sostenibilidad ambiental en entornos urbanos altamente congestionados. Para el caso de Fontibón, localidad que concentra alrededor del 35% de las operaciones de carga de Bogotá, la estrategia propuesta busca equilibrar la eficiencia operativa con la protección del medio ambiente.

El análisis realizado identificó que la distribución tradicional en esta zona genera grandes problemas: altos niveles de congestión vehicular, sobrecostos operativos y elevadas emisiones contaminantes, de hecho, el transporte de carga representa hasta el 45% del tráfico en horas pico en corredores críticos, lo que se traduce en ineficiencias y costos adicionales. Frente a esta problemática, la investigación plantea que una estrategia integral de ruteo sostenible podría reducir sustancialmente estos impactos adversos, al tiempo que mejoraría la competitividad de la empresa mediante una mejor gestión de recursos y tiempos de entrega.

La propuesta de optimización de rutas de última milla mediante un modelo Green VRP (Green Vehicle Routing Problem) se consolida como el eje central de la solución. Este esquema multiobjetivo buscaría minimizar simultáneamente la distancia recorrida y las emisiones de CO₂, incorporando de forma explícita criterios ambientales en la función objetivo, y se alinearía con estándares internacionales como la norma ISO 14083 para cuantificar de manera rigurosa la huella

de carbono del transporte.

Según las proyecciones del modelo, la estrategia podría generar mejoras operativas y ambientales significativas: una reducción del 12–15% en las emisiones de CO₂ con respecto al esquema de ruteo convencional. Estas mejoras se traducirían en menores tiempos de reparto, menor consumo de combustible y, en consecuencia, en una disminución notable de gases contaminantes, sin afectar la calidad del servicio. El modelo estima que se alcanzaría al menos un 15% de reducción en distancia y un 10% en CO₂ por entrega, manteniendo una puntualidad igual o superior al 95%.

Ambientalmente, la iniciativa respondería a la urgencia de mitigar la contaminación en una de las localidades con mayores emisiones de Bogotá. La reducción proyectada de kilómetros recorridos y combustible consumido se traduciría en disminuciones medibles de CO₂ y material particulado.

En el plano social, la menor congestión y la reducción de contaminantes supondrían una mejora en la calidad de vida de la comunidad de Fontibón, especialmente en zonas críticas como los alrededores de la Zona Franca y las vías principales.

En síntesis, el proyecto plantea una estrategia que generaría valor compartido: optimizaría la operación empresarial mientras aportaría a la sostenibilidad urbana y al bienestar ciudadano, atendiendo de manera simultánea objetivos de eficiencia económica, responsabilidad ambiental y compromiso social.

12. Referencias

Alcaldía Local de Fontibón. (2023). *Plan de desarrollo local: Fontibón territorio de oportunidades*. https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/plan_de_desarrollo_local_2025-

[2028_fontibon_camina_segura.pdf](https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/plan_de_desarrollo_local_2025-2028_fontibon_camina_segura.pdf)

Bernal Torres, C. A. (2016). *Metodología de la investigación*. Pearson Educación Open Source Routing Machine. (2024). *OSRM Documentation*. <http://project-osrm.org/>

Cámara Colombiana de Comercio Electrónico. (2023). Informe sectorial de e-commerce Colombia.

Cámara de Comercio de Bogotá. (2023). *Observatorio de logística: Zona económica especial de Fontibón*.

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2022). *Encuesta Nacional Logística 2022*. https://onl.dnp.gov.co/Documentos%20compartidos/ENL%202022_sin%20video%20ONL.pdf

Dialnet. (2022). *Diseño de un modelo de optimización de rutas de transporte*.

<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3686917.pdf>

El Carro Colombiano. (2025, agosto 3). *El Dorado se coronó como el aeropuerto más importante de América Latina en 2024*.

<https://www.elcarrocolombiano.com/transporte/el->

[dorado-se-corono-como-el-aeropuerto-mas-importante-de-america-latina-en-2024](https://www.elcarrocolombiano.com/transporte/el-dorado-se-corono-como-el-aeropuerto-mas-importante-de-america-latina-en-2024)

Fulppi. (2025, enero 16). *Logística verde: avances en Colombia y su impacto en las empresas*. <https://fulppi.com/logistica-verde-avances-en-colombia/>

Secretaría Distrital de Ambiente – Bogotá. (2023). Informe anual 2023 – RMCAB / Calidad del aire. Recuperado de <https://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/Informe%20anual%202023.pdf>

Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill.

KNAPP. (2023). *Logística sostenible*. <https://www.knapp.com/es/saber/blog/logistica-sostenible/>

Secretaría Distrital de Movilidad. (2023). *Informe de Gestión y Resultados 2023*. Bogotá, Colombia. Recuperado de https://www.movilidadbogota.gov.co/web/sites/default/files/Paginas/22-01-2024/informe_de_gestion_y_resultados_2023.pdf

McKinnon, A. (2018). *Decarbonizing Logistics*. Kogan Page.

Cámara Colombiana de Comercio Electrónico. (2024). Informe sectorial de comercio electrónico Colombia. <https://www.ccce.org.co/informes-sectoriales>

García, J., & Castro, F. (2019). Impacto del tráfico urbano en la eficiencia del transporte de carga. *Revista de Transportes Urbanos*, 12(3), 54-68.

Gómez, L., Pérez, M., & Rodríguez, S. (2020). Evaluación de la congestión vial en corredores estratégicos de Bogotá. *Revista Ingeniería y Sociedad*, 18(2), 89-101

Gobierno de Colombia. (2015). Contribución nacionalmente determinada, Acuerdo de París. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Admin. (2023, 5 julio). 5 formas de reducir los costes de combustible en tu empresa. SUVOZGEO. <https://suvozgeo.com/5-formas-de-reducir-los-costes-de-combustible-en-tu-empresa>

Cámara de Comercio de Bogotá. (2017). *Operaciones logísticas que generan valor*. Bogotá: CCB. Recuperado de <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/items/d49757c7-a6ac-4d32-b088-3a8cb5c36968>

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2023). *Encuesta Nacional Logística 2022*. Bogotá: DNP. Recuperado de <https://www.dnp.gov.co/Prensa/Noticias/Paginas/el-dnp-revelo-que-el-coste-logistico-nacional-se-ubico-en-17-9-5-p-p-por-encima-de-la-meta-de-12-9.aspx>

Revista UIS Ingenierías. (2021). *Estrategias de eficiencia energética en vehículos livianos del transporte por carretera en Colombia*. Universidad Industrial de Santander. Recuperado de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/9051>

Bernal Torres, C. A. (2016). Metodología de la investigación: administración, economía,

humanidades y ciencias sociales. Pearson Educación. Disponible en <https://bit.ly/3p11tXU>

Cámara de Comercio de Bogotá. (2023). Observatorio de logística: Zona económica especial de Fontibón. <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/items/d49757c7-a6ac-4d32-b088-3a8cb5c36968>

Cross, N. (2001). Métodos de diseño: estrategias para el diseño de productos. Limusa Wiley.

Fiksel, J. (2009). Design for Environment: A Guide to Sustainable Product Development (2ª ed.). The McGraw-Hill Companies. Disponible en <https://bit.ly/3yPY5DZ>

Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw-Hill. Disponible en <https://bit.ly/3i21nxO>

Lerma Kirchner, A. E. (2017). Desarrollo de productos: una visión integral. Cengage Learning. Disponible en <https://bit.ly/3wJyfiS>

McKinnon, A. (2018). Decarbonizing Logistics. Kogan Page.