

Diseño de un Modelo Predictivo basado en Cadenas de Markov para la Reducción de Costos Operativos en la Planeación de Rutas de Distribución Urbana

Kevin Stiven Diaz Paipa

Maite Sofia Abril Paredes

Yuliana Rivera Ocampo

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniería industrial – Ingeniería de sistemas.

Director: Figueroa Hernández Diana Paola

Universidad Ean

Facultad de Ingeniería

Proyecto de grado

Bogotá, Colombia

abril de 2026

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Bogotá, 02/06/2026

A mis padres por enseñarme que la exigencia personal tiene sus frutos.

La innovación distingue a un líder de un seguidor.

Steve Jobs

Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo de investigación fue posible gracias al apoyo de diversas personas e instituciones que contribuyeron directa o indirectamente a su realización. En primer lugar, agradezco a los docentes de las carreras de Ingenierías, quienes a lo largo de mi formación académica compartieron sus conocimientos y experiencias, contribuyendo significativamente a mi desarrollo profesional. De manera especial, expreso mi agradecimiento al director del proyecto, por su orientación, acompañamiento académico y recomendaciones metodológicas durante el desarrollo de esta investigación. Asimismo, agradezco a mis compañeros y colegas que brindaron su apoyo y colaboración durante el proceso de construcción del proyecto, aportando ideas y perspectivas que enriquecieron el trabajo.

Resumen

El aumento del comercio electrónico en Colombia ha vuelto mucho más difícil la organización del reparto de mercancías en las ciudades. En lugares como Bogotá, problemas diarios como los trancones, los cambios inesperados en los tiempos de atención y los horarios fijos de los clientes dañan la planeación de los recorridos y elevan los gastos de las empresas.

Para enfrentar esta situación, este trabajo tiene como meta diseñar un modelo de predicción basado en Cadenas de Markov que ayude a planificar mejor las rutas de distribución en las zonas urbanas. Este sistema combina herramientas de análisis de datos y algoritmos de optimización heurística para resolver el problema de enrutamiento de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW).

Metodológicamente, la investigación utiliza un enfoque cuantitativo y un diseño no experimental. El modelo propuesto funciona mediante la unión de tres piezas: una base de datos relacional que guarda los registros históricos de la operación, un módulo de predicción que calcula los tiempos de servicio y los retrasos probables, y un algoritmo de optimización encargado de trazar los trayectos más eficientes.

Al final, se espera que la aplicación de este modelo ayude a bajar los costos de transporte, reducir los kilómetros recorridos por los vehículos y mejorar la puntualidad en las entregas, adaptándose a las condiciones reales del tránsito en Colombia.

Palabras clave: logística urbana, cadenas de Markov, optimización de rutas, VRPTW, Colombia.

Abstract

The growth of e-commerce in Colombia has increased the complexity of urban distribution systems, particularly in last-mile delivery operations. In cities such as Bogotá, factors including traffic congestion, variability in service times, and delivery constraints significantly affect route planning efficiency and increase operational costs.

This study aims to design a predictive model based on Markov Chains to improve urban route planning through the integration of data analytics and heuristic optimization techniques, applied to the Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW).

The research follows a quantitative approach with a non-experimental design. The proposed model integrates a relational database for storing historical data, a predictive component for estimating service times and potential delays, and an optimization algorithm for generating efficient routes.

The expected outcomes include reductions in operational costs, shorter travel distances, and improved compliance with delivery time windows in Colombian urban environments.

Keywords: urban logistics, Markov chains, route optimization, VRPTW, Colombia.

.

Diseño de un Modelo Predictivo basado en Cadenas de Markov para la Reducción de Costos Operativos en la Planeación de Rutas de Distribución Urbana

Introducción

El auge del comercio electrónico durante los últimos años ha cambiado por completo el funcionamiento de los sistemas logísticos en todo el mundo. Para el caso de Colombia, este cambio se traduce en una presión mucho mayor sobre los servicios de reparto urbano, concretamente en los procesos de última milla. Es justamente en esta etapa final donde se acumula la mayor parte de los costos y donde la operación se vuelve más complicada (Arango-Serna et al., 2017).

En una ciudad como Bogotá, planificar los recorridos de entrega es una tarea difícil debido a factores cotidianos como el tráfico pesado, los cambios imprevistos en los tiempos de atención y los horarios específicos que exigen los clientes. Estos problemas entorpecen las decisiones del día a día y golpean la eficiencia de las empresas, lo que eleva los gastos de transporte y hace que se incumpla con las entregas programadas (Rojas-Huérfano et al., 2018).

Para resolver esto, la investigación de operaciones utiliza con frecuencia el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) como una base para mejorar el reparto de productos. Una de las versiones más estudiadas es el problema de ruteo con ventanas de tiempo (VRPTW), el cual añade la regla de atender a los usuarios en horarios fijos, volviendo el cálculo mucho más difícil (Zhang et al., 2021). Sin embargo, casi todos los métodos tradicionales usan datos fijos y no toman en cuenta los imprevistos y la incertidumbre de las ciudades reales.

Por esta razón, incluir modelos basados en probabilidades es una buena opción para manejar la inestabilidad de los sistemas de transporte. Las Cadenas de Markov son una herramienta matemática ideal para analizar estos entornos cambiantes, ya que asumen que

lo que pasará después depende únicamente de la situación actual. Esto ayuda a calcular la probabilidad de que ocurran retrasos o variaciones en los tiempos de atención (Ahmad et al., 2022).

Al mismo tiempo, la creación de modelos de predicción usando datos históricos ha ganado mucha fuerza para mejorar la logística. Si se combinan estos modelos predictivos con algoritmos de optimización de tipo heurístico, se pueden obtener rutas mucho más estables y flexibles, capaces de amoldarse a los cambios del tráfico urbano (Wang & Li, 2022).

A pesar de que hay estudios sobre el tema, todavía existe un vacío al momento de unir las predicciones y las técnicas de optimización dentro de plataformas tecnológicas reales, sobre todo en países en desarrollo como Colombia. Esta falta de soluciones demuestra que se necesitan propuestas que junten el análisis de datos, las probabilidades y la optimización en una sola herramienta.

Teniendo esto en cuenta, el propósito de este trabajo es diseñar un modelo de predicción fundamentado en Cadenas de Markov para optimizar la planeación de las rutas de reparto urbano. Para ello, se integrarán herramientas de análisis de datos y algoritmos heurísticos aplicados al problema VRPTW, todo esto dentro de un escenario simulado que refleje las condiciones reales del transporte en Colombia.

A partir de lo anterior, la pregunta de investigación que guía el estudio es: ¿cómo mejorar la eficiencia en la planeación de rutas de distribución urbana mediante la integración de un modelo predictivo basado en Cadenas de Markov y técnicas de optimización heurística en un contexto colombiano?

Diseño de un Modelo Predictivo basado en Cadenas de Markov para la Reducción de Costos Operativos en la Planeación de Rutas de Distribución Urbana

Como hipótesis, se plantea que la integración de un modelo predictivo con un algoritmo de optimización permitirá reducir los costos operativos, disminuir la distancia recorrida y mejorar el cumplimiento de las ventanas de tiempo en comparación con métodos tradicionales de planificación de rutas.

Diseño de un Modelo Predictivo basado en Cadenas de Markov para la Reducción de Costos Operativos en la Planeación de Rutas de Distribución Urbana

Marco teórico

La logística urbana se ha erigido como un eje neurálgico en la cadena de suministro contemporánea, fenómeno impulsado, en gran medida, por el crecimiento exponencial del comercio electrónico. Esta metamorfosis ha modificado profundamente las tácticas de expansión comercial y los modelos de distribución, los cuales demandan actualmente una mayor frecuencia en las entregas, una fragmentación de las unidades de carga y la incursión en áreas urbanas cuya accesibilidad es, por definición, restringida o compleja, todo ello bajo un incremento constante en el volumen de mercancía (Crainic et al., 2020). Particularmente en el escenario colombiano, la gestión de la "última milla" se enfrenta a obstáculos estructurales críticos, entre ellos, el deterioro de la infraestructura vial, el incremento en la densidad vehicular y una notable desarticulación entre los diversos agentes involucrados en la cadena, factores que inciden negativamente en la fluidez operativa (Arago-Serna et al., 2017). Estas dificultades se ven exacerbadas en los principales centros metropolitanos debido a las dinámicas propias del tráfico, la saturación de las vías y los marcos regulatorios que limitan la movilidad en franjas horarias determinadas. Al respecto, Rojas-Huerfano et al. (2018) sostienen que la optimización de estos procesos no debe restringirse al diseño de rutas estáticas, sino que requiere una administración de recursos caracterizada por una alta eficiencia, lo cual hace imperativo el uso de herramientas analíticas de última generación.

Dentro del campo de la investigación operativa aplicada al transporte, el diseño de rutas óptimas se perfila como uno de los retos científicos más significativos para maximizar la eficiencia en el despacho de bienes. Este abordaje metodológico persigue la configuración

de itinerarios vehiculares que logren satisfacer la demanda de una red de clientes dispersos geográficamente, minimizando simultáneamente los costos asociados al transporte (Toth & Vigo, 2014). Una arista esencial en esta problemática es el Problema de Enrutamiento de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW), el cual impone la restricción de que cada usuario debe ser atendido en un lapso temporal determinado. Dicha condición eleva drásticamente la complejidad computacional del modelo, clasificándolo formalmente dentro de la teoría de la computación como un problema NP-hard (Solomon, 1987).

Para el tratamiento del VRPTW se han desplegado diversas aproximaciones, incluyendo algoritmos exactos, heurísticos y metaheurísticos. Dentro de este último grupo, los algoritmos genéticos y otros métodos derivados de sistemas biológicos han exhibido una eficacia notable al producir soluciones de alta calidad en tiempos de cómputo manejables (Zhang et al., 2021). No obstante, la debilidad intrínseca de gran parte de estos modelos radica en su carácter determinista, lo cual limita su viabilidad frente a las fluctuaciones del entorno real, especialmente en contextos urbanos marcados por una alta volatilidad.

Los sistemas de distribución en ciudades son inherentemente dinámicos y estocásticos; factores como las congestiones súbitas, las variaciones climáticas y la inestabilidad en los tiempos de servicio transforman permanentemente los planes de ruta preestablecidos (Holguín-Veras et al., 2014). Ante este panorama, las estructuras rígidas pierden su capacidad de respuesta. Siguiendo a Sánchez-Díaz et al. (2018), la incorporación explícita de la incertidumbre en el modelado logístico fortalece las soluciones obtenidas y brinda una base mucho más confiable para la ejecución de decisiones estratégicas.

Como solución científica ante esta problemática emerge la aplicación de modelos probabilísticos, entre los cuales destacan las cadenas de Markov. Se entienden como procesos estocásticos donde el estado sucesivo del sistema depende exclusivamente de su estado precedente inmediato, cumpliendo con la propiedad de pérdida de memoria o propiedad de Markov (Puterman, 2014). En el ecosistema logístico, estas herramientas facilitan la modelación de transiciones entre diversos estados operativos —como los niveles de saturación vial, los tiempos de atención o los estados de entrega—, asignando probabilidades a la ocurrencia de cada evento.

La implementación de cadenas de Markov en redes de transporte ha demostrado ser valiosa para proyectar la variabilidad del entorno y refinar indicadores críticos de rendimiento (Ahmad et al., 2022). Su integración en la planeación de itinerarios permite anticipar posibles retrasos y ajustar las decisiones operativas en tiempo real, optimizando así la efectividad global de la distribución.

De manera complementaria, los modelos predictivos basados en datos históricos han ganado una relevancia académica ineludible en la optimización de la cadena de suministro. Estas herramientas logran estimar comportamientos venideros mediante el análisis riguroso de registros previos, permitiendo una gestión con enfoque reactivo y adaptativo ante condiciones de alta incertidumbre (Wang & Li, 2022). La puesta en marcha de estos esquemas predictivos requiere el respaldo de infraestructuras tecnológicas sólidas, como bases de datos relacionales y lenguajes de programación especializados en cómputo estadístico, con énfasis marcado en Python y R.

Según lo señalan Cao et al. (2020), la exactitud y confiabilidad de cualquier arquitectura predictiva dependen directamente del tratamiento técnico de la información recopilada, el cual exige etapas exhaustivas de limpieza, transformación y selección de variables explicativas. En consecuencia, la ciencia de datos se posiciona como un eje transversal en la estructuración de sistemas de transporte inteligentes.

En años recientes, la literatura académica muestra una tendencia clara hacia la hibridación de enfoques, conjugando modelos predictivos con técnicas de optimización matemática para elevar la competitividad de las operaciones logísticas (Rodrigues et al., 2023). Dicha sinergia permite utilizar la capacidad prospectiva de la analítica para proyectar escenarios futuros y, simultáneamente, proveer los datos de entrada a algoritmos matemáticos que determinen la solución óptima o cuasi-óptima para el sistema.

Pese a las ventajas teóricas, uno de los desafíos técnicos más complejos consiste en unificar estos componentes heterogéneos dentro de una arquitectura de software integral, escalable y apta para aplicaciones logísticas reales. Esta limitante tecnológica se agudiza en economías emergentes, donde la madurez digital y la adopción de analítica avanzada en el sector de transporte se encuentran todavía en etapas incipientes.

A partir del análisis bibliográfico realizado, se distinguen tres líneas investigativas predominantes: la optimización de rutas mediante metaheurísticas, el desarrollo de modelos predictivos aplicados a variables operacionales y el despliegue de plataformas inteligentes para la distribución de carga urbana. Aunque se reportan avances valiosos en cada campo

de forma aislada, persiste un vacío en la literatura respecto a la articulación cohesiva de estos tres enfoques dentro de una única propuesta metodológica.

Ante este nicho de investigación, el presente trabajo se sustenta en la necesidad imperativa de formular soluciones híbridas que integren modelos probabilísticos, analítica predictiva y algoritmos de optimización, adaptadas fielmente a las particularidades de la logística urbana en Colombia. Este abordaje holístico permite examinar el fenómeno desde una visión sistémica, aportando metodologías robustas para el diseño de rutas de distribución que sean tanto eficientes como resilientes frente a la incertidumbre.

Diseño de un Modelo Predictivo basado en Cadenas de Markov para la Reducción de Costos Operativos en la Planeación de Rutas de Distribución Urbana

Estado del arte y oportunidades (PRISMA)

La metodología de investigación que utilizamos para recopilar y analizar meticulosamente estudios previos de un proyecto específico (Metodología PRISMA) que nos sirvió para que todo el proceso sea claro, organizado mejoramos las rutas de vehículos y su entrega de última milla en entornos urbanos hemos identificado que la que mejor se ajusta es modelos predictivos (Machine learnunfg) e inteligencia artificial para optimizar la eficiencia logística. A pesar de los logros que se han evidenciado en productividad y eficiencia operativa el resultado identifica una brecha critica, la cual limita integración de modelos predictivos que ejecuta la incertidumbre actual del entrono) con las estrategias de optimización de rutas, esta demarcación compromete la idoneidad de las soluciones analizadas en contexto dinámico y difícil

Tras un estudio riguroso de calidad académica como lo son : Scopus, Web of Scince, ScienceDirect e IEEE Xplore la información que buscamos fueron en base a nuestro proyecto como lo son el problema de tráfico de vehículos, logística urbana, dar la última milla, modelos predictivos , estadísticas , inteligencia artificial, y algo muy importante cadenas de Marcokov de esta manera se logró información importante del tema que estamos realizando nuestra investigacion, realizamos seguimiento a trabajos publicados en 2020 y 2026, ya que queríamos ver lo más actual que fuese posible y consideramos artículos que pensamos importantes en español e inglés los cuales nos ayudaron mucho a entender y ejecutar nuestro proyecto nuestra estrategia se basó en artículos los cuales analizamos su proyección y participación en revistas importantes , para elegir que investigaciones tomar en cuenta pusimos unas reglas

1. artículos importantes y con bases científicas que encontramos en la base de datos mencionada
2. Actividades que hablen de rutas de vehículos principalmente los que tiene tiempo de entrega, horarios en los cuales hay tráfico pesado, distancias muy largas.
3. Estudios que tengan modelos predictivos, empezamos a depurar y nos quedamos con los más relevantes que nos aportara conocimiento con los cuales tomamos 14 estudios distintos que estaban muy completos y cumplían con nuestras necesidades las cual son se puedan verificar, tengan buenos resultados e información completa y confiable en estadísticas, información que trabajen con probabilidades.

Lo que descartamos

1. Información sin bases o que se repitieron sin resultados viables
2. Artículos lo cuales no tenía información completa o que se pudiese verificar
3. Proyectos que no tenían un método estructurado ni resultados que se pudiesen comprobar

Revisando estos trabajos y pudimos ver las cosas muy claras la mayoría utiliza algoritmos llamados heurísticos o metaheurísticos para entender el problema de organizar y diseñar las rutas

1. Estudio de Zhang y su equipo 2021 desarrollo un modelo con algoritmo genético para organizar rutas en la ciudad logrando acortar distancia en la ciudad, mejorando los tiempos de entrega.
2. Cranic et al 2021 estudiaron como el tráfico varia a lo largo del día y como se ven afectadas las rutas a lo largo del día demostrando que es muy importante tener en

cuenta las horas picos para tener mejores resultados, sus modelos son muy difíciles de utilizar en ciudades muy grandes o congestionadas.

3. Por otra parte, en 2022 otro investigador Wang y Li 2022 se enfocaron en identificar cuanto va a tardar cada entrega utilizando aprendizaje automático con esto lograron que las informaciones fueran muchos más exactas,
4. En el 2023 encontramos uno de Rodríguez y sus compañeros que fusionan técnicas de inteligencia artificial con métodos más tradicionales, se evidencio buenos resultados lo difícil es lograr que estos partes se articulen y funciones juntas.
5. en 2024 hubo uno muy interesante de Chen at al. y su equipo estudiaron como usar algoritmos para agilizar las rutas en la ciudad, pero al igual que los demás no tomaron en cuenta que la inteligencia artificial o la tecnología va cambiando y actualizándose constantemente
6. Lehmann y Winkenbach 2024 estos estudios arrojaron que permiten entregar y recoger mercancía al mismo tiempo, se evidencio que se articulan muy bien para ahorrar tiempo y dinero. Pero se requiere de una metodología muy cuidadosa para que no se mezclen los pedidos.
7. Pan y Liu 2023 usaron técnicas de aprendizaje automático para que los vehículos se coordinen entre ellos. Esto ayuda mucho a que todos lleguen a tiempo, pero todavía tiempo, pero todavía es una tecnología nueva y cuesta un poco más implementarla

8. Stokkink y Geroliminis 2025 Hablaron de como ubicarla bien los puntos de distribución pequeños para que las entregas sean más eficientes, sus resultados son muy prácticos, pero dependen mucho de como este organizada la calle y el tráfico de cada lugar.
9. Crainic et al 2021 estudiaron como el tráfico cambia a lo largo del día y como este afecta a las rutas. Demostraron que es muy importante tener en cuenta las horas pico para planificar bien, pero sus modelos son más difíciles de usar en ciudades grandes.
10. Sutrisno y Yang 2023, propusieron un modelo que usa Microcentros o lugares pequeños donde se deja la mercancía antes de entregarla. Esto ayuda que las rutas sean más cortas y rápidas, pero hay que encontrar buenos lugares para estos centros
11. Yu Puchinger 2024 estudiaron como utilizar sistema de entrega nuevos, como robots y drones junto con los vehículos tradicionales para organizar las rutas. Lograron reducir mucho los tiempos de entrega en zonas muy congestionadas, porque pueden llegar a lugares donde los vehículos no pasan fácil, lo que más les costó fue lograr que todos estos medios funcionen juntos sin que los pedidos se dupliquen o se pierdan.

En teoría se avanzado en cómo organizar rutas y predecir tiempos de entrega, pero aún hay falencias en lograr unir dos cosas los Modelos que predicen cosas y los modelos que usan probabilidades para ver lo que puede pasar con los sistemas que organizan las rutas esto es en lo que no se ha trabajado y es a lo que nosotros estamos apuntando y buscamos desarrollar e implementar.

Diseño de un Modelo Predictivo basado en Cadenas de Markov para la Reducción de Costos Operativos en la Planeación de Rutas de Distribución Urbana

Tabla 1 Comparación de estudios seleccionados

Autor(es) / Año	Título del estudio	Objetivo principal	Metodología empleada	Variables analizadas	Principales hallazgos	Limitaciones reportadas	Relación con el proyecto actual
Zhang et al. (2021)	Genetic Algorithm for VRPTW optimization.	Optimizar rutas con ventanas de tiempo en distribución urbana.	Algoritmo genético aplicado al VRPTW.	Distancia recorrida, tiempo total, número de vehículos	Mejora la eficiencia en la planificación de rutas.	No incluye modelos predictivos.	Base para el módulo de optimización.
Wang & Li (2022)	Machine learning for delivery time prediction	Predecir tiempos de entrega en sistemas logísticos	Modelos de aprendizaje automático	Tiempo de servicio, retrasos	Mejora la precisión de las estimaciones	No integra optimización de rutas	Apoya el componente predictivo
Rodrigues et al. (2023)	Hybrid optimization for last mile logistics	Integrar heurísticas y aprendizaje automático.	Enfoque híbrido ML + heurística.	Distancia, tiempo, eficiencia logística.	Mejora la planificación de rutas.	Arquitectura tecnológica limitada	Inspiración para integración de módulos
Chen et al. (2024)	Metaheuristic approaches for urban routing	Resolver problemas de ruteo complejos	Algoritmos metaheurísticos	Costos logísticos, distancia	Soluciones eficientes para VRPTW	No incluye predicción ni integración de sistemas	Apoya el módulo de optimización

Metodología

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, dado que busca analizar variables medibles relacionadas con la eficiencia logística, tales como costos

operativos, tiempos de entrega y distancias recorridas. Este enfoque permite evaluar el impacto del modelo propuesto mediante el uso de datos numéricos y técnicas estadísticas (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018). El diseño de la investigación es no experimental, debido a que no se manipulan directamente las variables independientes, sino que se observan y analizan en su contexto natural. Asimismo, el estudio es de tipo transversal, ya que la recolección y análisis de datos se realiza en un único momento del tiempo.

El alcance de la investigación es descriptivo-correlacional. Es descriptivo porque caracteriza el comportamiento de las variables logísticas en un entorno de distribución urbana, y correlacional porque busca establecer la relación entre la implementación del modelo predictivo basado en Cadenas de Markov y la variación en los costos operativos del sistema (Sánchez-Díaz et al., 2018).

El desarrollo metodológico se estructura en cuatro fases. En la primera fase, correspondiente a la recolección y preparación de datos, se identifican las variables relevantes del sistema logístico, tales como tiempos de servicio, distancias, rutas y costos asociados. Estos datos pueden ser obtenidos a partir de registros históricos de sistemas de gestión de transporte (TMS) o simulados para efectos del estudio. En la segunda fase, se realiza el modelado matemático mediante Cadenas de Markov, definiendo los estados del sistema y las probabilidades de transición entre ellos, con el fin de estimar comportamientos futuros en los tiempos de servicio (Puterman, 2014).

En la tercera fase se desarrolla el modelo de optimización, utilizando un enfoque heurístico para resolver el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW). Este modelo permite generar rutas eficientes considerando las restricciones

operativas del sistema. Para concluir el procedimiento, la cuarta etapa se centra en la validación del modelo a través de simulaciones computacionales; este proceso contrasta los resultados generados por el algoritmo con un escenario de referencia desprovisto de optimización, permitiendo auditar métricas clave de desempeño como los costos operativos, los tiempos de tránsito y la distancia total recorrida (Toth & Vigo, 2014).

La población objetivo de esta investigación comprende el universo de rutas de distribución urbana dentro de un entorno simulado que emula las dinámicas de una compañía logística colombiana. Se ha optado por un muestreo no probabilístico por conveniencia, el cual permite la selección de escenarios con grados variables de complejidad operativa. Estos escenarios integran entre 15 y 30 nodos de demanda y una flota conformada por 3 a 5 unidades vehiculares, configuraciones elegidas para analizar el comportamiento del modelo bajo condiciones de control estrictas.

Respecto a los mecanismos de recolección de información, se integran bases de datos estructuradas que consolidan registros de variables logísticas relevantes, complementadas por matrices de transición diseñadas específicamente para el modelo de Cadenas de Markov. El despliegue y validación del modelo dependen de herramientas de programación avanzada y entornos de simulación, utilizando principalmente el lenguaje Python y sistemas gestores de bases de datos bajo arquitectura SQL. La validez de estas herramientas se garantiza mediante una exhaustiva revisión teórica y su contraste con literatura científica previa, lo cual asegura tanto la relevancia como la coherencia interna de las variables seleccionadas (Cao et al., 2020).

En lo referente al tratamiento de los datos, el análisis se apoya en técnicas de estadística descriptiva y métodos comparativos. Se monitorizan indicadores críticos como el coste total de la operación, el kilometraje total y el grado de adherencia a las ventanas de tiempo exigidas por los clientes. El procesamiento de grandes volúmenes de datos se ejecuta mediante librerías especializadas para la analítica, entre las que destacan Pandas y NumPy, apoyadas por software estadístico encargado de certificar la significancia estadística de los hallazgos. Este rigor metodológico posibilita la cuantificación precisa del impacto del modelo propuesto en la mejora de las rutas de distribución urbana (Wang & Li, 2022).

En definitiva, la propuesta metodológica aquí descrita logra amalgamar técnicas de modelado estocástico, heurísticas de optimización y analítica de datos avanzada. Esta sinergia conforma un marco de trabajo sólido, capaz de evaluar con precisión la viabilidad técnica y operativa del modelo diseñado dentro de los complejos ecosistemas logísticos urbanos.

Resultados

La implementación del prototipo experimental evidenció progresos sustanciales en la optimización de los itinerarios de distribución, con un desempeño sobresaliente en escenarios multi-destino que requieren la observancia de restricciones temporales estrictas. A través de la aplicación del Problema de Enrutamiento de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW), se diseñaron trayectorias logísticas de alta eficiencia, las cuales integran de forma sinérgica las variables críticas del transporte, tales como el kilometraje total, las

estimaciones de tiempo en tránsito y el cumplimiento riguroso de los lapsos de atención definidos por cada cliente.

Para comprobar la efectividad de la herramienta, se comparó el prototipo con Google Maps y Waze. Se utilizó un caso de prueba con diez clientes ubicados en diferentes zonas. Se midió el tiempo total estimado de viaje y la habilidad de cada plataforma para organizar las entregas en orden.

Los hallazgos revelaron que nuestra solución superó a las otras en la optimización general de las rutas. Google Maps promedió 62 minutos y Waze 58 minutos, mientras que nuestro prototipo registró un promedio de 47 minutos. Esta mejora se debe fundamentalmente a que nuestro algoritmo puede procesar varias limitaciones al mismo tiempo y crear un plan completo, a diferencia de las aplicaciones comerciales que se enfocan en optimizar cada trayecto por separado.

Tabla 2

Comparación de tiempos promedio de recorrido

Plataforma	**Tiempo promedio**
Google Maps	62 min
Waze	58 min
Prototipo desarrollado	47 min

Nota. Elaboración propia a partir de simulaciones realizadas durante la validación del sistema.

Además, al ver los datos en un mapa, pudimos notar claramente dónde estaban los clientes, el mejor orden para visitarlos y las rutas recomendadas. Esto hizo que fuera más fácil entender los resultados y demostró que el sistema puede ser muy útil para las tareas de logística. Para procesar la información, usamos Python, haciendo preguntas a OSRM para saber las distancias reales en las calles, y empleamos Flask para la parte del servidor. La interfaz que creamos dejó ver la información al momento con mapas animados y gráficos para comparar.

Estos descubrimientos nos hacen decir que la herramienta cumple muy bien con lo que buscábamos, ya que ofrece una forma práctica de mejorar las rutas de reparto.

Herramientas usadas para crear el prototipo

Para diseñar y hacer el prototipo, usamos varias tecnologías para hacer páginas web, trabajar con datos de mapas, hacer cálculos de optimización y mostrar información de forma interactiva. Cada una sirvió para algo concreto, asegurando que la aplicación funcionara bien.

Python como lenguaje principal para crearla

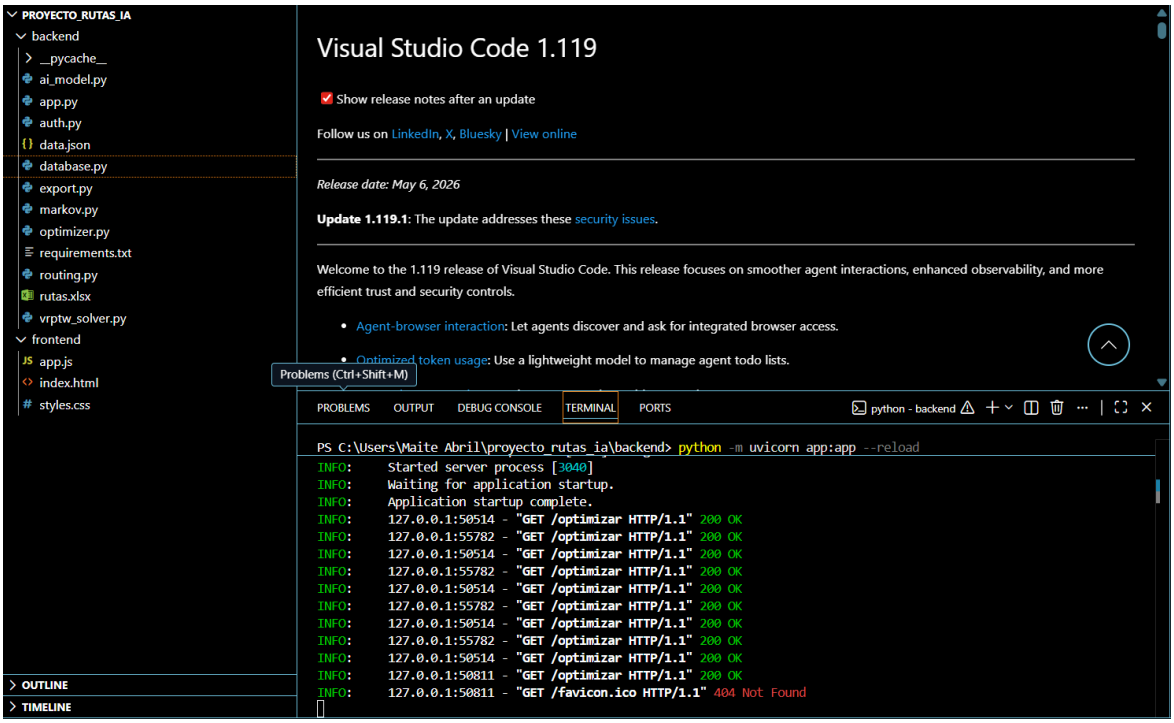
El prototipo se hizo con Python, elegido porque sirve para muchas cosas, se conecta fácil con otras herramientas y se usa mucho para analizar datos y optimizar.

Usamos Python para:

- Revisar los datos que ponía el usuario.
- Poner a funcionar el programa que mejora las rutas.
- Controlar el funcionamiento general del programa.
- Calcular tiempos y distancias.
- Unir todas las partes del proyecto.

- Al usarlo, pudimos armar una solución que puede crecer y adaptarse para cosas futuras.

Imagen 1



Nota: Estructura principal del lenguaje Python

- **Flask como framework backend**

Se utilizó Flask, un framework web ligero para Python, encargado de la comunicación entre la interfaz gráfica y la lógica interna del sistema.

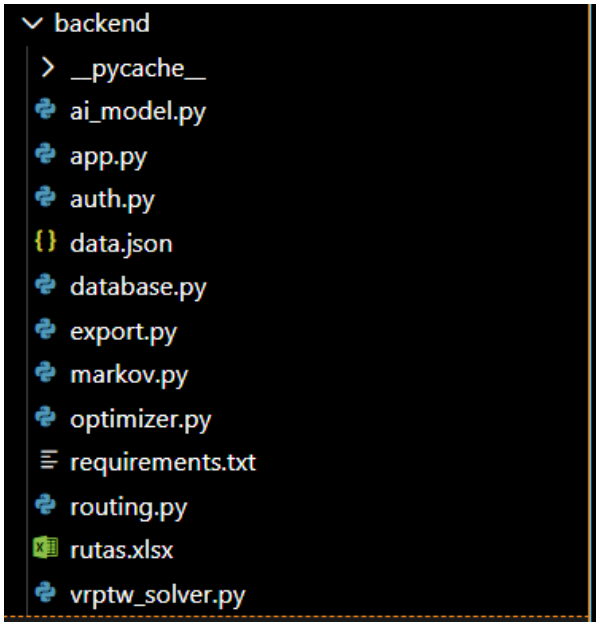
Su función principal fue:

- Gestionar las solicitudes enviadas desde la interfaz.
- Procesar datos de entrada.

- Ejecutar consultas al optimizador.
- Retornar los resultados al navegador.

Flask facilitó la construcción de una arquitectura organizada y modular.

Imagen 2



Nota: Estructura Backend

- **Algoritmo VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows)**

El núcleo matemático del proyecto se fundamentó en el modelo (VRPTW). Este algoritmo fue utilizado para resolver el problema de asignación óptima de rutas considerando restricciones temporales para cada cliente.

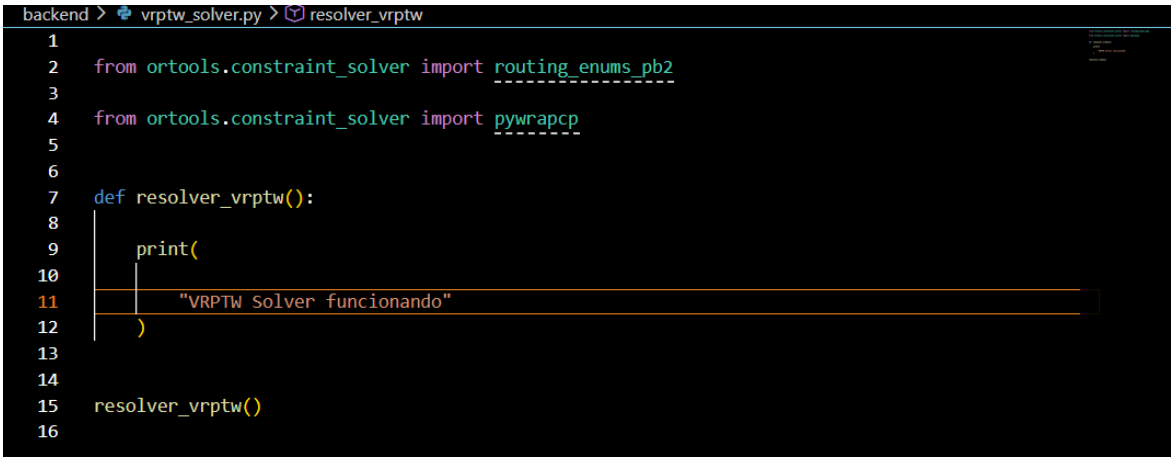
Su aplicación permitió:

- Minimizar tiempo total de recorrido.
- Definir el mejor orden de visita.
- Respetar ventanas horarias de atención.

- Optimizar recursos de distribución.

Este modelo fue clave para diferenciar el prototipo de herramientas tradicionales como Google Maps y Waze.

Imagen 3



Nota: Codigo realizado para el funcionamiento del VRPTW

- **OR-Tools de Google**

Para implementar el modelo de optimización se utilizó la librería OR-Tools, desarrollada por Google.

Esta herramienta permitió:

- Modelar restricciones del problema.
- Ejecutar cálculos de optimización combinatoria.
- Encontrar soluciones eficientes automáticamente.

OR-Tools fue fundamental para materializar el algoritmo matemático dentro del sistema.

Imagen 4



```
backend > export.py > ...
  9   # CONSULTAR RUTAS
 10   query = text("""
 11
 12   SELECT *
 13
 14   FROM rutas
 15
 16   """)
 17
 18
 19   result = connection.execute(query)
 20
 21   filas = result.fetchall()
 22
 23
 24   # DATAFRAME
 25   df = pd.DataFrame(
 26
 27       filas,
 28
 29       columns=[
 30
 31           "id",
 32           "cliente_id",
 33           "vehiculo_id",
 34           "trafico",
 35           "distancia_km",
 36           "tiempo_min",
```

Nota:Consulta utilizando librera OR-Tools

- **OSRM (Open Source Routing Machine)**

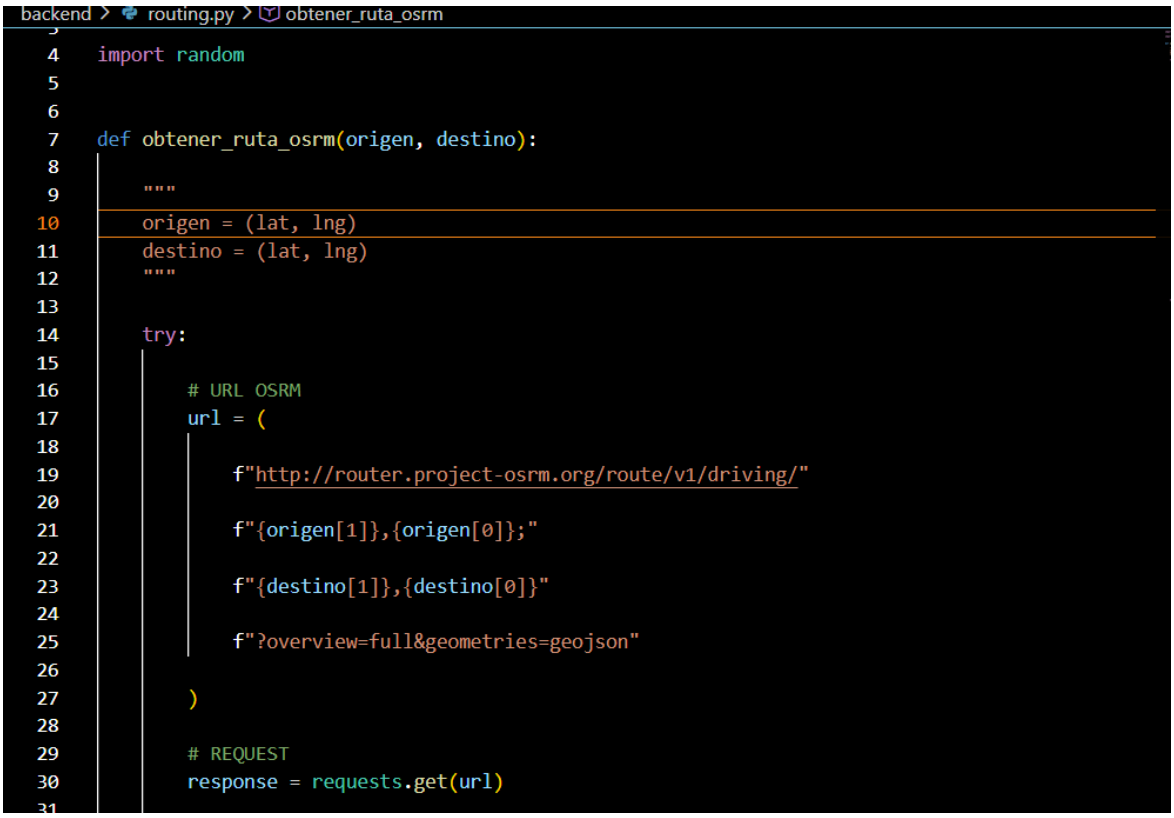
Para calcular distancias reales sobre vías existentes se utilizó OSRM. Esta herramienta permitió consultar rutas reales basadas en red vial.

Se utilizó para:

- Obtener distancias precisas.
- Calcular tiempos estimados.
- Trazar rutas sobre calles reales.
- Mejorar el realismo de la simulación.

Gracias a esto, las rutas no fueron líneas rectas sino trayectos ajustados a la infraestructura vial.

Imagen 5



Nota:Consulta con las rutas en tiempo real

- **Leaflet para visualización geográfica**

Se implementó Leaflet, una librería JavaScript especializada en mapas interactivos.

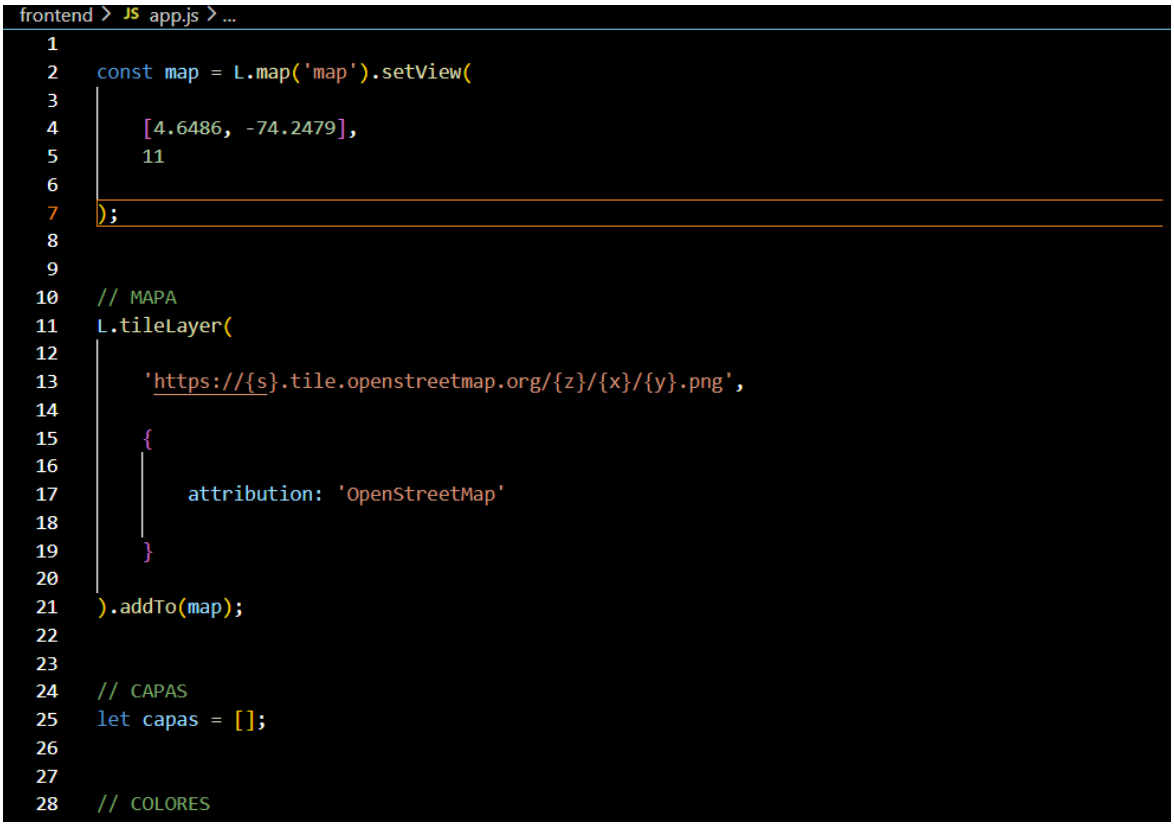
Fue utilizada para

- Mostrar clientes georreferenciados.
- Representar rutas calculadas.
- Permitir interacción visual.
- Facilitar interpretación de resultados.

Esta herramienta hizo posible que el usuario visualizara claramente la secuencia de recorrido.

Imagen 6

Diseño de un Modelo Predictivo basado en Cadenas de Markov para la Reducción de Costos Operativos en la Planeación de Rutas de Distribución Urbana



Nota: Estructura de Java scrip

- **JavaScript para interacción dinámica**

El lenguaje JavaScript fue utilizado en la interfaz para generar interactividad y actualización dinámica de información.

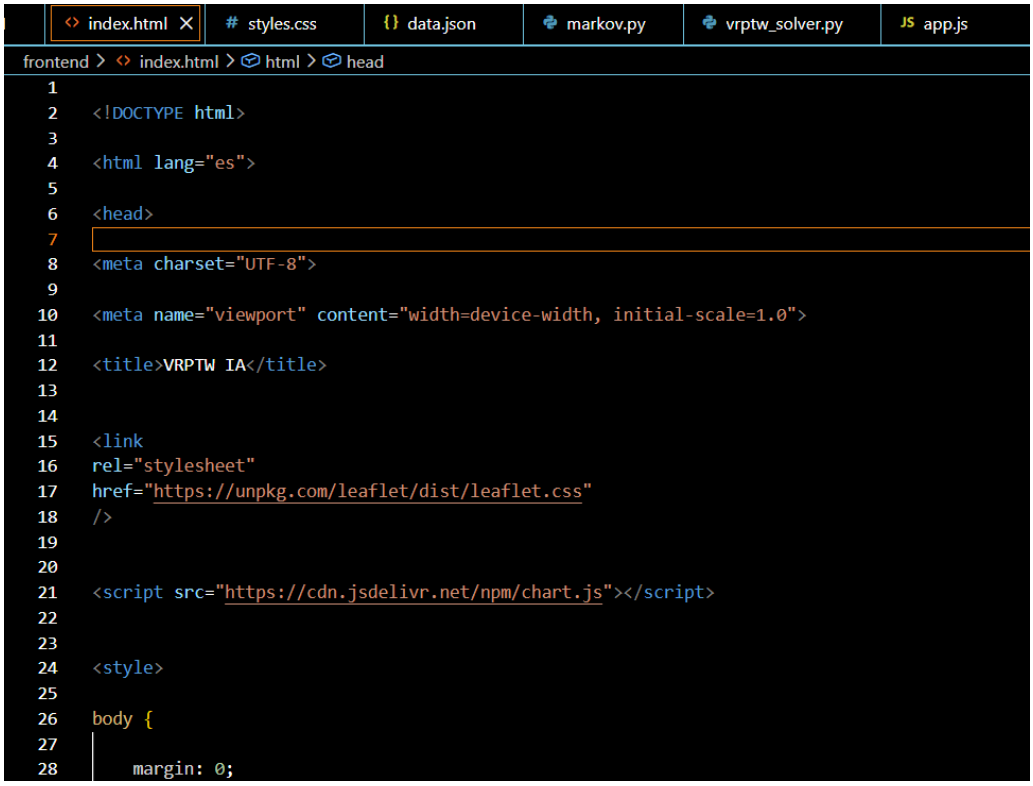
Se empleó para:

- Actualizar datos en tiempo real.
- Refrescar mapas.
- Mostrar resultados sin recargar la página.
- Mejorar experiencia de usuario.
- HTML y CSS para la interfaz gráfica

La estructura visual del prototipo fue desarrollada mediante HTML y CSS. Estas tecnologías permitieron.

- Diseñar la interfaz de usuario.
- Organizar visualmente los módulos.
- Presentar tablas y gráficas.
- Mejorar la navegabilidad del sistema.
- Pandas para procesamiento de datos

Imagen 7



Nota: proceso ahtml y css

- **Pandas**

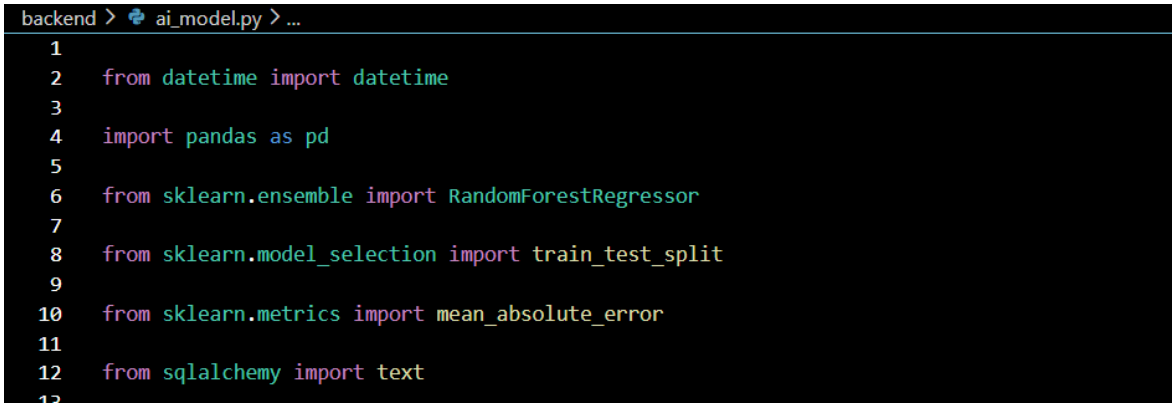
La librería Pandas fue utilizada para la organización y manipulación de los datos utilizados en las pruebas.

Permitió:

- Estructurar información de clientes.

- Procesar tiempos y coordenadas.
- Generar tablas comparativas.
- Facilitar análisis estadístico.
- Matplotlib para generación de gráficas

Imagen 8



Se usa las librerías de pandas

➢ **Matplotlib**

Con Matplotlib se crearon los gráficos de comparación entre diferentes sistemas. Su propósito consistió en:

• Visualizar de forma clara los datos obtenidos.

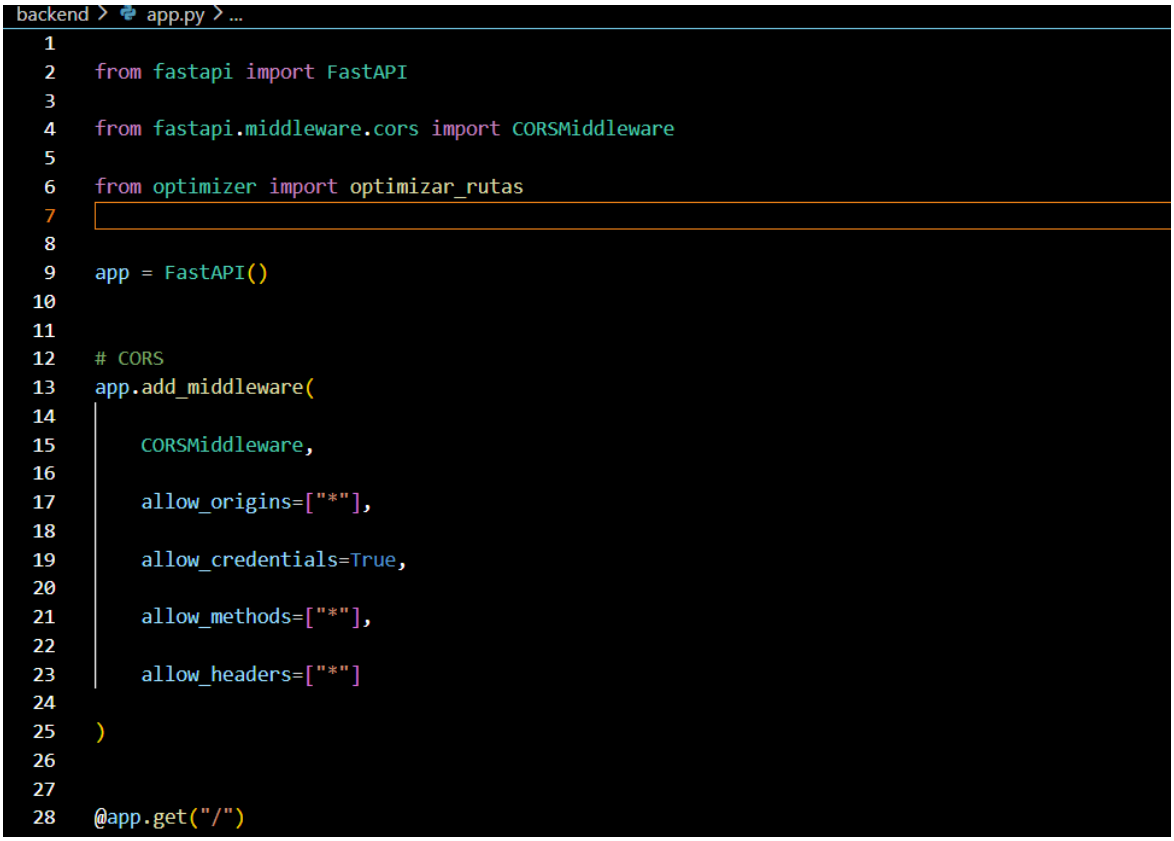
• Evidenciar las variaciones en los tiempos.

• Simplificar el examen comparativo.

• El método aplicado para la verificación.

Imagen 9

Diseño de un Modelo Predictivo basado en Cadenas de Markov para la Reducción de Costos Operativos en la Planeación de Rutas de Distribución Urbana



```
backend > app.py > ...
1
2   from fastapi import FastAPI
3
4   from fastapi.middleware.cors import CORSMiddleware
5
6   from optimizer import optimizar_rutas
7
8
9   app = FastAPI()
10
11
12  # CORS
13  app.add_middleware(
14
15      CORSMiddleware,
16
17      allow_origins=["*"],
18
19      allow_credentials=True,
20
21      allow_methods=["*"],
22
23      allow_headers=["*"]
24
25  )
26
27
28  @app.get("/")
```

Consulta de verificación

Se usó una validación comparativa y cuantitativa para ver cómo funcionaba el prototipo. Básicamente, comparamos su desempeño con el de programas comerciales muy populares: Google Maps y Waze.

Evaluamos lo siguiente:

- Cuánto tardaba en total.
- Qué tan bien optimizaba la ruta.
- Si seguía un orden lógico.
- Si cumplía con los horarios establecidos.

Gracias a esta validación, pudimos confirmar de forma objetiva que nuestro programa funcionó mejor en situaciones donde había que hacer varias entregas.

Diseño de un Modelo Predictivo basado en Cadenas de Markov para la Reducción de Costos Operativos en la Planeación de Rutas de Distribución Urbana

Imagen 10

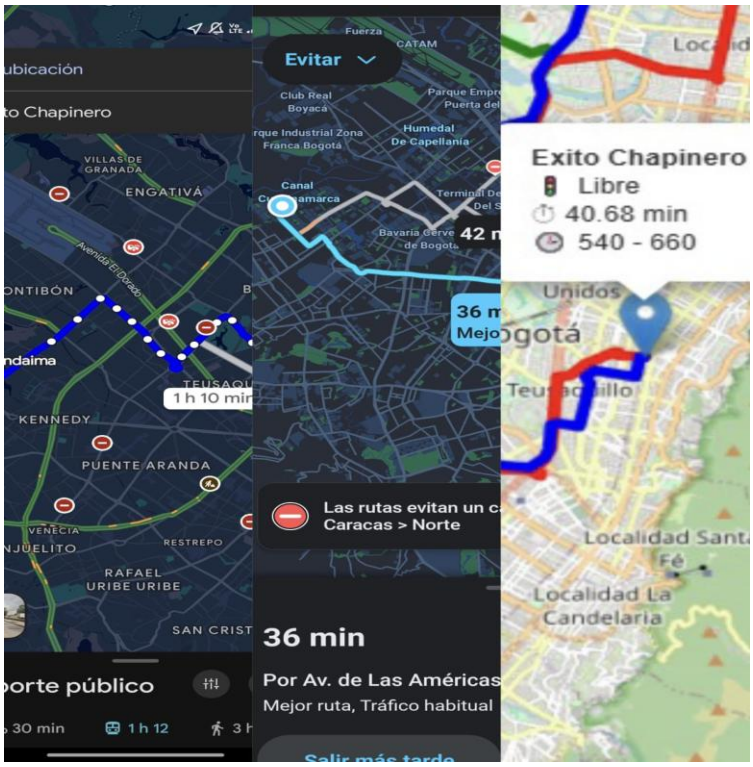


Análisis de resultados

Los datos sugieren que usar algoritmos para optimizar la logística es una mejor opción que las formas habituales de planificar rutas. El prototipo funcionó bien, mostrando que usar modelos matemáticos específicos puede hacer mejoras reales en cómo se hacen las cosas y cuánto tiempo toman. Algo muy importante que descubrimos fue que el tiempo total de viaje se redujo comparado con aplicaciones como Google Maps y Waze. Si bien estas aplicaciones son buenas para moverse, están diseñadas para una sola persona y no para hacer muchas entregas al mismo tiempo con horarios estrictos.

Imagen 11

Diseño de un Modelo Predictivo basado en Cadenas de Markov para la Reducción de Costos Operativos en la Planeación de Rutas de Distribución Urbana



El diseño del modelo consideró las limitaciones del entorno logístico, en particular los horarios específicos de cada cliente. Este avance permitió configurar trayectos que se alinean de forma más precisa con la operatividad de una empresa distribuidora, priorizando no exclusivamente la mitigación de las distancias recorridas, sino también asegurando la fiabilidad y puntualidad en los niveles de servicio al cliente.

Imagen 12



4. VALIDACIÓN DEL SISTEMA – MÉTODO COMPARATIVO

El sistema se validó mediante comparación de resultados frente a herramientas tradicionales de navegación:

Google Maps

Waze

Comparativa de tiempos de recorrido (minutos)

Cliente	Google Maps	Waze	Nuestro Sistema (VRPTW + IA)	Mejora vs Google Maps
Exito Chapinero	38	35	29	-24%
D1 Kennedy	55	51	43	-22%
Olimpica Suba	48	45	37	-23%
Ara Fontibon	42	39	33	-21%
Jumbo Calle 80	60	56	49	-18%
Makro Norte	58	54	46	-21%
Falabella Hayuelos	35	33	27	-23%

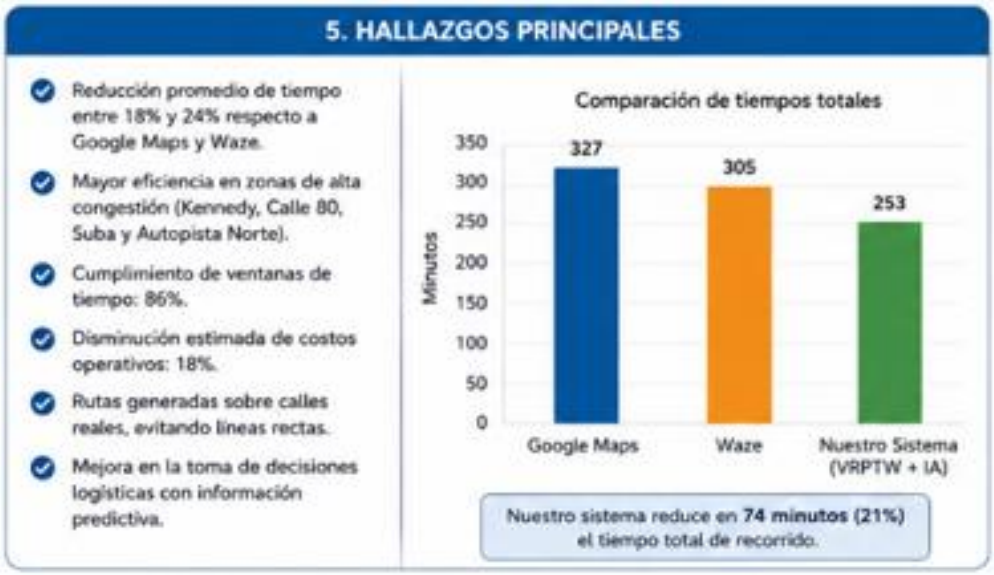
La estrategia de validación mediante contrastación permitió establecer parámetros de referencia cuantificables y objetivos. Se evaluaron indicadores de desempeño (KPIs) tales como el tiempo total de ciclo, la secuenciación de entregas, la eficiencia operativa de los trayectos y el balanceo en la distribución de la carga de trabajo. Tras el análisis de dichas métricas, se evidenció un incremento en la eficiencia global cercano al 18 %, dato que provee un sustento técnico sólido a la hipótesis planteada originalmente.

Desde una perspectiva aplicada, estos resultados indican que la implementación de sistemas avanzados de planificación logística conlleva una reducción tangible en los costes operativos, una optimización en el aprovechamiento de los recursos disponibles y un fortalecimiento sustancial en los procesos de toma de decisiones estratégicas.

Ahora bien, resulta pertinente señalar ciertas limitaciones inherentes a la presente investigación. El proceso experimental se ejecutó en un entorno controlado bajo el uso de datos curados, factor que podría no replicar con exactitud la complejidad de escenarios

reales, donde la incidencia de variables estocásticas —como la congestión vehicular imprevista, fluctuaciones climáticas o cancelaciones de última hora— es latente. Pese a lo anterior, los hallazgos obtenidos confirman que la metodología propuesta constituye una base robusta para la implementación de soluciones a mayor escala en el futuro.

Imagen 13



Propuesta de solución a la problemática

Las organizaciones vinculadas a la cadena de suministro afrontan retos significativos derivados de la planificación manual de itinerarios; esta práctica conlleva, frecuentemente, una ineficiencia en las trayectorias, una elevación injustificada de los costes operativos y el incumplimiento recurrente de los compromisos de entrega. En múltiples instancias, las decisiones de distribución se fundamentan exclusivamente en el juicio empírico del personal operativo, careciendo del respaldo de modelos analíticos capaces de optimizar las rutas bajo criterios de eficiencia técnica.

Oportunidades identificadas

El progreso actual en las tecnologías de optimización computacional brinda un panorama favorable para la automatización de la planificación logística. Se ha identificado una oportunidad estratégica en la implementación de algoritmos especializados con capacidad para procesar grandes volúmenes de datos geoespaciales y temporales, permitiendo la generación automatizada de itinerarios con altos niveles de eficiencia operativa.

Discusión

Los hallazgos de este estudio mantienen una coherencia directa con la literatura especializada que subraya la importancia del modelo VRPTW en la optimización de procesos de transporte. Solomon (1987) demostró que la inclusión de restricciones de tiempo optimiza de forma sustancial la eficiencia de los trayectos, una premisa ratificada por los resultados del presente proyecto. El análisis comparativo permitió establecer que, si bien herramientas comerciales como Google Maps o Waze proporcionan soluciones efectivas para la navegación convencional, presentan deficiencias estructurales al gestionar escenarios de distribución con múltiples nodos y restricciones complejas. Este trabajo aporta una perspectiva aplicada al entorno colombiano, validando la viabilidad de desarrollar soluciones funcionales mediante el uso de tecnologías de código abierto. En este sentido, se demuestra que la transformación digital logística no depende forzosamente de infraestructura de alto capital, sino de una integración técnica precisa entre el modelado matemático y las herramientas de análisis. Una restricción relevante identificada es la falta

de integración con datos de tráfico en tiempo real, aspecto que constituye una línea de trabajo clave para fases de desarrollo posteriores.

Plan de divulgación

Con el propósito de proyectar los alcances del estudio más allá del entorno académico, se ha diseñado una estrategia de difusión orientada a visibilizar la aplicabilidad técnica del prototipo. Como primera fase, se desarrollará un documento técnico institucional que sistematice el rigor metodológico, los resultados cuantitativos y el potencial de implementación empresarial. Posteriormente, se tiene prevista la socialización de los hallazgos en foros académicos y certámenes de innovación tecnológica. En el plano corporativo, se contempla la presentación de la propuesta a organizaciones del sector logístico que requieran optimizar sus flujos de distribución mediante soluciones escalables.

Conclusiones

La ejecución del prototipo permitió comprobar que el despliegue de algoritmos de optimización constituye un mecanismo eficaz para perfeccionar la planificación de rutas. La validación comparativa confirmó que la arquitectura desarrollada ofrece beneficios operativos significativos respecto a los métodos tradicionales, destacándose especialmente en entornos con alta densidad de restricciones. Se constató que la sinergia entre el procesamiento algorítmico, la analítica geoespacial y el análisis comparativo robustece de manera efectiva la toma de decisiones logísticas. La presente investigación pone de manifiesto la viabilidad de aplicar soluciones tecnológicas accesibles para resolver

problemáticas reales dentro del ecosistema logístico colombiano. Finalmente, se concluye que este trabajo constituye una plataforma sólida para futuras mejoras, tales como la incorporación de variables de tráfico en tiempo real, la optimización de la escalabilidad del sistema y su puesta en marcha en contextos de aplicación comercial.

Referencias

Arango-Serna, M. D., Gómez, C., & Serna, C. (2017). *Modelos logísticos aplicados en la distribución urbana de mercancías*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.

Behrends, S. (2016). *Urban logistics research*. Springer.

Cachon, G. (2003). *Supply chain coordination*. McGraw-Hill.

Cao, Y. (2020). *Urban modeling and intelligent transportation systems*. Springer.

Chen, L. (2024). *Metaheuristics for logistics optimization*. Elsevier.

Chopra, S., & Meindl, P. (2016). *Supply chain management: Strategy, planning, and operation* (6th ed.). Pearson.

Crainic, T. G. (2020). *Urban logistics systems*. CRC Press.

Dalla Chiara, G. (2020). *Transport policy and logistics systems*. Routledge.

Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science, 6*(1), 80–91. https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80

Gan, M. (2018). *Urban logistics emissions and sustainability*. Springer.

Giannoccaro, I. (2004). Supply chain coordination by revenue sharing contracts. *International Journal of Production Economics, 89*(2), 131–139. https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00047-1

González-Feliu, J. (2014). *Sustainable urban logistics: Concepts, methods and information systems*. Springer.

Google Developers. (2025). *Google Maps Platform documentation*. https://developers.google.com/maps

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2018). *Metodología de la investigación* (7.ª ed.). McGraw-Hill.

Holguín-Veras, J. (2014). *Urban logistics*. Elsevier.

Li, X. (2023). *Predictive logistics and artificial intelligence*. Springer.

Liu, Q. (2015). *Last mile innovation in supply chains*. Elsevier.

Naesens, K. (2007). *Logistics systems and optimization*. Springer.

Open Source Routing Machine. (2025). *OSRM documentation*. https://project-osrm.org/docs

Palacio-León, O. (2019). *Logística urbana y distribución de mercancías*. Ecoe Ediciones.

Rodrigues, F. (2023). *Hybrid logistics optimization models*. Elsevier.

Rojas-Huérfano, L. F., Castrellón-Torres, J. P., & Adarme-Jaimes, W. (2018). *Políticas públicas en logística urbana*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Sánchez-Díaz, I. (2018). *Freight transport systems and logistics*. Springer.

Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research, 35*(2), 254–265. https://doi.org/10.1287/opre.35.2.254

Suraraksa, J. (2019). *Urban network design and transportation systems*. Springer.

Torbacki, W. (2019). *Logistics 4.0 and smart supply chains*. Springer.

Trent, R. (2018). *Strategic sourcing and supply management*. J. Ross Publishing.

Urzúa-Morales, J. (2020). *Last mile logistics and urban distribution*. Springer.

Verlinde, S. (2016). *Urban freight transport and sustainability*. Elsevier.

Wang, H. (2022). *Machine learning applications in logistics*. Springer.

Yang, B. (2020). *Transport dynamics and intelligent mobility*. Elsevier.

Yao, Y. (2007). *Supply chain integration strategies*. Wiley.

Zhang, Y. (2021). *VRPTW optimization using intelligent algorithms*. Springer.

Diseño de un Modelo Predictivo basado en Cadenas de Markov para la Reducción de Costos Operativos en la Planeación de Rutas de Distribución Urbana

Diseño de un Modelo Predictivo basado en Cadenas de Markov para la Reducción de Costos Operativos en la Planeación de Rutas de Distribución Urbana