

GESTIÓN DEL TRANSPORTE PARA LA COMERCIALIZACIÓN DE LECHE UHT EN UNA EMPRESA DEL SECTOR LÁCTEO

TRANSPORTATION MANAGEMENT FOR THE COMMERCIALIZATION OF UHT MILK IN A COMPANY WITHIN THE DAIRY SECTOR

Jhon Andrés Ascuntar Silva¹, Iván Alirio Realpe Cabrera².

{jhon.ascuntar @upec.edu.ec¹, ivan.realpe @upec.edu.ec²}

Fecha de recepción: 13/03/2026 / Fecha de aceptación: 27/03/2026 / Fecha de publicación: 31/03/2026

RESUMEN: La gestión del transporte se ha consolidado como una pieza clave para el éxito de la cadena de suministro, la falta de planificación y control en el proceso de distribución representa uno de los mayores desafíos en especial en empresas con productos de naturaleza perecedera. En ese sentido, la presente investigación combinó la parte matemática de los modelos de optimización del transporte con la parte computacional de las herramientas tecnológicas emergentes para abordar el problema logístico de ruteo en productos con temperatura controlada. El propósito de esta investigación fue minimizar la distancia total y tiempo total en las seis rutas de distribución. Inicialmente se diagnosticó la situación actual del proceso de distribución permitiendo identificar las fallas operativas. Luego se desarrolló un modelo VRP (*Vehicle Routing Problem*) que incluyó las restricciones propias del escenario real, tales como ventanas de tiempo, velocidad de vehículos y número de puntos de entrega. El modelo fue evaluado mediante el algoritmo VRP de OR-Tools que integra codificación metaheurística de búsqueda local guiada, esta técnica prueba diferentes rutas para encontrar la más corta en distancia y tiempo garantizando una solución rápida, exacta y eficiente. Los resultados indican una notable reducción del 74.6% en los kilómetros recorridos en rutas específicas, minimizó el tiempo total de recorrido en un rango de una a dos horas y media. Además, la optimización permitió organizar las entregas de manera eficiente, al permitir que los clientes reciban sus productos en el periodo de 8 horas laborables aumentando la puntualidad y confianza en el servicio. En conclusión, el estudio evidencia el potencial de las herramientas de optimización como apoyo en la toma de decisiones en la gestión del transporte contribuyendo a la operatividad del sector.

Palabras clave: *Distribución, optimización de rutas, VRP, gestión del transporte, modelos matemáticos, alimentos perecederos*

¹Maestría en Logística y Cadena de Suministro, Universidad Politécnica Estatal del Carchi-Ecuador, <https://orcid.org/0009-0008-8908-6360>; +593992762853.

²Universidad Politécnica Estatal del Carchi-Ecuador, 0000-0002-4636-3750; +593996781025.

ABSTRACT: Transport management has established itself as a cornerstone for supply chain success, a lack of planning and control in the distribution process represents one of the major challenges, especially for companies dealing with perishable products. The present paper combined the mathematical component of transport optimization models with the computational capabilities of emerging technological tools to address the logistics routing problem for temperature-controlled products. The purpose of this research was to minimize both the total distance and total time across six distribution routes. Initially, the current state of the distribution process was diagnosed, which allowed the identification of operational failures. Subsequently, a Vehicle Routing Problem (VRP) model was developed, incorporating real world such as time windows, vehicle speeds and the number of delivery points. The model was evaluated using the OR-Tools VRP algorithm, which integrates a Guided Local Search metaheuristic. This technique tests various routes to identify the shortest path in terms of distance and time, ensuring a fast accurate, and efficient solution. The results indicate a notable 74.6% reduction in kilometers traveled on specific routes and a decrease in total travel time ranging from one to two and a half hours. Furthermore, this optimization streamlined delivery organization, ensuring customers receive their products within an 8-hour workday, thereby increasing punctuality and service reliability. In conclusion, the study demonstrates the potential of optimization tools as support for decision-making in transportation management, contributing to improved operational efficiency in the sector.

Keywords: *Distribution, route optimization, VRP, transportation management, mathematical models, perishable foods*

INTRODUCCIÓN

Actualmente el aumento de volumen en el tráfico vehicular ha generado un desafío significativo, convirtiendo al transporte en un elemento fundamental de la vida diaria (1). En ese sentido, la inadecuada gestión del transporte puede tener múltiples consecuencias negativas, entre ellas: el aumento en el consumo de combustibles fósiles, mayores niveles de contaminación, accidentes inesperados y una considerable pérdida de tiempo.

La distribución de alimentos perecederos representa uno de los mayores retos logísticos, se requiere una gestión eficiente para garantizar la seguridad y calidad del producto. La planificación operativa implica el minucioso control en los diferentes eslabones de la cadena de suministro, siendo la optimización de rutas y administración de flotas los más relevantes. Alrededor del 30 % de productos con temperatura controlada se desperdician por la ruptura en la cadena de frío durante la distribución (2), la inadecuada infraestructura para el transporte de estos alimentos, eleva los costos logísticos y genera la necesidad de incorporar nuevas tecnologías de monitoreo para mejorar la operatividad y fortalecer la competitividad en el mercado.

El incremento de los costos logísticos se debe a la falta de articulación y eficiencia en el transporte interno, así como a la limitada calidad en las rutas, que no permiten la circulación fluida ni constante (3). Esta situación afecta directamente la competitividad de los productos, al reducir la capacidad para cumplir con los estándares de eficiencia requeridos en el mercado. Asimismo, las

organizaciones que carecen de mecanismos de monitoreo y evaluación adecuados que permitan verificar si sus productos o servicios están llegando de manera correcta al destino, afectan la visibilidad y control en la cadena de distribución generando incertidumbre y limitando la capacidad de respuesta ante fallas operativas.

Investigaciones previas como la de (4) y (5), han demostrado que la implementación de modelos matemáticos junto con herramientas tecnológicas basadas en algoritmos inteligentes, en entornos caracterizados en la producción de bienes para su posterior distribución a diversos destinos han logrado disminuir los accidentes en un 38 %, reducir los fallos en la flota en un 25 % y disminuir los costos de transporte hasta en un 53%, además de alcanzar del 98% en la predicción de la demanda y los tiempos de transporte.

De igual manera, los métodos heurísticos orientados a optimizar los tiempos de entrega de productos simultáneamente minimizan el impacto ambiental hasta en un 25% y disminuyeron en 18% los costos económicos, ya que consideran la incertidumbre tanto de la demanda como en la capacidad de las instalaciones (6). Estos avances sugieren que la integración de métodos de aprendizaje automático en la gestión del transporte puede ofrecer soluciones innovadoras a problemas tradicionales.

Por lo expuesto, este estudio tiene como finalidad integrar la base matemática con los diferentes parámetros operativos (puntos de demanda, la flota de vehículos y las rutas) para optimizar el transporte de la empresa láctea en cuestión. Para ello, se llevará a cabo una descripción de las bases teóricas y conceptuales que fundamentaran a las variables de investigación, así como un diagnóstico del modelo actual y, a partir de los hallazgos, se diseñará un nuevo modelo de gestión del transporte que se adapte a las necesidades específicas de la empresa centrándose en la optimización de rutas, eficiencia de la flota y cobertura del servicio. La propuesta podrá ser replicada en otras organizaciones del sector lácteo contribuyendo al desarrollo de metodologías innovadoras en la gestión logística.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación tiene como punto de partida un mapeo sistemático de la literatura (MSL), un enfoque estructurado y riguroso que permite examinar de manera integral un amplio espectro de estudios relevantes en el área de investigación. De esta manera, se proporcionó una base sólida y un respaldo empírico en la adquisición y generación de conocimiento.

Siguiendo el protocolo planteado (7), se estructuran tres fases: primero, la definición de la búsqueda, en donde se limitó y determinó el alcance de la revisión a artículos publicados en español e inglés en un periodo de tiempo comprendido entre 2020 y 2025, además para garantizar la relevancia técnica se emplearon dos motores de búsqueda, *Science Direct* y *Scopus*, mientras que para los descriptores de búsqueda se usó palabras clave combinadas junto con el operador booleano AND, con el fin de restringir los resultados y obtener estudios más relevantes y alineados con el tema de investigación, de esa manera se simplificaron los vacíos de la literatura.

En la siguiente fase mediante los motores de búsqueda se identificaron un total de 1268 escritos, bajo criterios de exclusión e inclusión previamente definidos se filtró a 30 documentos entre artículos y estudios de caso relacionados a la investigación (Figura 1), estas acciones permitieron la integración de un enfoque temático y el desarrollo de un análisis conceptual y teórico.

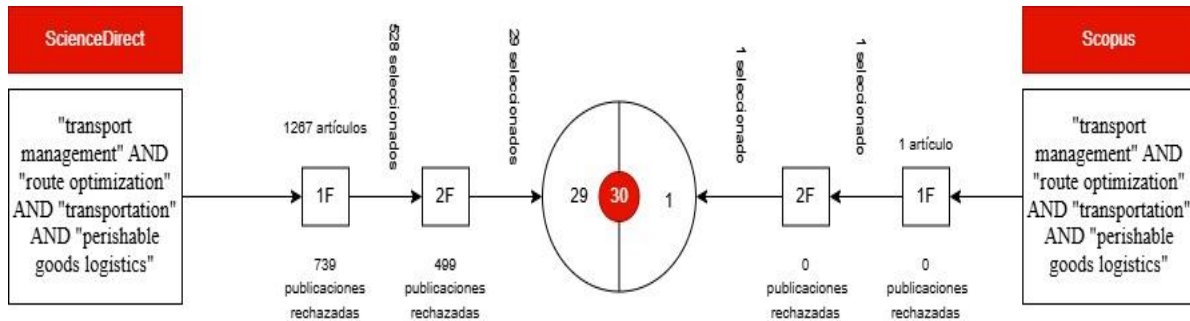


Figura 1. Fase 2: Selección de trabajos primarios.

Por último, se procedió con el análisis que incluyó un mapeo de concurrencia utilizando el software VOSviewer, permitiendo realizar una visualización detallada de las conexiones entre las palabras clave extraídas los 30 artículos seleccionados. Se aplicó un umbral mínimo de 3 apariciones por palabra clave, con el fin de centrar el análisis en los términos más relevantes y frecuentes.

De un total de 134 palabras clave presentes en los 30 artículos solo 10 palabras clave cumplían con este umbral, lo que permitió identificar las áreas más relevantes y centrales dentro del campo de estudio (Figura 2). En base a los 30 documentos seleccionados se identificó que el 50% de las investigaciones proponen a la técnica de modelamiento matemático combinada con VRP como solución a los problemas relacionados con la gestión del transporte en alimentos perecederos. A partir de este enfoque, se logró determinar la metodología, técnicas e instrumentos necesarios para la recolección de información.

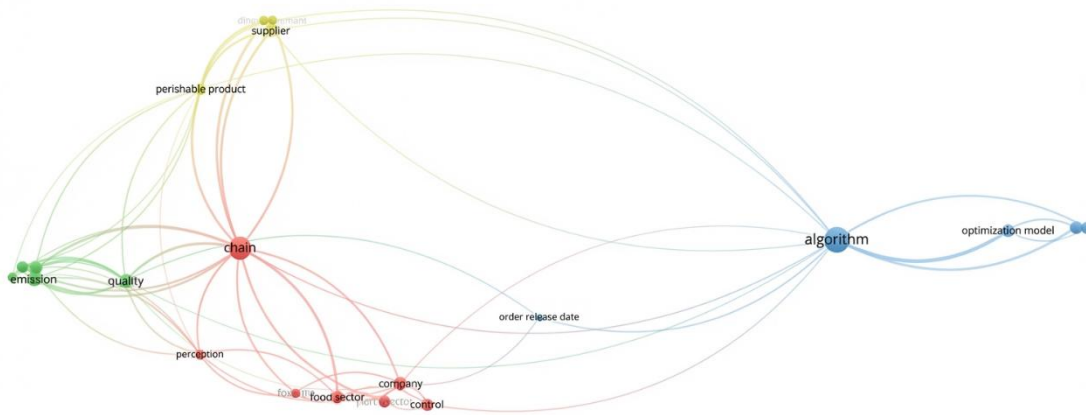


Figura 2. Mapeo de concurrencia.

El MSL facilitó la elaboración del protocolo de investigación con enfoque mixto, la parte cualitativa se orientó al análisis de documentos y de factores estratégicos y operativos a través de la recolección de percepciones, experiencias y criterios de actores clave de la empresa. Por otro lado, la parte cuantitativa se centró en el análisis estadístico de datos históricos, complementado con la evaluación de indicadores clave de desempeño como, por ejemplo: tiempo en ruta, distancia de rutas y cantidad enviada en cada camión. Estos indicadores permitieron identificar la situación actual, evaluar el desempeño logístico y generar información para la propuesta de diseño del modelo de gestión de transporte para optimizar la comercialización de productos lácteos.

La empresa cuenta con seis vehículos tipo furgón para realizar las entregas, cada furgón con una capacidad de una tonelada y dos rutas programadas en distintos días de la semana para cubrir con la demanda de la población de estudio conformada por un total de 395 clientes (puntos de entrega) los mismos que son visitados 3 veces por semana, esa información se obtuvo mediante el análisis de datos históricos comprendidos en 4 semanas en el periodo de noviembre a diciembre del 2025. Se analizó el total de clientes visitados para la entrega del producto por día en donde se verificó que el volumen de clientes es variable. El ruteo se desarrolló por cada día de la semana, es por ello que, no hubo la necesidad de establecer una población de muestra, se trabajó con todos los clientes para determinar la ruta óptima.

La investigación se delimitó a la planta norte de la empresa, ubicada en la provincia del Carchi, las entregas se realizan en su mayoría en vías de un alto nivel de flujo vehicular. En el presente estudio se identificaron algunos desafíos logísticos como el mantenimiento de la cadena de frío y el cumplimiento de los plazos establecidos. Adicional, se identificó el inicio y fin mediante un diagrama de flujo de la etapa final del proceso logístico.

Como herramienta de análisis se empleó el software Excel de Microsoft principalmente para la preparación de datos, además de determinar comportamientos en la demanda y organizar coordenadas de destino. Mientras que para el diseño del nuevo modelo de gestión del transporte se usó el lenguaje de programación Python ejecutado *Google Colab* importando librerías para la manipulación de datos (*Pandas*), *geodesic* de *Geopy* para calcular distancias geográficas entre los puntos de entrega y sobre todo *Google OR-Tools* para modelar y resolver el problema de ruteo, además se consideró las ventanas de tiempo (10, 7 o 6 min por cliente), número de vehículos usados, ubicación geográfica (latitud y longitud) y velocidad de los vehículos (70 km/h).

En ese contexto, el enfoque metodológico para la presente investigación integró fundamentos teóricos logísticos junto con herramientas tecnológicas para el diseño de un modelo de ruteo. La combinación abordó de manera estructurada los problemas relacionados con la distribución de alimentos perecederos. La implementación de un VRP facilita la optimización de las rutas de distribución y se orienta hacia la mejora continua de la cadena de suministro, con el fin de garantizar entregas oportunas manteniendo la calidad de producto.

RESULTADOS

Planificación y control de transporte

La empresa de estudio se dedica a la producción y comercialización de productos lácteos y cuenta con un proceso logístico estructurado. Para el proceso de distribución se hace uso de 3 vehículos tipo furgón, el primero distribuye a 96 clientes, el segundo a 149 y el tercero a 151 clientes distribuidos en las ciudades de Tulcán, San Gabriel y sus alrededores, dichos vehículos no siempre operan con capacidad completa ya que su asignación depende de la demanda del producto y políticas internas de la empresa. Sin embargo, se visita obligatoriamente a cada cliente tres veces a la semana.

En la Figura 3 se puede visualizar el diagrama de flujo de la empresa de estudio, perteneciente al último eslabón de la cadena de suministro. El proceso inicia en la fase de Envasado, la leche es sometida a un riguroso control de cumplimiento de la Norma INEN este aspecto asegura que el producto sea apto para consumo humano, si se aprueba pasa a la fase de Almacenamiento en donde se clasifica los productos recibidos por tipo y presentación posteriormente se gestionan bajo el método FIFO (*First In, First Out*) que consiste en distribuir primero los productos que fueron recibidos antes y después los que llegaron más tarde.

Luego de la organización inicia la etapa del transporte, primero se debe verificar si el vehículo se encuentra en buen estado de no ser el caso se activa el protocolo de Mantenimiento para reparación y limpieza, si el vehículo es apto para la ruta se carga los productos a ser distribuidos ese día. El flujograma finaliza su ciclo con la conformidad del cliente, si la cantidad y producto son correctos los usuarios aceptan su recepción caso contrario se notifica el problema.

En cuanto a la mercancía, la empresa comercializa alrededor de 50 productos entre ellos: leche, queso y yogurt. La distribución de los mismos se realiza en jabs, las cuales tienen dimensiones estándar de 60x40x25 cm (largo, ancho, alto) y cada una suele contener aproximadamente entre 12 y 18 unidades de artículos en sus diferentes presentaciones, siendo el producto leche entera de un litro con mayor demanda en el mercado.

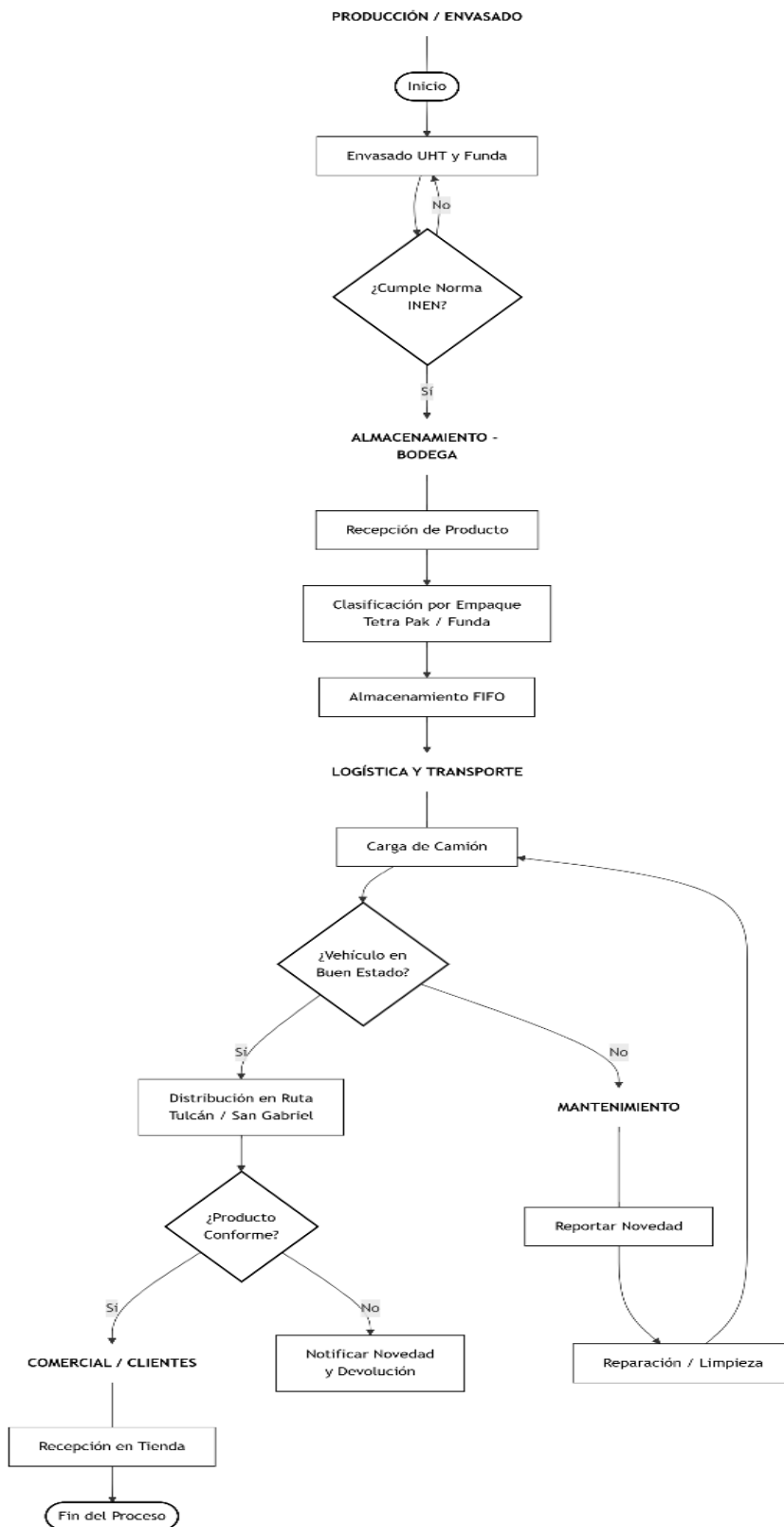


Figura 3. Flujograma proceso de distribución.

Demanda

Se determinó estadísticamente que la empresa láctea posee una demanda de tipo probabilística. En la Figura 4 se muestra la evolución mensual de la demanda en el periodo de un año en donde, los picos más altos se alcanzan en los meses de enero y mayo, mientras que en el mes de febrero se observa una caída crítica del 14.3% seguida de una recuperación robusta del 16.7%, en el último trimestre la demanda mantiene un nivel estable sugiriendo la existencia de patrones estacionales.

Las variaciones presentadas impactan directamente en la cantidad de vehículos a utilizar, las restricciones de tiempo y sobre todo la asignación de clientes por ruta. Por lo tanto, comprender las fluctuaciones y patrones en la demanda y su incidencia en la planificación logística es estratégica, por cuanto se permite diseñar rutas más eficientes, flexibles y alineadas a las necesidades de la empresa.

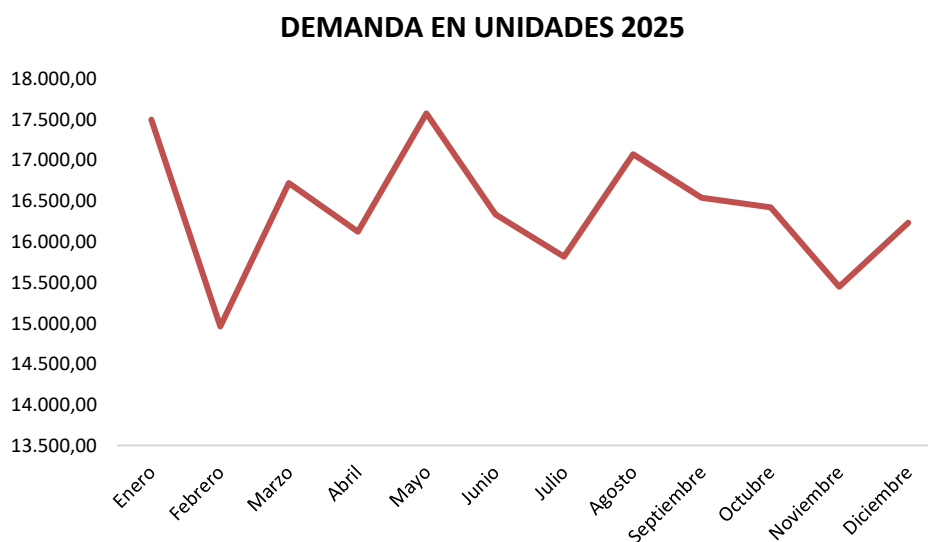


Figura 4. Demanda en unidades año 2025.

Programación semanal de las rutas

La red de distribución inicia y termina en el centro de despacho principal, ubicado en las calles Maldonado y Pichincha en la ciudad de Tulcán. Con el objetivo de garantizar el cumplimiento de las frecuencias, la empresa ha segmentado su cartera de clientes en seis grupos, esta estructura asegura que cada punto reciba las tres visitas obligatorias a la semana programadas dentro del proceso logístico. En la Tabla 1 se detallan la asignación semanal que tienen los vehículos de la empresa, la denominación, número de clientes por ruta y días de operación.

Tabla 1. Programación semanal de vehículos.

Vehículo	Denominación	Ruta	Días de operación	Número de clientes
Furgón 1	C1	Ruta A	lunes-miércoles-viernes	46
Furgón 1	C1	Ruta B	martes-jueves-sábado	48
Furgón 2	C2	Ruta C	lunes-miércoles-viernes	75
Furgón 2	C2	Ruta D	martes-jueves-sábado	75
Furgón 3	C3	Ruta E	lunes-miércoles-viernes	76
Furgón 3	C3	Ruta F	martes-jueves-sábado	75

Los mapas a visualizar a continuación fueron generados en Python (Google Colab) utilizando librerías propias del lenguaje, lo que permitió la representación geoespacial y la conexión entre los diferentes puntos analizados. De igual manera, se calculó la distancia total recorrida (km) y el tiempo total estimado de desplazamiento.

Ruta A

Es la ruta con menor cantidad de puntos de entrega (46) y mayor duración de tiempo de parada (10 minutos), todos los clientes se encuentran en la ciudad de Tulcán y están distribuidos geográficamente próximos entre sí (Figura 5), al “Depósito” que es el punto de inicio y fin en todas las rutas se lo ha caracterizado de color rojo, los clientes están representados de color azul y al recorrido realizado por el vehículo se indica a través de líneas verdes punteadas.



Figura 5. Ruta A.

Como se puede observar la ruta no sigue un trayendo claro y continuo, las líneas que conectan a los diferentes puntos de entrega se cruzan repetidamente causando recorridos redundantes e innecesarios.

Ruta B

Los clientes en esta ruta están distribuidos en las ciudades de Tulcán y San Gabriel (Figura 6). Los puntos de entrega con una duración de 7 minutos en parada, están representados por el color naranja y al recorrido realizado por el vehículo se indica a través de líneas punteadas color gris.

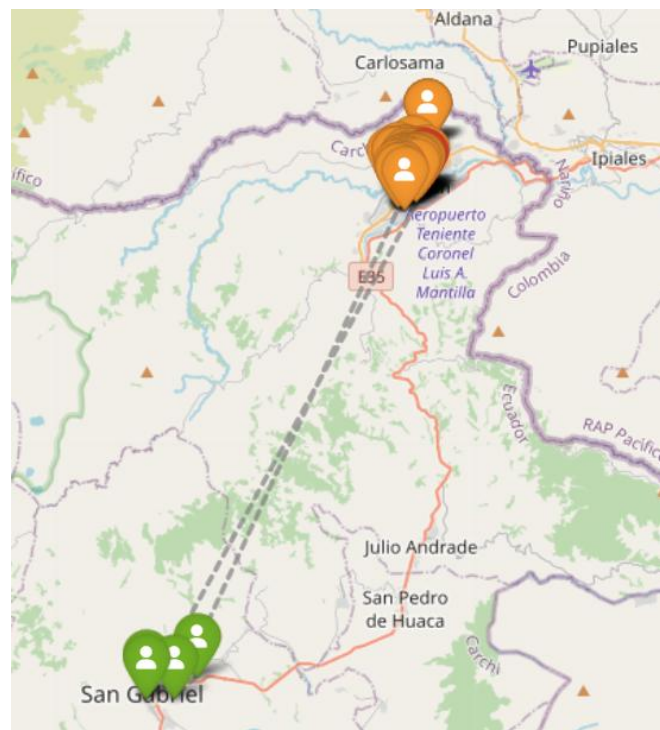


Figura 6. Ruta B Tulcán- San Gabriel.

Por la evidente dispersión geográfica de los puntos de entrega, a continuación, en las en la Figuras 7 se presenta una imagen a mayor escala para una mejor visualización de los clientes de Tulcán y San Gabriel, esto permitió evaluar si la distribución sigue o no un orden lógico en el transporte.

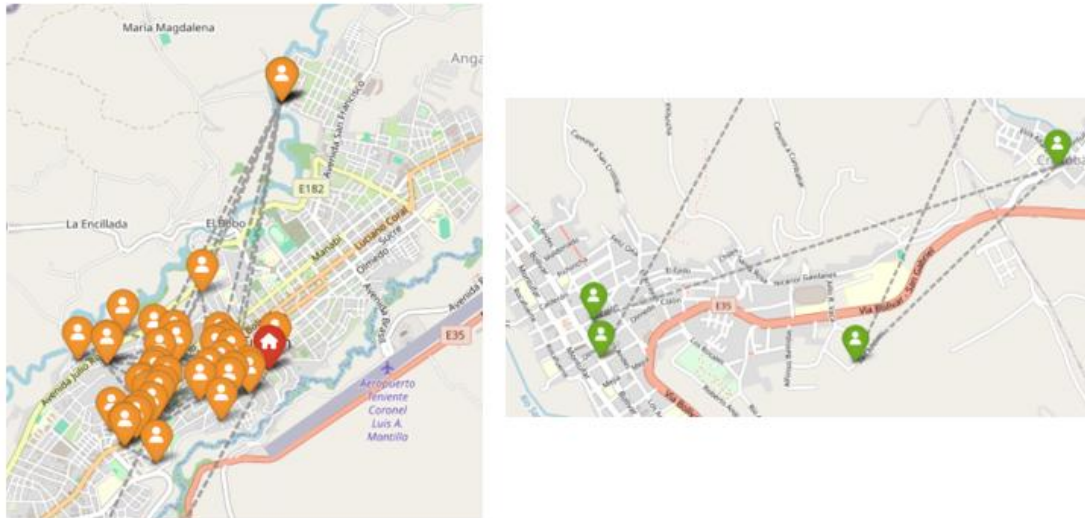


Figura 7. Gran escala de Tulcán y San Gabriel Ruta B.

En la zona Tulcán se aprecia un desorden logístico de ruta, en donde varios puntos de entrega se cruzan entre sí, de igual manera los clientes de San Gabriel no presentan una secuencia ordenada ilustrando un recorrido es ineficiente.

Ruta C

Es la primera ruta que realiza en Furgón 2, sus clientes están distribuidos en la zona Tulcán geográficamente dispersos entre sí, es decir, abarcan una mayor parte del territorio a diferencia de la Ruta A, los clientes están representados con el color verde y el trayecto realizado por líneas punteadas color negro (Figura 8). A partir de esta ruta los tiempos de parada en cada cliente son de 6 minutos debido a la cantidad de clientes.

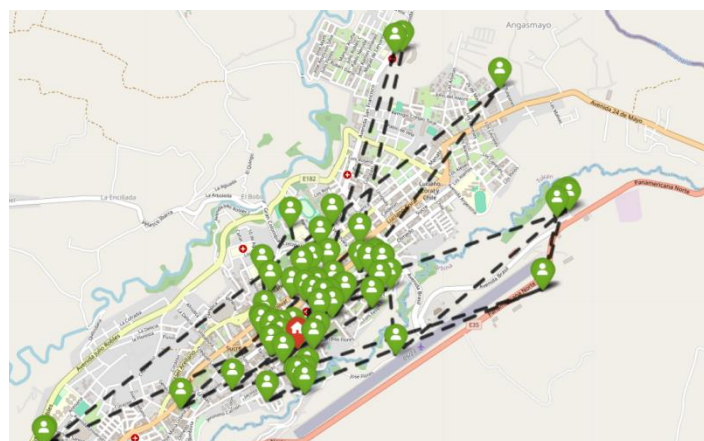


Figura 8. Ruta C.

De igual manera la distribución no presenta una estructura de planificación logística, no se aprovecha la cercanía de los puntos de entrega para una red lógica de conexiones evitando que el vehículo transite repetidamente por algunos sectores causando tiempos de desplazamientos ineficientes.

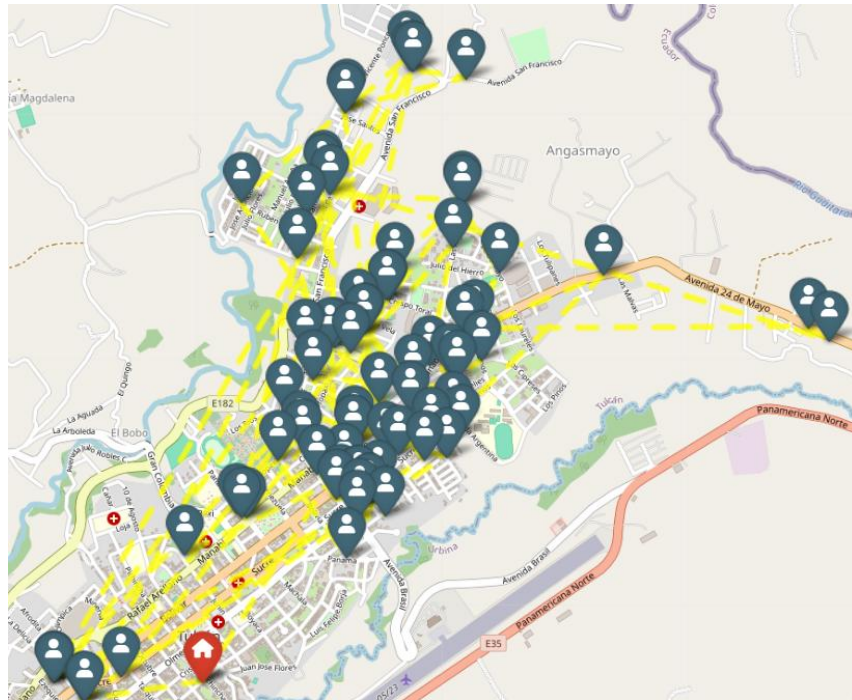


Figura 10. Ruta E.

Es evidente la deficiente organización logística en la ruta, el vehículo realiza trayectos repetidos, cruzando por áreas que ya han sido atendidas.

Ruta F

La última ruta que realiza la empresa con 75 clientes y dentro de ellos ubicaciones geográficas en periferias, los clientes se han representado con el color azul oscuro y las líneas entrecortadas moradas representan al trayecto del vehículo (Figura 11).

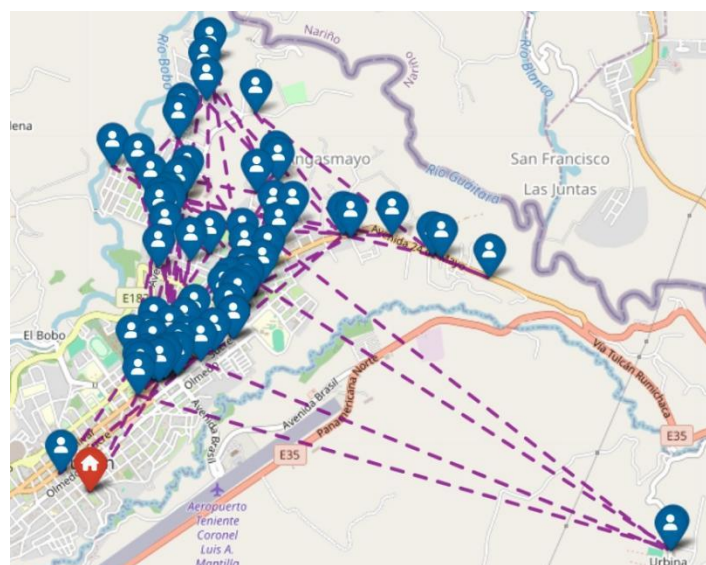


Figura 11. Ruta F.

Las diversas conexiones en los puntos de entrega indican desorganización en la secuencia de los puntos de parada indicando una inadecuada distribución logística que tienden a incidir en distancia y tiempo de recorrido.

En todas las rutas es evidente la desorganización logística y la falta de un patrón lógico para realizar las entregas sin necesidad de trayectos redundantes que aumentan el tiempo de distribución. El análisis destacó que la mayor parte de tiempo operativo se dedica a las paradas, es decir, el tiempo que deben dedicar los operarios en entregar el producto, esto involucra la descarga de los productos requeridos por el cliente, la verificación de calidad y confirmación de artículos en cantidad y presentación.

En ese contexto, resulta pertinente proponer un modelo de optimización para las diferentes rutas que maneja la empresa de estudio, con una secuencia lógica en los puntos de parada se podrían reducir los tiempos de desplazamiento, así como los costos asociados al transporte. Este enfoque da paso a una distribución consistente para los vehículos asegurando la satisfacción del cliente.

Propuesta de modelo para optimización de rutas

Se entiende por optimización de rutas al proceso de planificar y gestionar los recorridos de transporte de manera que se reduzcan los costos y el plazo de entrega, al tiempo que se maximiza la eficiencia operativa (8)

De acuerdo con el mapeo sistemático de literatura, la mejor opción para abordar los problemas de las rutas es la implementación de modelos matemáticos junto con herramientas tecnológicas, el VRP (*Vehicle Routing Problem*) es comúnmente utilizado para problemas de optimización que buscan determinar la ruta más eficiente, manteniendo una cobertura completa de todos los puntos de entrega. Las características que usa este algoritmo para su funcionamiento son: número de vehículos, demanda, restricciones de capacidad y ventanas de tiempo (9).

El modelo se diseñó utilizando el algoritmo de búsqueda guiada OR-Tools, es una metaheurística empleada para resolución de complejos problemas de optimización, encuentra soluciones óptimas garantizando una solución rápida, exacta y adaptada a las necesidades de la empresa.

Las fuentes de entrada son las ubicaciones geográficas, a través de ellas el algoritmo calcula la ruta óptima que minimice la distancia total, el proceso genera una matriz de caminos entre todos los puntos calculando el tiempo estimado en paradas y en distribución, como restricciones se tuvo a las ventanas de tiempo asignadas por la empresa en cada ruta, así como la velocidad a la que circulan los vehículos, A continuación, se describe la solución encontrada para cada una de las 6 rutas que maneja la empresa y una comparación con la ruta actual.

Optimización de rutas

Las rutas actuales presentan deficiencias logísticas especialmente trayectos repetitivos, tras aplicar el VRP las rutas han sido modificadas para que sigan un patrón lógico que minimice los cruces innecesarios, optimice el tiempo de conducción y garantice una distribución eficiente. Las siguientes imágenes presentan una mejora significativa en las rutas de una manera ordenada,

para su caracterización se ha mantenido los mismos colores usados en el análisis de la ruta actual a excepción de las líneas punteadas que ahora se representa como una línea continua.

Ruta A

En la Figura 12 se muestra la Ruta A optimizada que indica una mejora en la secuencia de puntos de entrega, sin trayectos repetitivos, aprovechando los clientes cercanos y mejorando los tiempos de distribución.

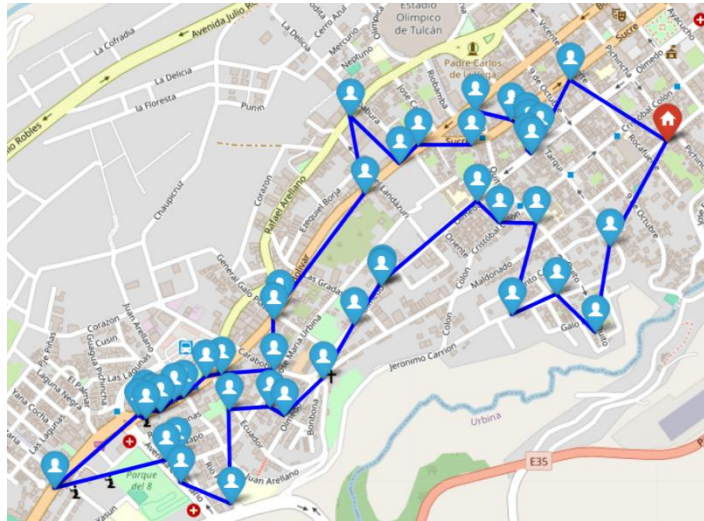


Figura 12. Ruta A optimizada.

Ruta B

Con el algoritmo inteligente se encontró una ruta eficiente, se visita a algunos clientes de Tulcán en especial los ubicados en el sur y, desde allí avanza a la ciudad de San Gabriel en donde visita los puntos de parada de manera ordenada. Finalmente, el recorrido regresa a Tulcán para continuar visitando los clientes restantes (Figura 13).

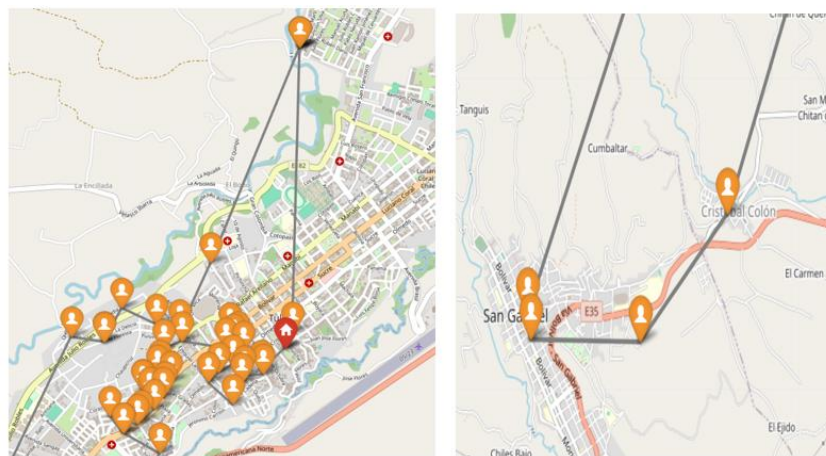


Figura 13. Ruta B optimizada.

Ruta C

Es una de las rutas con mayor cantidad de puntos de parada en la Figura 15 se puede observar una línea continua que atraviesa la zona de Tulcán de norte a sur de manera ordenada (Figura 14).

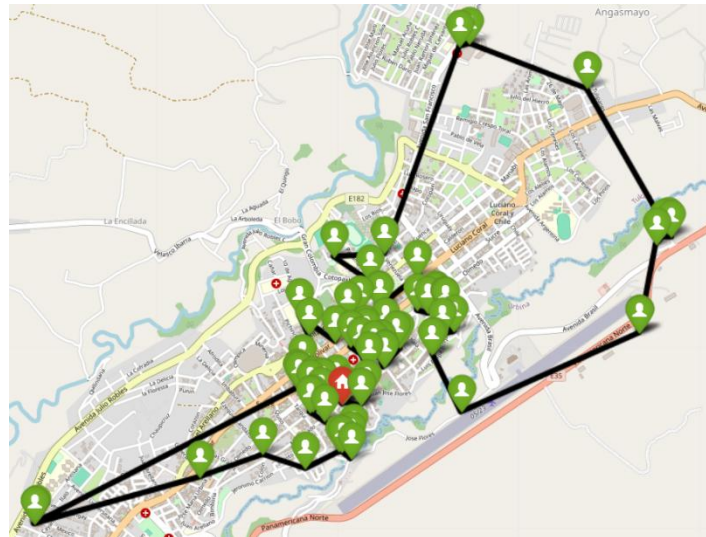


Figura 14. Ruta C optimizada.

Ruta D

En la Figura 15 se muestra la optimización del segundo recorrido que realiza en furgón 2, como se puede observar el algoritmo generó una secuencia ordenada incluso en puntos de parada alejados de la zona siguiendo un patrón que permita conectar sus clientes más cercanos.

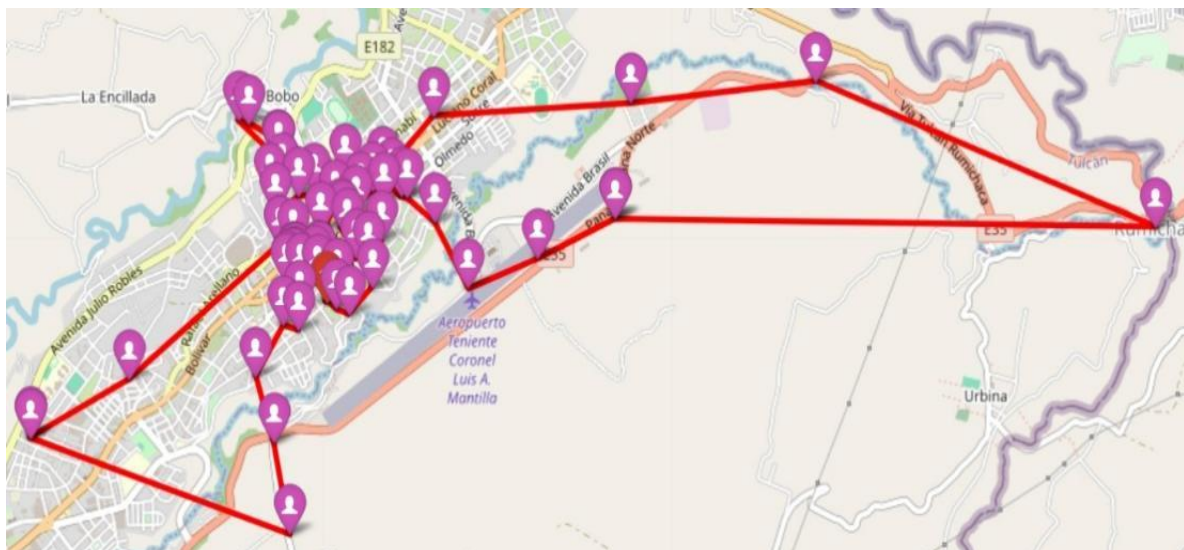


Figura 15. Ruta D optimizada.

Ruta E

La búsqueda guiada del algoritmo encontró una ruta que no genera desplazamientos innecesarios que atraviesen más de una vez un sector determinado como se representa en la Figura 16.

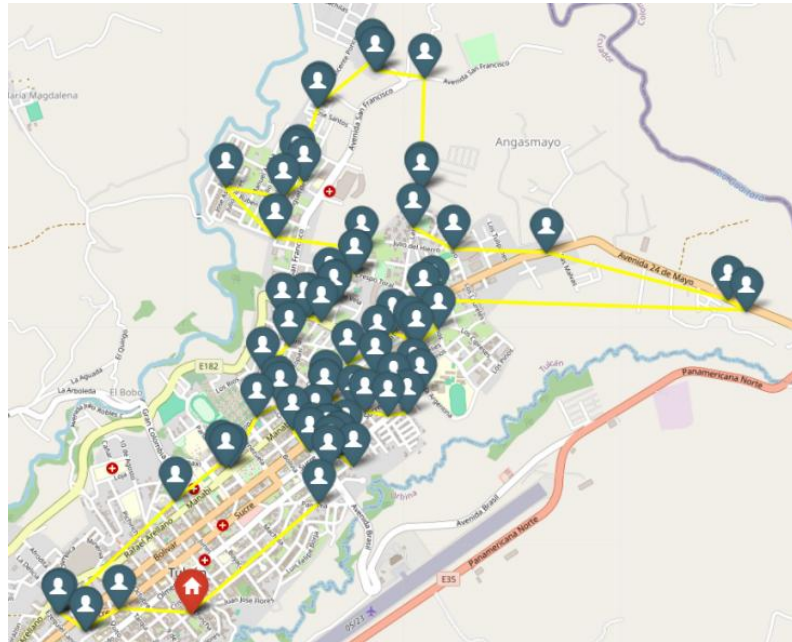


Figura 16. Ruta E optimizada.

Ruta F

La última ruta optimizada, el recorrido presenta un solo viaje a la zona periférica y retorna nuevamente a los demás clientes de la ciudad generando una conexión lógica entre puntos de parada (Figura 17).

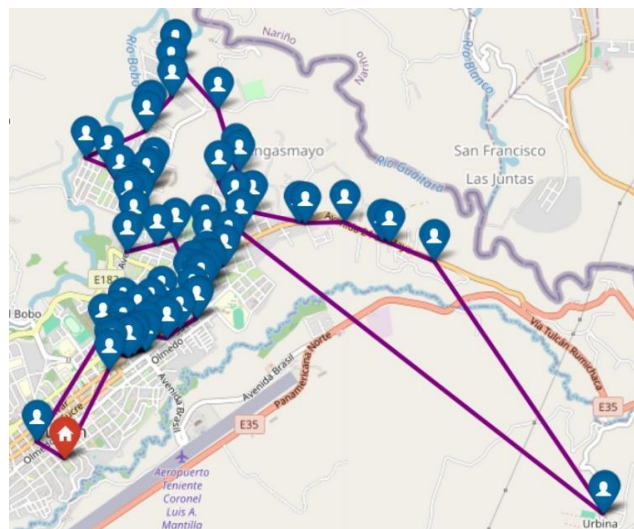


Figura 17. Ruta F optimizada.

Todas las imágenes presentan una secuencia ordenada que conecta a los clientes cercanos y agrupa las zonas de una manera eficiente, este orden genera un trayecto eficiente y continuo. En la Tabla 8 se presenta una comparación de los tiempos calculados tanto en la situación actual como en la optimización de cada ruta.

Tabla 2. Comparación de tiempos actual VS optimizado.

Ruta	Actual	Optimización	Mejora
	Dist. total: 22.67km	Dist. total: 5.27 km	Dist. en km: 76.7%
Ruta	T. neto conducc: 22 min	T. neto conducc: 4 min	T. total en ruta: 3.74%
A	T. en paradas: 7h 40 min	T. en paradas: 7h 40 min	
	T. total en ruta: 8h 2 min	T. total en ruta: 7h 44 min	
	Dist. total: 96.53km	Dist. total: 62.18km	Dist. en km: 35.58%
Ruta	T. neto conducc: 1h 22 min	T. neto conducc: 53 min	T. total en ruta: 7.41%
B	T. en paradas: 5h 22 min	T. en paradas: 5h 22 min	
	T. total en ruta: 6h 45 min	T. total en ruta: 6h 15 min	
	Dist. total: 40.47km	Dist. total: 15.81km	Dist. en km: 60.9%
Ruta	T. neto conducc: 35 min	T. neto conducc: 35 min	T. total en ruta: 4.3%
C	T. en paradas: 7h 30 min	T. en paradas: 7h 30 min	
	T. total en ruta: 8h 5 min	T. total en ruta: 7h 44 min	
	Dist. total: 71.47km	Dist. total: 22.16km	Dist. en km: 60.9%
Ruta	T. neto conducc: 1h 2 min	T. neto conducc: 18 min	T. total en ruta: 4.3%
D	T. en paradas: 6h 48 min	T. en paradas: 6h 48 min	
	T. total en ruta: 7h 49 min	T. total en ruta: 7h 2 min	
	Dist. total: 65.57km	Dist. total: 15.19km	Dist. en km: 76.8%
Ruta	T. neto conducc: 56 min	T. neto conducc: 13 min	T. total en ruta: 8.4%
E	T. en paradas: 7h 36 min	T. en paradas: 6h 48 min	
	T. total en ruta: 8h 32 min	T. total en ruta: 7h 49 min	
Ruta	Dist. total: 88.69km	Dist. total: 19.5km	Dist. en km: 77.9%

F	T. neto conducc: 1h 16 min	T. neto conducc: 16 min	T. total en ruta: 11.4%
	T. en paradas: 7h 30 min	T. en paradas: 6h 48 min	
	T. total en ruta: 8h 46 min	T. total en ruta: 7h 46 min	

Los tiempos mostrados en la tabla demuestran una notable reducción en kilómetros recorridos y el tiempo total que lleva completar cada una de las rutas, obteniendo porcentajes de hasta 76% en mejora, destacando una distribución eficiente y una planificación logística adecuada. Las rutas A, E y F son las que presentaron mayor reducción en distancia con un porcentaje cercano al 78%, mientras que la Ruta F, considerada la más larga minimizó en 11.4% el tiempo total que lleva completar la ruta. Además, cabe destacar que con el algoritmo de optimización ninguna ruta supera las 8 horas en trayecto, a pesar de los diferentes escenarios todas las rutas se mantienen en el rango de las 8 horas a diferencia de la situación actual sin comprometer la calidad del servicio.

DISCUSIÓN

Los hallazgos del presente estudio concuerdan con investigaciones previas (10) (11), en donde se menciona que el área comercial de alimentos perecederos tiende a ser más estricta y rigurosa en cuanto a implementar medidas para manipulación, almacenamiento y distribución ya que dichos factores influyen directamente con la calidad y frescura del producto. En ese sentido, las normativas técnicas son imprescindibles para garantizar que los alimentos mantengas sus condiciones aptas y normales durante toda la cadena de suministro.

Por lo tanto, una gestión logística eficiente contribuye a minimizar el desperdicio de alimentos y las pérdidas económicas, mejorando la trazabilidad y el control del proceso de distribución de los mismos. De igual manera se ha evidenciado que la planificación de rutas de esos artículos tiende a ser un desafío logístico ya que encontrar trayectos óptimos y contar con una flota adecuada es clave para optimizar recursos y agilizar los tiempos de entrega (12).

Los modelos matemáticos de optimización han surgido como respuesta a esos desafíos logísticos especialmente en entornos caracterizados por la variabilidad entre oferta-demanda y por la producción de bienes para su posterior distribución (13) (14). Tal es el caso de, (15) que al implementar un modelo matemático con el propósito de mejorar sus rutas lograron disminuir en un 53% los costos operativos, reducir el número de flota pasando de 24 a solo 13 unidades con la misma capacidad para cubrir la demanda. Ese resultado fue posible a la optimización en la planificación de las rutas de distribución y al uso de la capacidad vehicular, aprovechando de manera eficiente el espacio en vehículos.

Por su parte, (6) emplearon metaheurística orientada a minimizar los tiempos de entrega obteniendo hasta un 18.5% en tiempos totales de ruta, de igual manera que esta investigación que con un algoritmo de búsqueda basado únicamente en distancias geográficas, tiempos de parada y velocidad del vehículo, logró optimizar hasta en 77% los kilómetros recorridos y 11.4% el tiempo total de desplazamiento.

La implementación de técnicas avanzadas no solo beneficia a las grandes empresas en términos de ahorro de costos y tiempo, sino que también contribuyen al medio ambiente al reducir significativamente la huella de carbono asociadas a las operaciones del transporte. Por otro lado, una de las mayores limitaciones para este estudio fue que no se consideraron aspectos externos como el tráfico vehicular y condiciones climáticas que son altamente variables y pueden influir directamente en el tiempo de ruta, la propuesta del modelo asumió trayectos sin interrupciones lo que podría incidir en los resultados en situaciones prácticas. Sin embargo, el algoritmo al busca la ruta más corta y dichos factores adicionales solo incrementarían el tiempo en trayecto mas no generarían una alternación en el orden de los puntos de parada.

El modelo propuesto puede ser adaptado a empresas con situaciones logísticas similares, este estudio genera una base teórica y práctica para que futuras investigaciones integren variables independientes al modelo de optimización y simular entonos realistas.

CONCLUSIONES

La implementación de la metaheurística de búsqueda mediante OR-Tools permitió reducir el recorrido en 69.19 kilómetros por trayecto en comparación con las rutas actuales, lo que representa un impacto positivo en la gestión del transporte, esta mejora contribuye a una disminución en costos operativos, aunque se requiere de un análisis más exhaustivo y mayor cantidad de datos históricos para determinar el costo ahorrado y porcentaje correspondiente frente a la situación actual.

El algoritmo de optimización demostró una disminución significativa en las horas de desplazamiento logrando un 11% en el tiempo que toma completar la ruta, lo que equivale a dos horas y media de reducción al tiempo total en rutas específicas, ofreciendo mayor sostenibilidad para la empresa al disminuir la emisión de gases sin comprometer la satisfacción al cliente.

Este trabajo se presenta como una solución a un problema de enrutamiento de vehículos en un contexto real, transporte de alimentos perecederos, una propuesta que integra modelos matemáticos junto con herramientas tecnológicas que toman en cuenta ventanas de tiempo, velocidad del vehículos y número de clientes para lograr una solución sólida y eficiente para la toma de decisiones en el último eslabón de la cadena de suministro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Nagaraj PAB, Madhavan B, Suthakorn J, Bradha M. Intelligent ecofriendly transport management system based on IoT in urban areas. *Environment Development and Sustainability*. 2022.
2. Food F. Financial Food. [Online].; 2023. Available from: <https://financialefood.es/el-30-de-los-alimentos-perecederos-se-desperdician-por-fallos-logisticos-en-la-cadena-de-distribucion/>.
3. Caspa N. Historia de las carreteras del Ecuador, 1930-1960: Infraestructura y políticas de transportes. *Revista Uruguaya De Historia Económica*. 2023; 22(XXII): p. 10-32.

4. Shankar L. AI enabled applications towards intelligent transportation. *Transportation Engineering*. 2021; 5: p. 100083.
5. Drosouli I, AV, pm, 2 gm1ag. Tmd-bert: A Transformer-Based Model for Transportation Mode Detection. *Electronics*. 2023; 12(3): p. 581.
6. Fahimeh S, Aliyeh K, Ahmad J, Zeinab S, Hannan A. A robust multi-objective optimization model for inventory and production management with environmental and social consideration: A real case of dairy industry. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 294(20).
7. Carrizo D, Moller C. Estructuras metodológicas de revisiones sistemáticas de literatura en Ingeniería de Software: un estudio de mapeo sistemático. *Revista chilena de ingeniería*. 2020; 26(1).
8. Ortiz A, Rocha L. Optimización de rutas en bases de datos espaciales para solución de problemas logísticos de transporte. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*. 2023;(E57): p. 299-310.
9. Monzón A. Repositorio Universidad de La Habana [Tesis de Diplomado]. [Online].; 2023. Available from: https://accesoabierto.uh.cu/files/original/2177065/Extension_de_un_sistema_de_validacion_automatica_para_modelos_de_VRP.pdf.
10. Arcos C, Mosquera S, Villada d. Evaluación de rutas para el transporte de productos perecederos en el sector rural. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 2020; 6(2): p. 40-46.
11. Mera P, Mera R, Mera V, Curay S, Melo A. Gestión De Calidad En El Transporte De Productos Agropecuarios Tungurahua, 2023. *Revista Científica Internacional Arandu*. 2024; 11(2).
12. Cachimuel D, Monar R, Velasquez VGP. Proceso de diseño y planificación de rutas de transporte para mejorar los tiempos de entrega. *Casadelpo*. 2022; 7(4): p. 13-30.
13. Flores C, Flores K. Modelo de transporte aplicado a una empresa distribuidora de cemento. Caso de estudio en Ecuador. *FAREM-Estelí*. 2021;(40): p. 81-95.
14. Zhu C, Müller H. Autoregressive optimal transport models. *Statistical Society Series B: Statistical Methodology*. 2023; 85(3): p. 1012-1033.
15. Zapata J, Vélez Á, Arango M. Mejora del proceso de distribución en una empresa de transporte. *Investigación administrativa*. 2020; 49(126): p. 1-17.
16. Su H, Wu L, Hua K. The future of the food supply chain: A systematic literature review and research directions towards sustainability, resilience, and technology adoption. *Digital Economy*. 2023; 2: p. 303-316.
17. Abbasian M, Sazvar Z. A hybrid optimization method to design a sustainable resilient supply chain in a perishable food industry. *Environ Sci Pollut Res*. 2023;(30): p. 6080-6103.
18. Acevedo J, Soto M, Sana S. An optimization model for routing—location of vehicles with time windows and cross-docking structures in a sustainable supply chain of perishable foods. *Springer Nature Link*. 2023; 16: p. 1742-1765.
19. Ali I, Nagalingam S, Gurd B. A resilience model for cold chain logistics of perishable products. *The International Journal of Logistics Management*. 2019; 29(3): p. 922-941.
20. Alzate P, Moyano G, Slater J, Isaza G, Toro E, Jaramillo J. Scientific mapping and research perspectives of the vehicle routing problem: An approach from sustainability strategies. *Sustainable Futures*. 2024; 8: p. 100390.

21. Cui S, Gu X, Xie W, Wu D. Research on Cold Chain Routing Optimization of Multi-distribution Center Considering Traffic Performance Index. *Procedia Computer Science*. 2023; 221: p. 1343-1350.
22. Gillespie J, Pacheco T, Cama X, Cadden T, Condell J. Real-Time Anomaly Detection in Cold Chain Transportation Using IoT Technology. *Sustainability*. 2023; 15(3): p. 2255.
23. Guaño CSW, Pérez C, Roa H. Multi-objective optimization for perishable product dispatch in a FEFO system for a food bank single warehouse. *Operations Research Perspectives*. 2024; 12: p. 100304.
24. Hongham B, Yu M, Yang T, Murcio R. Optimization of intermodal transportation routes for perishable goods considering customer satisfaction. *Research in Transportation Business & Management*. 2024; 59.
25. Karmakar J, Chakraborty S, Khayer N, Foysal M, Rajwana M. Designing an Energy-Efficient Transportation Network to Transport Perishable Crops: An Aggregated VRP and X-means Clustering Approach. *Heliyon*. 2023; 9(9).
26. Keizer Md, Haijema R, Bloemhof J, Vorst Jvd. Hybrid optimization and simulation to design a logistics network for distributing perishable products. *Computers & Industrial Engineering*. 2019; 88: p. 26-38.
27. Kumar A, Yadav S, Ambar A, Pandey S. A genetic algorithm model for optimizing vehicle routing problems with perishable products under time-window and quality requirements. *Decision Analytics Journal*. 2022; 5: p. 100139.
28. Lam H, Tang V. Digital transformation for cold chain management in freight forwarding industry. *International Journal of Engineering Business Management*. 2023; 15.
29. Liang X, Wang N, Zhang M, Jiang B. Bi-objective multi-period vehicle routing for perishable goods delivery considering customer satisfaction. *Expert Systems with Applications*. 2023; 220: p. 119712.
30. Madushan F, Thibbotuwawa A, Perera N, Nielsen P, Kenan D. An integrated vehicle routing model to optimize agricultural products distribution in retail chains. *Cleaner Logistics and Supply Chain*. 2024; 10.
31. Meherishi L, Narayana S, K.S.Ranjani. Sustainable packaging for supply chain management in the circular economy. *Cleaner Production*. 2019; 237: p. 117582.
32. Miao X, Pan S, Chen L. Optimization of perishable agricultural products logistics distribution path based on IACO-time window constraint. *Intelligent Systems with Applications*. 2023; 20: p. 200282.
33. Qi C, Hu L. Optimización del problema de enrutamiento de vehículos para la logística de emergencia de la cadena de frío basada en una pérdida mínima. *Physical Communication*. 2020; 40: p. 101085.
34. Raja K, Muhammad S, Muhammad B. Supply chain sustainability and risk management in food cold chains. *Modern Supply Chain Research and Applications*. 2024; 6(2): p. 193-221.
35. Ramírez C, Rojas A, García A. A cold chain logistics with IoT and Blockchain scalable project for SMEs: first phase. *IFAC-PapersOnLine*. 2022; 55(10): p. 2336-2341.
36. Ren X, JT, Qiao Q, LW, Ren L, Meng L. Demand forecast and influential factors of cold chain logistics based on a grey model. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2022; 19(8): p. 7669-7686.

37. Saeed N, Hoff A, Larsen O. Analysis of hinterland transport strategies when exporting perishable products. *Research in Transportation Business & Management*. 2022; 43: p. 100766.
38. Shi H, QZ, Qin J. Cold Chain Logistics and Joint Distribution: A Review of Fresh Logistics Modes. *MDPI Systems*. 2024; 12(7): p. 264.
39. Oladime D, Gupta K, Kose NA, Gundogan K, Ge L, Liang F. Smart Transportation: An Overview of Technologies and Applications. *Sensors*. 2023; 23: p. 3880.
40. Zakaryaei R, Javadian N, Mehdi M. Optimization and incorporating of green traffic for dynamic vehicle routing problem with perishable products. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021; 28: p. 36415–36433.
41. Babae E, Serhan N. Integrated design of sustainable supply chain and transportation network using a fuzzy bi-level decision support system for perishable products. *Expert Systems With Applications*. 2022; 195: p. 116628.
42. Suryawanshi P, Pankaj D. Distribution planning problem of a supply chain of perishable products under disruptions and demand stochasticity. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2021; 72(1): p. 246-278.
43. Pan L, Shan M, Li L. Optimizing Perishable Product Supply Chain Network Using Hybrid Metaheuristic Algorithms. *MDPI Sustainability*. 2023; 15: p. 10711.
44. Li L, Li S, Weimin Li- FZ. Freshness-driven vehicle routing problem: modeling and application to the fresh agricultural product pick-storage-transportation. *Journal of Industrial and Management Optimization*. 2023; 19: p. 6218-6243.
45. Qiuyung T, Hongyan S, Hengwei G, Ping W. Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for AGV Path Planning. *IEEE Access*. 2021; 9: p. 33522-33532.