

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

“Optimización del cronograma de abastecimiento semanal para una cadena de
restaurantes en Guayaquil”

MATE-224

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Nombre de la titulación

Ingeniero en Logística y Transporte

Presentado por:

Nombres y Apellidos

Priscilla Elena Herrera González

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mis padres, gracias a su esfuerzo y constante apoyo, me han permitido alcanzar este logro. A mis hermanos que me esperaron con paciencia y una sonrisa todos los días. Les dedico este trabajo como constancia de que la dedicación y la responsabilidad brinda sus frutos.

A mi tía y mi abuelo por su cariño y preocupación expresados siempre, aquello que me han impulsado a avanzar en este camino. A toda mi familia, porque cada palabra o mensaje de aliento me han inspirado para lograr esta meta.

Finalmente, dedico mi esfuerzo y empeño plasmado en este trabajo, al más importante, a quién hace todo posible, a Dios, todo el poder y la gloria por siempre a Él.

Agradecimientos

A Dios , en primer lugar, por darme salud, sabiduría y fuerza a lo largo de este etapa estudiantil.

A mis padres, por su apoyo infinito, sus palabras de confianza y cariño me han guiado todos estos años. Gracias a mi mamá, por siempre estar para escucharme y brindarme consejos en los momentos alegres y tristes, aquellos que me han servido como direccionamiento e impulso para continuar. A mi papá por su acompañamiento, paciencia, y por enseñarme que la perseverancia es fundamental en este camino.

A mi familia, por mostrarme su amor y recordarme cada día que el equipo gana.

A todos los amigos y compañeros que tuve el honor de conocer en la universidad, con los que he compartido clases, conocimientos y risas, gracias por ofrecerme su compañía y permitirme disfrutar esta etapa con ustedes.

A mis profesores, por sus enseñanzas académicas y profesionales, gracias por atender mis dudas, alimentar mis ganas de investigar, inspirarme e impulsarme a confiar en mis ideas y propuestas.

Declaración Expresa


Yo Priscilla Elena Herrera González acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 17 de octubre del 2025.



Priscilla Elena Herrera

González

Evaluadores

Mgtr. David De Santis

Profesor de Materia

PhD. Carlos Anibal Suárez

Tutor de proyecto

Resumen

El presente estudio aborda el problema de distribución de una cadena de restaurantes en la ciudad de Guayaquil. Debido a la presencia de productos refrigerados perecibles, se requiere planificar las visitas a los locales para el abastecimiento de estas referencias respetando las restricciones operativas para mantener la cadena de frío. El objetivo es calendarizar y optimizar rutas de distribución, estableciendo nuevas frecuencias de entrega por local, mejorando la eficiencia frente al cronograma de abastecimiento actual. La metodología se implementó mediante una heurística constructiva que se divide en dos fases: asignación de clientes a días de visita y el ruteo por día para una flota heterogénea. Se realizaron experimentos computacionales variando parámetros como: cantidad de clústeres y número máximo de clientes. Las soluciones fueron analizadas con criterios de selección que representan el contexto real operativo de la empresa para la elección del escenario idóneo a comparar con la situación actual. La propuesta escogida minimiza la cantidad de viajes y kilómetros recorridos por semana mientras cumple con sus respectivas restricciones. De esta manera, la metodología de planificación de entregas y rutas propuesta ofrece un enfoque replicable y escalable para empresas con procesos de distribución análogos.

Palabras Clave: Frecuencia de visita, Abastecimiento a puntos de entrega, Calendarización de clientes, Logística, Heurísticas constructivas.

Abstract

This study addresses the distribution problem of a restaurant chain in the city of Guayaquil. Due to the presence of perishable refrigerated products, replenishment visits must be scheduled in compliance with operational constraints to ensure the maintenance of the cold chain. The objective is to schedule and optimize distribution routes, establishing new delivery frequencies per location and improving efficiency compared to the current supply schedule. The methodology was implemented using a constructive heuristic divided into two phases: assigning customers to visit days and routing for a heterogeneous fleet per day. Computational experiments were conducted by varying parameters such as the number of clusters and maximum number of customers. Solutions were analyzed using selection criteria that represent the company's actual operating context to choose the ideal scenario to compare with the current situation. The selected solution minimizes the number of trips and kilometers traveled per week while meeting operational constraints. Thus, the proposed delivery and route planning methodology offers a replicable and scalable approach for companies with analogous distribution processes.

Keywords: Frequency of visits, Delivery point replenishment, Customer scheduling, Logistics, Constructive heuristics.

Índice general

Evaluadores	5
Resumen	6
<i>Abstract</i>	7
Índice general	8
Abreviaturas	10
Índice de figuras	11
Índice de tablas	12
Capítulo 1	13
1.2 Descripción del Problema	15
1.3 Justificación del Problema	19
1.4 Objetivos	20
<i>1.4.1 Objetivo general</i>	20
<i>1.4.2 Objetivos específicos</i>	21
1.5 Marco teórico	21
<i>1.5.1 Antecedentes</i>	21
<i>1.5.2 Estado del arte</i>	23
<i>1.5.3 Marco conceptual</i>	25
<i>1.5.3.1 El Problema de Ruteo de Vehículos (PVRP)</i>	25
Capítulo 2	29
2. Metodología	30
2.1 Fases del proyecto	30
2.2 Cronograma	31
2.3 Técnicas de investigación	33
2.4 Levantamiento de Información	34
2.5 Recopilación de la Información	37
2.6 Análisis de la Situación Actual	39

2.7 Modelo matemático	44
2.7.1 Asignación de frecuencia de visita por local	45
2.7.2 Modelo de ruteo periódico con ventanas de tiempo (PVRP- TW)	47
2.7.3 Heurística Periódica de Construcción-Mejora para el PVRPTW	51
2.7.3.1 Fase inicial: Asignación de clusters por día por medio de $K_medoids$	52
2.7.3.2 Construcción de la heurística de inserción más lejana con ventanas de tiempo....	53
2.7.3.3 Inserción Factible en Rutas Existentes	55
2.7.3.4 Mejora local 2-opt	56
2.7.3.5 Heurística Periódica Completa.....	57
2.8 Softwares o herramientas a utilizar	58
2.9 Consideraciones legales y éticas	61
Capítulo 3	64
3. Resultados y análisis	65
3.1 Experimentos computacionales.	65
3.2 Resultados	67
3.3 Análisis de escenarios	70
3.3.1 Escenario CL 5 – Máximo de clientes 83	71
3.3 Análisis de costos	74
3.4 Situación actual vs propuesta de mejora.	75
3.5 Comparación de la heurística propuesta vs el modelo PVRP-TW	78
Capítulo 4	79
4.1 Conclusiones y recomendaciones	80
4.1.1 Conclusiones	80
4.1.2 Recomendaciones	82

Abreviaturas

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

ODS Objetivos de Desarrollo Sostenible

PVRP Problema de Ruteo de Vehículos Periódico

PVRP-TW Problema de Ruteo de Vehículos Periódico con Ventana de Tiempo

VRP Problema de Ruteo de Vehículos Periódico con Ventana de Tiempo

Índice de figuras

<i>Ilustración 1: División de zonas actuales. Elaboración Propia (2025).</i>	18
<i>Ilustración 2: Fases del proyecto integrador</i>	30
<i>Ilustración 3: Cronograma de trabajo del proyecto integrador</i>	32
<i>Ilustración 4: Jaba mediana utilizada por la empresa</i>	42
<i>Ilustración 5: Proceso de organización y depuración de datos en Microsoft Excel.</i>	59
<i>Ilustración 6: OpenRouteService (ORS), herramienta empleada para el cálculo de distancias y tiempos de viaje.</i>	59
<i>Ilustración 7: OpenStreetMap (OSM), base cartográfica utilizada por ORS.</i>	60
<i>Ilustración 8: Python, lenguaje utilizado para conectarse a la API de ORS y procesar datos.</i> ..	60
<i>Ilustración 9: Entorno de modelación PuLP utilizado para resolver el modelo exacto del PVRPTW.</i>	61
<i>Ilustración 10: Clusterización para los valores $CL = 5$ y $CL = 7$</i>	65
<i>Ilustración 11: Ruta 6 y 9 del nuevo cronograma de visitas (Día 1 y 3)</i>	73
<i>Ilustración 12: Ruta 1 del nuevo cronograma de visitas (Día 2)</i>	74
<i>Ilustración 13: Ruta 1 del nuevo cronograma de visitas (Día 5)</i>	74
<i>Ilustración 14 Reducción en el total de la distancia semanal recorrida en km y las emisiones de CO2 para el escenario actual y propuesto</i>	77
<i>Ilustración 15: Ruta 1 y 2 del nuevo cronograma de visitas (Día 1 y 3)</i>	87
<i>Ilustración 16: Ruta 3 y 5 del nuevo cronograma de visitas (Día 1 y 3)</i>	87
<i>Ilustración 17: Ruta 7 y 8 del nuevo cronograma de visitas (Día 1 y 3)</i>	88
<i>Ilustración 18: Ruta 9 y 10 del nuevo cronograma de visitas (Día 1 y 3)</i>	88
<i>Ilustración 19: Ruta 1 y 2 del nuevo cronograma de visitas (Día 5)</i>	89
<i>Ilustración 20: Ruta 3 y 4 del nuevo cronograma de visitas (Día 5)</i>	89
<i>Ilustración 21: Ruta 5 y 7 del nuevo cronograma de visitas (Día 5)</i>	90
<i>Ilustración 22: Ruta 8 y 9 del nuevo cronograma de visitas (Día 5)</i>	90
<i>Ilustración 23: Ruta 10 del nuevo cronograma de visitas (Día 5)</i>	91
<i>Ilustración 24: Ruta 2 y 3 del nuevo cronograma de visitas (Día 7)</i>	91
<i>Ilustración 25: Ruta 4 del nuevo cronograma de visitas (Día 7)</i>	92

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Situación actual de la frecuencia de abastecimiento.</i>	16
Tabla 2 <i>Descripción de zonas cantidad de clientes y frecuencia de visita</i>	34
Tabla 3 <i>Listado oficial de clientes por zona</i>	35
Tabla 4 <i>Demanda semanal de los clientes de la ZONA_LO_GYE_003 en jabas de las últimas 4 semanas del mes de octubre.</i>	36
Tabla 5 <i>Ventanas horarias por punto de entrega de la ZONA_LO_GYE_003</i>	38
Tabla 6 <i>Locales de la zona ZONA_LO_GYE_008 con dos ventanas horarias</i>	38
Tabla 7 <i>Cronograma de entregas semanal actual</i>	39
Tabla 8 <i>Número de viajes por zona y costo por flete de la semana 43 del 2025.</i>	40
Tabla 9 <i>Capacidad de la flota y su utilización</i>	42
Tabla 10 <i>Distancia y tiempo total recorrido por zona</i>	44
Tabla 11 <i>Cálculo de las nuevas frecuencias de entrega y demanda diaria en jabas por local de ZONA_LO_GYE_003</i>	46
Tabla 12 <i>Resumen de nuevas frecuencias por cliente</i>	66
Tabla 13 <i>Resumen de experimentos</i>	67
Tabla 14: <i>Resultados del escenario con clúster 5</i>	69
Tabla 15: <i>Resultados del escenario con clúster 6</i>	69
Tabla 16: <i>Resultados del escenario con clúster 7</i>	70
Tabla 17 <i>Nuevo cronograma de visita semanal</i>	72
Tabla 18 <i>Resumen costo/flete semanal (\$)</i>	75
Tabla 19 <i>Especificaciones del camión de 4.5 ton</i>	76
Tabla 20 <i>Nuevo cronograma de visita semanal</i>	92

Capítulo 1

1.1 Introducción

En la industria de los productos perecederos, la conservación y el manejo adecuado de los alimentos son factores fundamentales que considerar en el proceso de distribución. Estos productos, debido a su corta vida útil, requieren procesos de manipulación y transporte bajo condiciones controladas que garanticen su calidad hasta el punto de venta, puesto que, se debe mantener la frescura de los alimentos, por ende, la planificación del abastecimiento juega un papel clave en la efectividad de las operaciones. Según Kirci & Seifert (2022), “una frecuencia de entrega inadecuada puede generar costos de transporte excesivos o mayores tasas de deterioro, ambos factores que afectan directamente el desempeño de la cadena de suministro”.

En la actualidad, muchas empresas enfrentan dificultades para definir intervalos de entrega adecuados que garanticen la frescura del producto sin generar costos elevados en transporte, además de riesgos en la conservación del producto por variaciones en la descarga que incluye el prolongar el tiempo de servicio promedio en cada local provocando un rápido aumento en la temperatura del furgón.

El transporte y distribución en este sector, exige precisión en las operaciones de carga y descarga, puesto que se debe mantener la cadena de frío y asegurar el cumplimiento estricto de las ventanas horarias establecidas por los clientes, además del tiempo máximo de recorrido por ruta, y la variabilidad en los niveles de consumo entre sucursales. Esto resulta necesario analizar la frecuencia de las entregas y la forma en que se asignan los volúmenes de carga por ruta. Una frecuencia inadecuada puede provocar tanto desabastecimientos como viajes innecesarios, afectando la disponibilidad del producto y el desequilibrio entre la demanda y la capacidad operativa.

Este es el caso de una cadena de restaurantes en la ciudad de Guayaquil, la cual se encarga de proveer a los locales de comida en este perímetro urbano , alimentos refrigerados como pasteles , dulces y helados ; además, de congelados que constan de alimentos como pollo,

embutidos, carnes entre otros. La entrega a estos puntos constituye un desafío logístico particular, debido a que, la ciudad se caracteriza por temperaturas elevadas y alta humedad, que representa un entorno operativo complejo para el transporte y almacenamiento de productos perecederos, especialmente aquellos que requieren refrigeración constante. Esto genera una limitante en la asignación de entregas por ruta, marcando un tiempo máximo de recorrido para no perder la cadena de frío. A esto se suman las restricciones horarias para vehículos de carga, las condiciones del tráfico en las zonas comerciales y la variabilidad en los niveles de consumo entre sucursales.

El sector gastronómico de Guayaquil, en crecimiento durante la última década, ha impulsado la digitalización de sus procesos logísticos, sin embargo, muchas empresas aún planifican sus entregas de manera empírica, basándose en la experiencia y la demanda diaria, lo que genera ineficiencias y costos elevados. La aplicación de modelos de optimización constituye una oportunidad para mejorar la rentabilidad y sostenibilidad del sector, reduciendo desperdicios, consumo energético y emisiones de CO₂, con un impacto positivo en la competitividad y la gestión ambiental (Birkmaier, Imeri, & Reiner, 2024).

En consecuencia, el presente estudio busca optimizar el cronograma de abastecimiento semanal para una cadena de restaurantes en Guayaquil, mediante el análisis de la demanda, las restricciones operativas y modelados matemáticos con el fin de reducir la frecuencia de entregas por semana. El enfoque propuesto se alinea con las tendencias recientes en logística urbana y distribución de productos perecederos, donde la efectividad depende de la sincronización entre los tiempos de entrega, el mantenimiento de la cadena de frío y el uso adecuado de la capacidad de la flota.

1.2 Descripción del Problema

El presente problema de estudio se basa en una cadena de restaurantes que opera desde su centro de distribución ubicado en el Km 7.5 Vía Daule, Guayaquil, la cual presenta una elevada

frecuencia del abastecimiento semanal a sus puntos de entrega, que hacen referencia a las locales o sucursales de su grupo empresarial en esta ciudad.

En la actualidad, la programación de las rutas de entrega de productos perecederos refrigerados cuenta con una división de 17 rutas para las distribución de estos alimentos, los cuales tienen una frecuencia de visitas semanal de 1 a 6 días como máximo. A partir de esto, se ha identificado en el cronograma de abastecimiento que 10 de estas rutas tienen una frecuencia de visita de 5 días, mientras, que 3 de estas son visitadas 6 días a la semana; las zonas mencionadas serán el objeto de estudio. En la Tabla 1 adjunta a continuación, se detalla la situación actual, además de la cantidad de puntos de entrega, es decir, locales que se debe atender por día.

Tabla 1

Situación actual de la frecuencia de abastecimiento.

Frecuencia de abastecimiento (Días)	Días de entrega a la semana	N. de rutas por día	Cantidad de locales atendidos
5	Martes- miércoles - viernes- sábado - domingo	10	88
6	Lunes- martes- miércoles- viernes - sábado - domingo	3	16
Total		13	104

Nota. Elaboración Propia (2025).

Los pedidos para reabastecerse son colocados por los locales o sucursales, los cuales tienen acceso a una plataforma en línea para colocar su orden de compra, en la que detallarán las unidades por referencias que requieren. Cabe mencionar, que los restaurantes operan independientemente; los representantes de cada local son los responsables de manejar su nivel de

inventario de acuerdo con sus consideraciones y proyecciones. Estos pedidos se basan en una planificación por experiencia del personal sin un sustento de proyección por nivel de inventario, por lo que están limitados a cubrir la demanda de ciertos días sin tomar en cuenta el stock de seguridad o una correcta política de inventarios. El problema parte de una inadecuada planificación del abastecimiento de los productos fríos por parte de las sucursales. En consecuencia, esto se transforma en pedidos que se realizan varias veces a la semana.

Estos pedidos son entregados a cada local de acuerdo con el cronograma de entregas por zona que ha sido elaborado por el equipo de distribución. Este cronograma ha sido desarrollado de forma empírica, agrupando a los locales por zonas. De tal forma que, el orden de entrega a cada local establecido en este cronograma no puede ser reasignado a otra zona, aun cuando los pedidos al ser consolidados solo ocupen cierta parte de la capacidad del vehículo. Esto provoca una subutilización de la flota de transporte tercerizado y elevados costos semanales por flete. Por simplicidad a lo largo del documento, se hará referencia como puntos de entrega a los locales o restaurantes del caso de estudio.



Ilustración 1: División de zonas actuales. Elaboración Propia (2025).

Para la resolución de este caso, es indispensable considerar que, para que el cronograma de abastecimiento sea factible, debe garantizarse que los productos refrigerados sean transportados en camiones cuya caja de carga mantenga una temperatura máxima de 5 °C, con el fin de preservar la cadena de frío. Estos productos incluyen tortas, galletas, postres, panes de panadería y otros dulces, los cuales son distribuidos a los diferentes puntos de entrega. Por otra parte, los locales receptores únicamente aceptan productos que conserven la temperatura indicada; por tanto, las rutas de distribución tendrán que respetar un tiempo máximo de recorrido de siete horas. Este tiempo comprende el inicio del trayecto desde el centro de distribución, el traslado, la llegada a cada punto de entrega, los tiempos de espera y las operaciones de descarga. Las asignación de rutas, tiene como restricción las ventanas horarias de los puntos de entrega, puesto que, algunos de ellos, están ubicados en sectores como el centro de la ciudad, en el que se deberá respetar las restricciones municipales en cuanto a horarios de descarga. Otro aspecto que considerar es que ciertos locales pueden estar en el mismo punto geográficamente, sin embargo,

contar con una ventana horaria distinta. Por ejemplo, existen las denominadas "islas de comida" dentro de los centros comerciales en los que solo se podrá entregar el producto durante la mañana antes de que se abran las puertas al público, mientras que existirá otro local ubicado en el patio de comida cuya recepción puede darse a lo largo del día sin la restricción antes mencionada.

Preservar la conservación de los productos durante la entrega implica una gestión eficiente en el planeamiento de las entregas y abastecimiento a lo largo de un horizonte, en este caso semanal. Para abordar el problema descrito, se establecerá un cronograma de entrega semanal por ruta, para encontrar una mejora en la frecuencia del abastecimiento por local, sin dejar de lado, las consideraciones en cuanto a la demanda de los clientes y la capacidad de carga del vehículo. En la literatura, este tipo de decisión se modela como un Problema Periódico de Rutas de Vehículos (PVRP), en este se requerirá decidir cuántos días a la semana se debe atender a cada local para satisfacer la demanda sin saturar la capacidad de recepción o almacenamiento en cada punto de entrega.

1.3 Justificación del Problema

La gestión adecuada de la frecuencia de abastecimiento representa uno de los mayores retos logísticos, ya que combina la necesidad de planificar y administrar las proyecciones de demanda por cliente y una organización correcta para la distribución de los productos. Al tratarse de productos perecederos, se debe garantizar la eficiencia en la entrega y conservación de la cadena de frío. La importancia de resolver este problema radica en el ahorro de costos por flete, subutilización de camiones, además de minimizar la distancia total recorrida y mantener el nivel de servicio que la empresa busca brindar a sus clientes.

La relevancia del proyecto no solo es aplicable al caso de estudio, este puede ser generalizado para pequeñas y medianas empresas que comercializan y distribuyen productos

percibibles en el país. Establecer una frecuencia óptima permite equilibrar los costos logísticos con la conservación de la frescura y la inocuidad de los alimentos.

Si bien la problemática propuesta, se alinea a la implementación del PVRP, se debe considerar la variante asociada a las ventanas horarias, que es el Problema de Ruteo periódico con ventanas de tiempo (PVRPTW , por sus siglas en inglés) para que la asignación de rutas por camión sea factible considerando las restricciones para la distribución.

La aplicación de modelos de optimización no solo representa mejoras en la gestión de la cadena de suministro, sino también aporta a mejorar el nivel de servicio de la empresa , además de generar un ahorro respecto al costo por flete. Por otra parte, al invertir en este tipo de soluciones , se realiza un aporte al consumo responsable de los recursos, en este caso a la eficiencia en la utilización de los camiones.

A través de este proyecto, se fomenta la innovación en la aplicación de modelos de optimización en las operaciones logísticas, para realizar un aporte al Objetivo de Desarrollo Sostenible 8 (ODS) , cuyo fin es promover el crecimiento económico sostenido, incluido y sostenible y el trabajo decente para todos, de esta manera, al promover que la duración de las entregas por ruta, se adhieran al cumplimiento del horario laboral. Asimismo, con la implementación del algoritmo se busca incentivar a las empresas a cumplir con el ODS 12 , respecto a la producción y consumo responsable de los recursos, en esta área, se hace énfasis en el ahorro de la utilización de la flota de transporte, que contribuya con la reducción de emisiones de CO₂.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Implementar un algoritmo de optimización que genere un cronograma de abastecimiento efectivo para productos refrigerados de la ciudad de Guayaquil, considerando la capacidad de la flota, frecuencias de entrega y restricciones operativas.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Identificar las características operativas y logísticas del abastecimiento de productos refrigerados en Guayaquil, identificando los puntos de entrega, vida útil de los productos, frecuencias actuales de las rutas.
2. Analizar el historial de los pedidos semanales por puntos de entrega para estimar la demanda promedio por local, así como su capacidad de almacenamiento.
3. Desarrollar una heurística que considere las restricciones de capacidad de la flota y ventanas horarias para la asignación de pedidos que minimicen la frecuencia de abastecimiento.
4. Validar el desempeño del algoritmo propuesto a través de la comparación de los resultados del modelo con la situación actual evaluando la eficiencia en los tiempos de recorrido y el ahorro en costo por flete semanal.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Antecedentes

La optimización de recursos dentro de la cadena de suministro se ha convertido en factor fundamental para las organizaciones que buscan reducir costos y mejorar el servicio al cliente. Para lograr tener un control en el manejo las operaciones logísticas e identificas fuentes de pérdidas de ingresos por altos costos en las actividades realizadas por día, es necesario incluir a la tecnologías en estos procesos. Esto incluye una adaptación al cambio, es decir, dejar las costumbres de realizar pedidos, organizar rutas de entrega o proyecciones solo basadas en la experiencia e integrar sistemas digitales, algoritmos de entrenamiento o modelos que mejoren la calidad de los procesos logísticos. Según Adesoga et al. (2024), la implementación de cadenas de suministro inteligentes que integran la automatización permite reducir los costos operativos

entre un 10 % y un 25 %, al optimizar rutas, la planificación de la demanda y la gestión automatizada de inventarios.

De acuerdo con (Lahyani, Khemakhem, & Semet, 2015), la integración de decisiones sobre inventario y ruteo genera beneficios significativos en toda la cadena de valor, trascendiendo la simple reducción de costos operativos. Es preciso , reconocer la relevancia de la implementación de tecnología en este tipo de decisiones , especialmente para aquellos sectores que requieren la atención de sus pedidos de manera periódica. Esto incluye a sectores de la industria como el de consumo masivo, manejo de alimentos, en los que se debe prestar total atención a la conservación del inventario durante la entrega de las referencias.

Dentro de este contexto, el Problema Periódico de Rutas de Vehículos (PVRP) es el modelo matemático más adecuado para las operaciones de distribución que no requieren una visita diaria a los clientes. Este modelo se centra en la asignación óptima de días y la frecuencia de servicio semanal para cada punto de entrega. Es por esto que, el PVRP para Productos Perecederos se ha consolidado, como uno de los modelos que consideren el rápido deterioro de la calidad de los productos, lo que obliga a minimizar no solo la distancia, sino también el tiempo de exposición y la violación de tiempos de entrega (Marsetiya, Kusuma, Santoso, & Wahid, 2020).

La solución de esta problemática no solo depende de las restricciones operativas, sino de su solución eficiente. Para asegurar la correcta operación en un entorno con regulaciones y horarios establecidos de entrega, la literatura se ha centrado en el PVRP con Ventanas de Tiempo (PVRP-TW). Esta variante garantiza que la solución de ruteo cumpla con los horarios de recepción de los clientes, un factor esencial en la logística urbana y en la optimización de rutas con ventanas horarias estrictas (Sitompul & Manasye, 2021).

1.5.2 Estado del arte

En esta sección, se presenta una revisión de la literatura que guarda una estrecha relación con el presente estudio:

1.5.2.1 Revisión del Estado del Arte.

Para comprender y profundizar sobre el problema expuesto anteriormente, es preciso revisar los estudios e investigaciones desarrolladas en la literatura para tener una visión más amplia al momento de realizar la implementación de un modelo.

El trabajo de investigación de (Christofides & Beasley, 1984) constituye una referencia fundamental del Problema Periódico de Ruteo de Vehículos (PVRP) , una variante del problema VRP , que consiste en encontrar conjuntos de rutas a lo largo de un horizonte temporal, que satisfaga las restricciones como la demanda por cliente y las frecuencias de visita preestablecidas, con el objetivo de minimizar la suma de los costos del ruteo total. En este estudio, se hace una introducción a la complejidad computacional del modelo y se da paso a la construcción de heurísticas para hallar una solución factible en tiempos razonables.

El método propuesto , se compone de dos etapas principales: una fase de asignación inicial de combinaciones de días y una fase de intercambio o mejora. En la primera, los clientes se ordenan según su importancia o demanda y se les asignan combinaciones de días que generen el menor incremento en el costo global. En la segunda, se evalúan intercambios de combinaciones entre clientes para reducir los costos totales de transporte, manteniendo las restricciones de capacidad y frecuencia de servicio.

El siguiente estudio, presenta una forma distinta de analizar el PVRP , cambiando el enfoque del modelo , hacia la minimización del tamaño de la flota requerida, en lugar de centrarse exclusivamente en la reducción del costo total de recorrido. Los autores plantean un modelo que integra tres variables de decisión , la determinación del tamaño de la flota, la programación de entregas y el diseño de rutas para equilibrar el uso de los recursos a lo largo del

horizonte de planificación y garantizar un servicio periódico eficiente, este es el caso “A Heuristic for the Periodic Vehicle Routing Problem” publicado en 1992.

No obstante, dado que resolver el modelo de manera exacta se torna complicado al ser NP-hard, los autores proponen una heurística constructiva basada en un proceso de asignación secuencial cliente por cliente. En cada paso, se determina una combinación factible de días de entrega y se asigna al cliente a la primera ruta disponible que cumpla con las restricciones de capacidad y tiempo. Si la asignación provoca un aumento del tamaño de la flota, se prueban otras combinaciones posibles de días.

Uno de los aspectos a resaltar de este proyecto es la metodología , que será considerada para el presente caso de estudio. En esta etapa se aplica dos heurísticas como el 2-opt para mejorar las rutas, y bin packing problema con un enfoque con la asignación First Fit Decreasing (FFD) para optimizar la asignación de rutas a vehículos y considerar la capacidad máxima de cada camión por viaje .

“The Periodic Vehicle Routing Problem: A Case Study” (Spieksma, Arnou, & Coene, 2008) es un artículo que se centra en la optimización de rutas de recolección de residuos para una empresa en Bélgica, modelando el problema como una variante práctica del PVRP. El modelo incorpora complejidades operativas como el uso de una flota heterogénea y la presencia de instalaciones intermedias de descarga donde los vehículos pueden vaciar su carga a mitad de la ruta y continuar el servicio.

Resolver este problema con instancias mayores a los 10 clientes de forma óptima, se vuelve costoso computacionalmente, de forma que, los autores recomiendan aplicar una heurística de dos fases. El algoritmo Even Spread (ES) prioriza la distribución uniforme de las visitas a lo largo de los días para equilibrar la carga de trabajo, mientras que el algoritmo Clúster (CL) prioriza la estructura geográfica agrupando clientes cercanos antes de la asignación de días. Finalmente, el algoritmo MR (Mega Route) invierte el proceso, construyendo primero una ruta

que visita a todos los clientes antes de la división temporal. Los resultados demuestran que, para las instancias analizadas, los algoritmos que consideran la estructura geográfica (CL - clúster) o que limitan el número de clientes por día son los más efectivos.

Específicamente, el algoritmo CL logró reducir el tiempo total de viaje hasta en la instancia de bajo riesgo en comparación con las rutas manuales existentes. Se establece que las restricciones de tiempo y las de acceso geográfico tienen un mayor impacto en los costos de ruteo que las restricciones de volumen de carga, lo que valida la aplicación de estos modelos para reducir costos y el uso de la flota.

De esta manera, la investigación descrita aportará al presente estudio para generar los escenarios en cuanto a las frecuencias de visita por cliente. El análisis de la demanda será fundamental, ya que la frecuencia de visita de cada cliente se calcula en función de su producción de residuos y su capacidad de almacenamiento.

1.5.3 Marco conceptual

A continuación, una vez descrita la revisión de literatura se presenta a continuación algunos conceptos necesarios para el entendimiento del presente problema.

1.5.3.1 El Problema de Ruteo de Vehículos (PVRP)

El Periodic Vehicle Routing Problem (PVRP) es una extensión del Vehicle Routing Problem (VRP) clásico, el cual busca determinar las rutas óptimas para una flota de vehículos que parte de un depósito central y atiende a un conjunto de clientes, minimizando el costo total de transporte y cumpliendo restricciones de capacidad. A diferencia del VRP tradicional, donde la planificación es estática y diaria, el PVRP introduce una interdependencia temporal entre los días, ya que las decisiones de asignación de patrones de servicio afectan las cargas y rutas de todo el horizonte. Esto lo convierte en un problema combinatorio de alta complejidad (NP-hard), más difícil que resolver un VRP independiente por cada día, debido a la necesidad de coordinar simultáneamente las decisiones de todos los periodos.

En el PVRP, esta planificación se amplía a un horizonte temporal de varios días o periodos, incorporando la dimensión de la frecuencia de servicio. Es decir, cada cliente no necesita ser atendido diariamente, sino de acuerdo con una periodicidad específica establecida por políticas de inventario o requerimientos operativos.

Este problema presenta la siguiente formulación:

Índices

$V = \{0, 1, 2, 3, \dots, n\}$ conjunto de nodos i y $j \in V$; 0 será el depósito.

$T = \{1, 2, 3, \dots, H\}$ conjunto de periodos o días del horizonte de planificación.

$K = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ conjunto de vehículos disponibles.

$F_i \subseteq T$ Conjunto de combinaciones de días posibles en las que el cliente i puede ser atendido, representa a la frecuencia.

Parámetros

d_{ij} : Distancia desde el cliente i hasta el cliente j .

q_i : Demanda de cliente i

f_i : frecuencia de servicio del cliente i .

M : Número grande (Big-M)

L : Capacidad de la carga.

Q_k : Capacidad de carga del vehículo k .

Variables de decisión

$x_{ijkt} = \begin{cases} 1 & \text{si el camión } k \text{ visita a cliente } i \text{ y luego a } j \text{ en un día } t. \\ 0 & \text{en caso contrario.} \end{cases}$

$y_{it} = \begin{cases} 1 & \text{si el cliente } i \text{ es visitado en un día } t. \\ 0 & \text{en caso contrario.} \end{cases}$

u_{it} : Cantidad de la carga al visitar al cliente i .

$$\text{Min} \sum_t^T \sum_k^K \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n d_{ij} x_{ijkt} \quad (1)$$

s. t:

$$\sum_t^T y_{it} = f(i), \quad \forall i = 1, 2, \dots, H \quad (2)$$

$$\sum_j x_{0jt} \leq k, \quad \forall t = 1, 2, \dots, H \quad (3)$$

$$\sum_k^K \sum_{j=0}^n x_{ijkt} = 1, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \quad \forall t = 1, 2, \dots, H \quad (4)$$

$$\sum_k^K \sum_{i=0}^n x_{ijkt} = 1, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n, \quad \forall t = 1, 2, \dots, H \quad (5)$$

$$\sum_k^K \sum_{i=0}^n x_{ijt} = y_{it}, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n, \quad \forall t = 1, 2, \dots, H \quad (6)$$

$$\sum_k^K \sum_{j=0}^n x_{ijt} = y_{it}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \quad \forall t = 1, 2, \dots, H \quad (7)$$

$$q_i \leq u_i \leq L, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$u_{it} - u_{jt} + L(x_{ij}) \leq L - q_j, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n; \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$u_i \in \mathbb{R} \geq 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

La ecuación ($\text{Min } \sum_t^T \sum_k^K \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n d_{ij} x_{ijkt}$) corresponde a la función objetivo que busca minimizar la distancia total de recorrida durante todo el horizonte el horizonte de

p

Capítulo 2

2. Metodología.

2.1 Fases del proyecto.

El desarrollo del proyecto se ha estructurado en cuatro fases principales, tal como se muestra en la Ilustración 2. Esta organización metodológica permite planificar y ejecutar de forma sistemática cada una de las etapas que integran la investigación, asegurando un proceso coherente, ordenado y alineado con los objetivos generales y específicos planteados. De este modo, la estructura por fases facilita el seguimiento del trabajo, optimiza la gestión de recursos y garantiza la consistencia entre las distintas etapas del estudio.

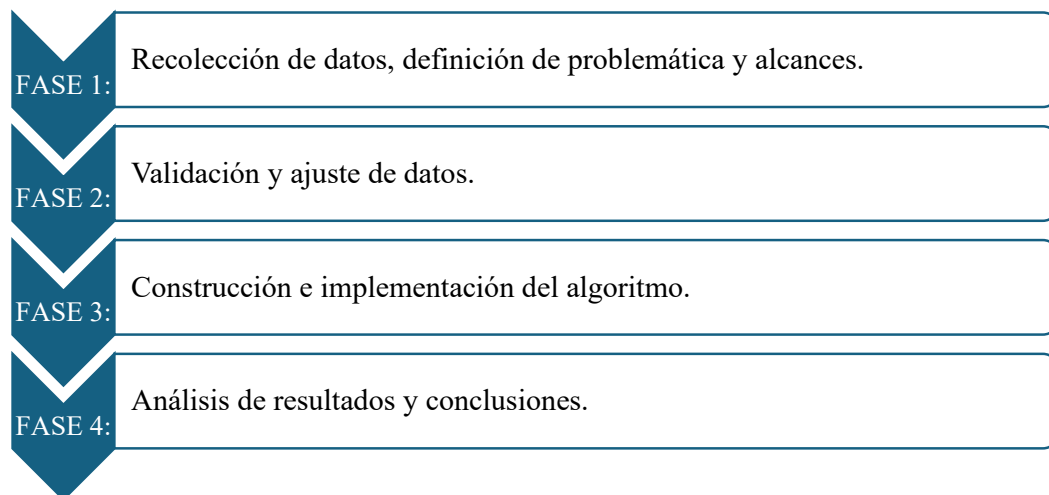


Ilustración 2: Fases del proyecto integrador

La primera fase denominada “Recolección de datos, definición de problemática y alcances”, empieza desde que el primer acercamiento con la empresa para conocer cómo funcionan sus procesos internos, sucursales, rutas y las necesidades actuales. En el primer capítulo, se mencionó que la empresa en sus rutas maneja productos que deben mantenerse bajo una cadena de frío y congelados, finalizando este capítulo se definió el alcance de la implementación del algoritmo en las rutas de los productos congelados, las cuales son cubiertas por diferentes camiones (un camión por cada ruta).

La segunda fase, denominada “Validación y ajuste de datos”, comprende un proceso minucioso de control y aseguramiento de la calidad de la información recopilada en la primera etapa. En esta nueva etapa, se lleva a cabo la verificación y corrección de los registros obtenidos, lo que incluye la identificación de coordenadas geográficas a partir de los nombres de cada local proporcionadas por la empresa, así como la revisión detallada de los documentos de pedidos. Como resultado de este análisis, se estableció el listado definitivo de puntos de entrega a considerar en el algoritmo y se determinó su demanda semanal correspondiente. Posteriormente, se desarrollaron las matrices necesarias para el modelado del problema, tales como las de tiempos de viaje y agrupamiento de clientes (clustering), entre otras que sustentan el proceso de optimización.

Con la información ya validada y preparada, la tercera fase, denominada “Implementación del algoritmo”, abarca la selección de estrategias de resolución más adecuadas según la complejidad y las dimensiones del problema, considerando enfoques metaheurísticos. Asimismo, se define el lenguaje de programación a emplear, las variables del modelo y la estructura general del algoritmo. Finalmente, se procede a la ejecución de los experimentos computacionales con el propósito de evaluar su desempeño y obtener los resultados iniciales del estudio.

2.2 Cronograma

En la Ilustración 3 se presenta el cronograma de trabajo para el proyecto, a través de un diagrama de Gantt, con el cual se da una interpretación visual detallada de tiempos para cada paso correspondiente a las cuatro fases mencionadas en la sección previa.

Actividad	FASE	Recolección de datos, definición de problemática y alcances.				Validación y ajuste de datos.				Construcción e implementación del algoritmo.						Análisis de resultados y conclusiones.			
		SEMANA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	INICIO	29-sept	6-oct	13-oct	20-oct	27-oct	3-nov	10-nov	17-nov	24-nov	1-dic	8-dic	15-dic	22-dic	29-dic	5-ene	12-ene	19-ene	26-ene
FIN	3-oct	10-oct	17-oct	24-oct	31-oct	7-nov	14-nov	21-nov	28-nov	5-dic	12-dic	19-dic	26-dic	2-ene	9-ene	16-ene	23-ene	30-ene	
Reunión de Inicialización del proyecto																			
Reunión con el equipo de logística de la empresa																			
Solicitud de data a los jefes de departamentos																			
Definición de problemática actual y alcance del proyecto																			
Redacción de Avance 1																			
Revisión de los avances																			
Identificación de coordenadas geográficas de clientes																			
Revisión de demanda y frecuencia histórica de cada local																			
Preprocesamiento de clientes (Matrices tiempos de viaje y distancias reales)																			
Establecimiento de variables y parámetros																			
Planteamiento de modelo matemático PVRPTW																			
Implementación de los modelos matemáticos y mejoras con heurísticas																			
Redacción de la aplicación de los modelos sobre el proyecto																			
Correcciones dentro del modelo, datos, variables, planteamiento correcto de las restricciones y FO.																			
Análisis de resultados																			
Contraste entre situación actual y los resultados de la propuesta.																			
Redacción y Revisión del avance final																			
Presentación de proyecto finalizado																			

Ilustración 3: Cronograma de trabajo del proyecto integrador.

2.3 Técnicas de investigación

Con el propósito recopilar, analizar y garantizar la fiabilidad de la información, se aplicaron un conjunto de técnicas de investigación que permitieron caracterizar con precisión la operación logística de la empresa. Para la fase inicial, se llevaron a cabo visitas de campo al centro de distribución, donde se ejecutan los procesos de preparación, consolidación y carga de pedidos. Estas visitas fueron útiles para comprender y dimensionar estos procesos que se llevan a cabo previo a la salida de los vehículos, además de permitir la identificación de la disponibilidad y características de la flota.

Posteriormente, se realizaron entrevistas estructuradas con los responsables del departamento de logística y distribución, en las cuales se pudo hacer una revisión del cronograma semanal de entregas que se utiliza día a día. A través de estas entrevistas fue posible revisar el cronograma semanal de entregas empleado de manera operativa, identificándose la presencia de dos ventanas horarias en determinados locales ubicados en centros comerciales. Asimismo, se obtuvo información sobre las consideraciones requeridas para el transporte de alimentos perecederos, como la separación de referencias con componentes alergénicos y el tiempo máximo de recorrido permitido para conservar la cadena de frío.

En la segunda fase, se procedió con la recopilación y el procesamiento de la información. Se accedió a los registros de los pedidos de tres meses del año en curso, lo que permitió analizar el comportamiento de la demanda en cada punto de entrega. Este análisis permitió identificar picos de demanda y variaciones semanales en los pedidos, elementos necesarios para proponer una mejora en la frecuencia y la planificación de visitas.

Finalmente, en la tercera fase, se condujo una investigación y revisión de artículos científicos respecto a modelos de optimización, lo cual proporcionó el fundamento necesario para respaldar la selección y posterior implementación del algoritmo para la resolución del problema.

2.4 Levantamiento de Información

El proceso de levantamiento de información inició con una fase de reuniones con la empresa, en las cuales se definieron los datos necesarios para abordar la problemática planteada. Durante estas sesiones se mantuvieron acercamientos con los líderes de cada área, con el objetivo de solicitar la información pertinente y obtener una comprensión más completa de los datos previamente recopilados por la organización.

Para empezar con el análisis de la situación actual, se solicitó el listado de las “Zonas-refrigerados” que contienen los locales que hacen su pedido de productos refrigerados junto a su frecuencia de visita respectiva, que hace referencia a la número de días a la semana que se realiza una entrega en esta locación. En la Tabla 2 se presentan las 13 zonas con el número de clientes correspondientes a cada una de ellas.

Tabla 2

Descripción de zonas cantidad de clientes y frecuencia de visita

“Zonas – refrigerados”	N. clientes por zona	Frecuencia de visita (Días)
ZONA_LO_GYE_010	12	5
ZONA_LO_GYE_050	8	5
ZONA_LO_GYE_003	8	5
ZONA_LO_GYE_009	9	5
ZONA_LO_GYE_004	10	5
ZONA_LO_GYE_011	7	5
ZONA_LO_GYE_053	7	5
ZONA_LO_GYE_006	8	5
ZONA_LO_GYE_005	8	5
ZONA_LO_GYE_048	6	5
ZONA_LO_GYE_008	7	6
ZONA_LO_GYE_051	5	6

ZONA_LO_GYE_007	9	6
<i>Total de clientes</i>	104	

Nota. Elaboración Propia (2025).

Tal como mencionó previamente, las 13 zonas comprenden un total de 104 clientes ubicados dentro del perímetro urbano de la ciudad de Guayaquil. Entre ellas, la ZONA_LO_GYE_008, ZONA_LO_GYE_051 y ZONA_LO_GYE_007 presentan una frecuencia de visita de seis días a la semana, mientras las diez zonas restantes son atendidas cinco días.

A partir de este listado, se procedió a obtener las coordenadas geográficas (latitud y longitud) de los 104 clientes detallados por zona, utilizando herramientas como My Maps de Google. La Tabla 3 presenta como ejemplo la ZONA_LO_GYE_003 con el detalle del identificador de sus 8 clientes y su ubicación geográfica respectiva para dimensionar la calidad de la información y contextualizar la dimensión del problema analizado. Los datos relacionados con las zonas restantes serán incluidos posteriormente en la sección de Anexos.

Tabla 3

Listado oficial de clientes por zona

Zona	Id. local	Latitud	Longitud
<i>ZONA_LO_GYE_003</i>	DI03	-2.141105556	-79.86466563
	G049	-2.177185734	-79.82507836
	H022	-2.177116018	-79.82521671
	K153	-2.158363521	-79.84141634
	K025	-2.169810715	-79.83943428
	K094	-2.177185729	-79.82501402
	K165	-2.169495381	-79.79596533
	M047	-2.177366039	-79.82465418

Nota. Elaboración Propia (2025)

Por otra parte, se solicitó un registro histórico de la demanda, representada por los pedidos efectuados desde la semana 31 hasta la semana 43 del año 2025, que representan 3 meses del presente año. En esta etapa, la empresa indicó que los datos de la demanda debían ser considerados en jabas como unidad de medida para evaluar la capacidad de la flota.

Al revisar los datos compartidos, se observó que los pedidos que se realizan por referencia tienen diferentes unidades de medida de base como unidades de legumbres, bolsas de piernas de pollo, empaques de embutidos, entre otros, por lo que se procedió a realizar una sesión de consulta sobre la conversión a jabas. En esta fase, se logró identificar ciertas referencias que han sido descontinuadas por lo que se realizó una depuración de la base de datos en conjunto con el personal de logística. A partir de esta actualización de la información, se realizó la conversión a jabas para estandarizar el volumen de pedidos de cada local, obteniendo una tabla clientes y su demanda semanal (Tabla 4).

Tabla 4

Demanda semanal de los clientes de la ZONA_LO_GYE_003 en jabas de las últimas 4 semanas del mes de octubre.

Id. local	Semana 40	Semana 41	Semana 42	Semana 43
DI03	6	19	0	0
G049	48	33	39	37
H022	1	0	0	0
K153	43	55	56	52
K025	65	74	84	73
K094	48	63	68	56
K165	47	60	54	57
M047	31	27	24	22

Nota. Elaboración Propia (2025).

Es pertinente destacar que algunos clientes incluidos en la Tabla 4 presentan semanas con valor cero, dado que la realización del pedido queda sujeta a su propia discreción. La ausencia de solicitudes en determinadas semanas puede responder a una reducción del nivel de venta, lo cual elimina la necesidad de reposición en esa semana. Sin embargo, la empresa debe mantenerse preparada para abastecer y atender al cliente en el día establecido, en caso de que este requiera un pedido. En consecuencia, tras una consulta con el equipo logístico, se determinó realizar el análisis bajo el supuesto de que los clientes efectúan pedidos de manera regular en los días que les han sido asignados.

2.5 Recopilación de la Información

Para poder generar la situación actual, en cuanto al cronograma de entrega y el recorrido por zona y por camión, se recopiló la información a partir de las guías de transporte en la cual se identificó la secuencia de visita a cada local.

Como se puede observar en la Tabla 5, se presenta los ocho locales que pertenecen a la *ZONA_LO_GYE_003*, cada punto de entrega cuenta con su respectiva ventana horaria y tiempo de servicio promedio. En este caso, el inicio de la ventana horaria más temprana inicia a las 07h00 como se evidencia en los locales “G049”, “H022”, “K094”, “K165” y “M047”, mientras para el resto de los locales el inicio de la ventana se da a las 08h00.

Asimismo, se presenta el tiempo de servicio promedio, expresado en minutos, el cual se define como el intervalo total que transcurre desde el ingreso del vehículo al establecimiento hasta la finalización de la descarga de la mercancía. La descarga implica el traspaso de los alimentos de la jaba en la que ha sido transportada hacia una jaba del local.

En adición, la duración de la descarga varía respecto a las exigencias del local, ciertos puntos de entrega requieren que previo al traspaso de los alimentos a las jabas de su propiedad, estas sean desinfectadas con agua, por lo que este proceso se puede prolongar unos minutos.

Tabla 5*Ventanas horarias por punto de entrega de la ZONA_LO_GYE_003*

Id. local	Inicio ventana de tiempo	Fin ventana de tiempo	Inicio de ventana (min)	Fin de ventana (min)	Tiempo de servicio (minutos)
DI03	08h00	11h00	480	660	15
G049	07h00	09h30	420	540	15
H022	07h00	09h30	420	540	10
K153	08h00	18h00	480	1080	20
K025	08h00	18h00	480	1080	20
K094	07h00	09h30	420	540	20
K165	07h00	09h30	420	540	20
M047	07h00	09h30	420	540	15

Nota. Elaboración Propia (2025).

Por otra parte, cabe mencionar que ciertos locales al estar ubicados en los patios de comida de los centros comerciales, cuentan con dos ventanas horarias. El inicio de la primera ventana horaria se da en horario de la mañana que empieza entre las 07h30 a 08h00, mientras para la tarde se abre un segundo horario de recepción a partir de las 15h00. Asimismo, como se puede identificar en la Tabla 6, para ciertos locales el inicio de la segunda ventana horaria se da en la noche a las 19h00, debido a su ubicación en el centro de la ciudad los cuales por normativa municipal solo podrán hacer la descarga en horario de la mañana o en la noche .

Tabla 6*Locales de la zona ZONA_LO_GYE_008 con dos ventanas horarias*

Id. local	Inicio ventana 1	Fin ventana 1	Inicio ventana 2	Fin ventana 2
----------------------	-----------------------------	--------------------------	-----------------------------	--------------------------

G045	08h00	20h00		
K052	07h30	09h00	15h00	17h30
K029	07h30	09h00	15h00	17h30
K055	07h30	08h30	19h00	21h30
K076	07h30	08h30	19h00	21h30
M058	07h30	09h00	15h00	17h30
T051	08h00	09h00	15h00	16h00

Nota. Elaboración Propia (2025).

2.6 Análisis de la Situación Actual

Una vez recopilada y procesada la información, se elaboró la representación de la situación actual, la cual servirá como punto de referencia para contrastar los resultados obtenidos con la solución propuesta. En la Tabla 7 se presenta el cronograma semanal por zona. Como se observa, de martes a domingo exceptuando los jueves se atienden 13 zonas diarias, lo que implica la utilización de 13 camiones por día. En contraste, los lunes solo se atienden tres zonas, por lo que se requiere únicamente la operación de tres camiones.

Tabla 7

Cronograma de entregas semanal actual

CRONOGRAMA POR RUTA

LU	MA	MI	JU	VI	SA	DO
	ZONA_LO_GYE_003	ZONA_LO_GYE_003		ZONA_LO_GYE_003	ZONA_LO_GYE_003	ZONA_LO_GYE_003
	ZONA_LO_GYE_004	ZONA_LO_GYE_004		ZONA_LO_GYE_004	ZONA_LO_GYE_004	ZONA_LO_GYE_004
	ZONA_LO_GYE_005	ZONA_LO_GYE_005		ZONA_LO_GYE_005	ZONA_LO_GYE_005	ZONA_LO_GYE_005
	ZONA_LO_GYE_006	ZONA_LO_GYE_006		ZONA_LO_GYE_006	ZONA_LO_GYE_006	ZONA_LO_GYE_006
ZONA_LO_GYE_007	ZONA_LO_GYE_007	ZONA_LO_GYE_007		ZONA_LO_GYE_007	ZONA_LO_GYE_007	ZONA_LO_GYE_007
ZONA_LO_GYE_008	ZONA_LO_GYE_008	ZONA_LO_GYE_008		ZONA_LO_GYE_008	ZONA_LO_GYE_008	ZONA_LO_GYE_008
	ZONA_LO_GYE_009	ZONA_LO_GYE_009		ZONA_LO_GYE_009	ZONA_LO_GYE_009	ZONA_LO_GYE_009
	ZONA_LO_GYE_010	ZONA_LO_GYE_010		ZONA_LO_GYE_010	ZONA_LO_GYE_010	ZONA_LO_GYE_010
	ZONA_LO_GYE_011	ZONA_LO_GYE_011		ZONA_LO_GYE_011	ZONA_LO_GYE_011	ZONA_LO_GYE_011
	ZONA_LO_GYE_048	ZONA_LO_GYE_048		ZONA_LO_GYE_048	ZONA_LO_GYE_048	ZONA_LO_GYE_048
	ZONA_LO_GYE_050	ZONA_LO_GYE_050		ZONA_LO_GYE_050	ZONA_LO_GYE_050	ZONA_LO_GYE_050
ZONA_LO_GYE_051	ZONA_LO_GYE_051	ZONA_LO_GYE_051		ZONA_LO_GYE_051	ZONA_LO_GYE_051	ZONA_LO_GYE_051
	ZONA_LO_GYE_053	ZONA_LO_GYE_053		ZONA_LO_GYE_053	ZONA_LO_GYE_053	ZONA_LO_GYE_053

Nota. Elaboración Propia (2025)

Cada zona tiene asignado un tipo de camión según su tonelaje, tal como se detalla en la Tabla 8. Esta asignación se mantiene de manera fija, independientemente del volumen o características del pedido, debido a que los locales pertenecientes a cada zona no se redistribuyen. En consecuencia, cada vehículo debe despachar los pedidos de forma consolidada, atendiendo estrictamente los requerimientos de los clientes asignados a su ruta. Si bien esta estructura facilita el control operativo de las rutas y de la flota, también implica que la empresa no preste suficiente atención al nivel de utilización de la capacidad de los vehículos, lo que puede derivar en una subutilización significativa de la flota.

Tabla 8

Número de viajes por zona y costo por flete de la semana 43 del 2025.

Número de zonas a visitar	Flete por camión	N. de viajes semanales	Costo total flete/semana
12	\$110	5	\$6600
1	\$143	6	\$858
<i>Total costo por flete semanal</i>			\$7678

Nota. Elaboración Propia (2025)

Por otro lado, cada vehículo, según su tonelaje, genera un costo de flete asociado, dado que toda la flota utilizada es subcontratada. Por lo tanto, cada zona presenta un costo operativo diario, que, al sumarse según la frecuencia de atención semanal, resulta en un costo por flete elevado. Esta situación evidencia que la alta frecuencia de entregas, combinada con la asignación fija de camiones, contribuye de manera significativa al aumento de este tipo de costos logísticos.

El costo de flete semanal asciende a \$7,600, calculado a partir de las zonas visitadas y la flota utilizada diariamente. Al proyectar este valor a un mes, el gasto total alcanza los \$30,712.

Esta situación representa un punto crítico para la empresa, ya que la planificación de rutas y frecuencias se ha llevado a cabo de manera empírica no les ha permitido reducir esta frecuencia actual, aquello resulta en costos elevados por mes, los cuales podrían ser utilizados como un costo de oportunidad para otros proyectos de mejora continua.

Con el fin de hacer una propuesta de mejora, es importante analizar la utilización de cada camión utilizado. De esta forma, en la Tabla 9, se describe la capacidad de la flota expresada en jabas que será nuestra unidad de medida para la consolidación de la carga.

La jaba constituye la unidad física utilizada para el almacenamiento y transporte de los productos refrigerados y congelados. Se trata de un contenedor plástico estandarizado empleado por la empresa para proteger la mercancía durante la manipulación y la distribución. Cada jaba posee dimensiones promedio de $60\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ aproximadamente, con un volumen útil cercano a $0,072\text{ m}^3$ (72 litros), lo que permite una estimación homogénea del espacio requerido por los pedidos independientemente del tipo de producto almacenado.

Dado que la restricción operativa predominante en las rutas es el espacio volumétrico disponible en la caja del camión, la empresa ha decidido que la planificación se estructure en función del número de jabas que puede transportar cada unidad.

La capacidad máxima de 160 jabas para un camión de 4 toneladas resulta coherente con las dimensiones internas típicas de este tipo de vehículo. Cada jaba presenta un volumen de $0,072\text{ m}^3$, por lo que 160 unidades requieren aproximadamente $11,52\text{ m}^3$ de espacio útil. Esta demanda volumétrica puede satisfacerse mediante una disposición de 40 jabas por capa en una superficie cercana a 4,8 m de largo por 2,0 m de ancho, apiladas en cuatro niveles que suman 1,2 m de altura, medidas compatibles con las cajas de carga habituales en camiones de dicha capacidad.



Ilustración 4: Jaba mediana utilizada por la empresa

En la Tabla 9 se presenta la ocupación promedio actual de los camiones, información obtenida a partir de las guías de transporte proporcionadas por la empresa. Estos datos permiten caracterizar la situación operativa vigente y estimar el nivel real de utilización de la flota. En promedio, los vehículos registran una ocupación del 73%.

Tabla 9

Capacidad de la flota y su utilización (semana 43)

Zona	Tonelaje del camión	Capacidad de la flota (jabas)	Ocupación actual (jabas)	%Utilización
ZONA_LO_GYE_010	4	160	127	79%
ZONA_LO_GYE_050	5	180	98	54%
ZONA_LO_GYE_003	6.5	220	200	91%
ZONA_LO_GYE_009	5.5	200	196	98%
ZONA_LO_GYE_004	7	220	151	69%
ZONA_LO_GYE_011	4	160	66	41%
ZONA_LO_GYE_053	4.5	180	160	89%
ZONA_LO_GYE_006	3.5	160	143	89%
ZONA_LO_GYE_005	5	180	98	54%
ZONA_LO_GYE_048	5	180	160	89%
ZONA_LO_GYE_008	5	180	114	63%

ZONA_LO_GYE_051	5	180	120	67%
ZONA_LO_GYE_007	5	180	121	67%

Nota. Elaboración Propia (2025)

Se puede evidenciar que, a pesar de que cada camión tiene una capacidad definida en jabas, la ocupación actual no siempre alcanza el máximo disponible. Por ejemplo, zonas como ZONA_LO_GYE_004 y ZONA_LO_GYE_011 presentan niveles de utilización de 41% y 54%, respectivamente, lo que indica que más de la mitad de la capacidad del vehículo no se está aprovechando. Por otro lado, algunas zonas alcanzan niveles cercanos a la capacidad total, como ZONA_LO_GYE_009 con un 98% de ocupación, mostrando que en ciertos casos la flota está siendo usada casi en su totalidad. Esta subutilización representa un costo innecesario, ya que los camiones salen a ruta sin operar a plena capacidad.

Por último, la Tabla 10 presenta la duración y la distancia total de los recorridos por zona. Se observa que todas las zonas cumplen con la restricción de tiempo máximo de 7 horas, necesaria para garantizar la conservación de la cadena de frío de los productos. No obstante, en posteriores conversaciones con la empresa, se nos indicó que si se extiende el tiempo de recorrido a 7 horas existe la posibilidad de perder la frescura de los productos por lo que se recomienda manejar un tiempo de recorrido de hasta 5 horas por día.

En promedio, cada recorrido tiene una duración de aproximadamente 3.5 horas por zona. Esta información permite que, en la mejora que se debe plantear, se pueda considerar la extensión de los recorridos, siempre y cuando se tenga en cuenta la capacidad de los camiones y las restricciones de ventanas horarias, asegurando así la eficiencia operativa sin comprometer la calidad de los productos.

Tabla 10*Distancia y tiempo total recorrido por zona de la semana 43 del año 2025*

Zona	Distancia del recorrido (MA-MI-VI-SA-DO) (km)	Distancia del recorrido (LU) (km)	Duración del recorrido (h) (MA-MI-VI-SA-DO)	Duración del recorrido (h) (LU)
ZONA_LO_GYE_010	54.09		4	
ZONA_LO_GYE_050	52.7		4	
ZONA_LO_GYE_003	31.63		3	
ZONA_LO_GYE_009	43.57		4	
ZONA_LO_GYE_004	21	21	3.5	3.5
ZONA_LO_GYE_011	29.7	29.7	3	3
ZONA_LO_GYE_053	49.66		4.5	
ZONA_LO_GYE_006	30.3		4	
ZONA_LO_GYE_005	18.71		3.5	
ZONA_LO_GYE_048	37.29		3	
ZONA_LO_GYE_008	32.38		3	
ZONA_LO_GYE_051	26.35	26.35	3	3
ZONA_LO_GYE_007	26.17		3	
<i>Total por día</i>	490.31	77.05	60.5 h	9.5 h

Nota. Elaboración Propia (2025)

2.7 Modelo matemático

A partir del análisis de la situación actual, se identificó el modelo matemático que describe adecuadamente la problemática y que servirá como base para su resolución. Para la implementación del modelo, se debe iniciar con el cálculo de una nueva asignación de frecuencias de visita por local, con el fin de evaluar si una redistribución distinta puede generar mejoras frente al cronograma vigente. Una vez determinadas dichas frecuencias, se deberán recalcular las rutas por día para establecer un nuevo cronograma de visitas que minimice la distancia total semanal

recorrida. De esta manera, en las siguientes secciones se detalla la metodología empleada, que incluye la formulación del modelo matemático y la heurística propuesta para abordar de manera eficiente el problema planteado.

2.7.1 Asignación de frecuencia de visita por local

Para la resolución del presente caso de estudio, se inicia con la determinación de una nueva frecuencia de visita a los locales, partiendo desde la premisa que los establecimientos estudiados reciben entre cinco y seis visitas semanales. De tal forma, se ha tomado como referencia el cálculo planteado por (Coene, Arnout, & Spieksma, 2008) , para la determinación de una nueva asignación de frecuencia para cada cliente.

Con base en datos históricos de los pedidos de los locales, se determinó la demanda promedio diaria en jabas y la capacidad máxima que puede almacenar en su ubicación. Para efectos de este estudio y en conformidad con la empresa, se ha determinado la capacidad de almacenamiento por local medida en jabas , como el máximo respecto al histórico de la demanda y la demanda promedio diaria.

$$\begin{aligned} \mathbf{capacidad_almacenamiento}_i & \\ &= \mathbf{MAX(demanda_historica}_i, \mathbf{demanda_promedio}_i) \end{aligned} \tag{12}$$

Con esta información y en consulta con el cliente, se calcula una frecuencia de visita (f_i) para cada local ***Frecuencia de vista (f_i)*** (=) respecto a la demanda promedio , la frecuencia actual (T) y la capacidad de almacenamiento. Asimismo, se calcula una demanda q_i equivalente por visita, que depende de esta frecuencia $qi = \frac{\mathbf{demanda_promedio}_i * T}{f_i}$.

$$\text{Frecuencia de vista } (f_i) = \left\lceil \frac{\text{demanda_promedio}_i * T}{\text{capacidad_almacenamiento}_i} \right\rceil \quad (13)$$

$$q_i = \frac{\text{demanda_promedio}_i * T}{f_i} \quad (14)$$

De esta manera, se define una nueva propuesta de frecuencia de entrega y demanda sugerida por local y por día para atender la necesidad de cada cliente, como se visualiza en la Tabla 11. Esta nueva asignación de demanda y frecuencia servirá como datos de entrada para la planificación y asignación de días para el nuevo cronograma de visita para los locales.

Tabla 11

Cálculo de las nuevas frecuencias de entrega y demanda diaria en jabas por local de ZONA_LO_GYE_003

Id. local	Frecuencia actual (días)	Demanda promedio actual	Capacidad de almacenamiento	Frecuencia de visita (f_i)	Demanda (q_i)
DI03		1	3	2	3
G049		10	18	4	13
H022		1	1	5	1
K153	5	12	33	2	30
K025		19	43	3	32
K094		14	19	4	18
K165		13	22	3	22
M047		8	16	3	14

Nota. Elaboración Propia (2025).

Una vez que se ha determinado la frecuencia f_i para cada local, se generan todas las posibles combinaciones de días de visita dentro del período de planificación. De tal manera que, para los locales cuya frecuencia sea inferior a 5 días, se consideran patrones intercalados de atención, es decir, estos podrán ser visitados cada 2 días (empezando desde el domingo como día

1, debido a la mayor demanda registrada durante el fin de semana.). Este conjunto de combinaciones constituye los patrones admisibles de visita para cada cliente y será utilizado posteriormente en la asignación periódica y construcción de rutas.

2.7.2 Modelo de ruteo periódico con ventanas de tiempo (PVRP- TW)

Para continuar con el análisis y resolución del caso de estudio, en este segmento, se plantea el modelo del problema periódico de ruteo con ventanas de tiempo (PVRP- TW). El objetivo del modelo es seleccionar, para cada cliente, un patrón de días de visita (cronograma) y construir las rutas diarias asociadas, de modo que se minimice la distancia total recorrida durante todo el horizonte de planificación, garantizando simultáneamente el cumplimiento de las ventanas de tiempo, la capacidad de la flota y el tiempo máximo de recorrido permitido por jornada.

Este modelo matemático ha sido de gran utilidad para la resolución de la problemática, dado que permite determinar la asignación de días de acuerdo con la frecuencia de visita a los locales (f_i). Para cada cliente i se define el conjunto L_i de patrones de visita admisibles, donde cada patrón especifica exactamente los períodos en los que el cliente debe ser atendido. Dichos patrones respetan la frecuencia requerida f_i que representa el número total de visitas requeridas en el horizonte de planificación, calculado en el paso anterior. Por ejemplo, si el horizonte semanal está compuesto por los días $D = \{1, \dots, 7\}$ y un cliente requiere dos visitas semanales ($f_i = 2$), entonces un conjunto típico de patrones admisibles podría ser:

$$L_i = \{\{1,3\}, \{2,4\}, \{3,5\}, \{4,6\}, \{5,7\}\},$$

donde cada elemento indica los días específicos en que el cliente sería atendido siguiendo una estructura intercalada de visitas.

Índices

i : locales a entregar (nodos de partida + depósito) = $\{0,1,2, \dots, n\}$

j : locales a entregar (nodos de llegada + depósito) = $\{0,1,2, \dots, n\}$

k : vehículos disponibles = $\{1,2, \dots, m\}$

p : combinaciones o patrones permitidas $\in L_i = \{\{1,2\}, \{1,3\}, \dots, \{n, l\}\}$

l : día del horizonte de planificación = $\{1,2,3, \dots, t\}$

Parámetros

d_{ij} : matriz de distancias para cada arco $A \in (i, j)$

σ_{ij} : matriz de tiempos para cada arco $A \in (i, j)$

$comb_{pl}$: constante binaria igual a 1 si el día l pertenece al patrón $p = \{(1,1) = 1, (1,2) = 0, (1,3) = 0, \dots, (p + 1, t)\}$

$serv_i$: tiempo de duración del servicio a cada local i

a_i : inicio de ventana de tiempo de nodo i

b_i : final de ventana de tiempo de nodo i

q_i : Demanda por local i

$Tmax$: tiempo máximo de recorrido.

Q_k : Capacidad de cada vehículo k

Escalares

M Definimos un valor muy grande

Variables de decisión

x_{ijkl} : $\begin{cases} 1 \text{ si se asigna el vehículo } k \text{ para recorrer en el día } l \text{ el arco del nodo } i \text{ al nodo } j \\ 0 \text{ caso contrario} \end{cases}$

y_{ip} : $\begin{cases} 1 \text{ si cada local } i \text{ es asignado a un patrón } p \text{ disponible,} \\ 0 \text{ caso contrario} \end{cases}$

t_{ikl} : representa el servicio en el cliente i cuando es atendido por el vehículo k en el día l .

Función objetivo:

$$\text{Minimizar } \sum_i \sum_j \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^t d_{ij} x_{ijkl}$$

(¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)

$$\sum_{p \in L_i} y_{ip} = 1, \forall i \neq 0 \quad (15)$$

$$\sum_j \sum_{k=1}^m x_{ijkl} - \sum_{p \in L_i} comb_{pl} y_{ip} = 0, \quad \forall i \neq 0; \forall l = \{1, \dots, t\} \quad (16)$$

$$\sum_{j \neq 0} x_{ijkl} = \sum_{j \neq 0} x_{jikl}, \quad \forall i \neq 0; \forall k = \{1, \dots, m\}; \forall l = \{1, \dots, t\} \quad (17)$$

$$\sum_{j \neq 0} x_{0jkl} = 1, \quad \forall k = \{1, \dots, m\}; \forall l = \{1, \dots, t\} \quad (18)$$

$$\sum_{j \neq 0} x_{j,0,kl} = 1, \quad \forall k = \{1, \dots, m\}; \forall l = \{1, \dots, t\} \quad (19)$$

$$\sum_i \sum_j q_i x_{ijkl} \leq Q, \quad \forall k = \{1, \dots, m\}; \forall l = \{1, \dots, t\} \quad (20)$$

$$serv_i + \sigma_{ij} + t_{ikl} \leq t_{jkl} + M(1 - x_{ijkl}); \quad \forall i, \forall j, \forall k = \{1, \dots, m\}; \forall l = \{1, \dots, t\} \quad (21)$$

$$a_i \leq t_{ikl} \leq b_i; \quad \forall i, \forall k = \{1, \dots, m\}; \forall l = \{1, \dots, t\} \quad (22)$$

$$\sum_i \sum_j \sigma_{ij} x_{ijkl} + \sum_{i \neq 0} serv_i \sum_j x_{i,j,kl} \leq Tmax; \quad (23)$$

$$\forall k = \{1, \dots, m\}; \forall l = \{1, \dots, t\}$$

$$x_{ijkl} \in \{0, 1\}; \quad \forall i, \forall j, \forall k = \{1, \dots, m\}; \forall l = \{1, \dots, t\} \quad (24)$$

$$y_{ip} \in \{0, 1\}; \quad \forall i, \forall p \in L_i \quad (25)$$

$$t_{ikl} \geq 0; \quad \forall i, \forall k = \{1, \dots, m\}; \forall l = \{1, \dots, t\} \quad (26)$$

Este modelo está constituido de tres grupos de restricciones principales: 1) asignación de patrones a clientes y su impacto en las rutas (15–16) , 2) restricciones de capacidad y conservación de flujo (17-20) , 3) restricciones de tiempo de servicio y duración del recorrido (21-23).

La ecuación (14) pertenece a la función objetivo, la cual busca minimizar la distancia total recorrida por todos los vehículos en todos los días del horizonte de planificación. Cada local debe elegir exactamente un patrón p permitido (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y este debe ser atendido únicamente en los días indicados por dicho patrón (15). Si el patrón p dice que el local tiene que atenderse en ese día, deben existir arcos que lo visiten, caso contrario, el arco no debe aparecer en ninguna ruta de ese día.

Para evitar rutas abiertas y no continuas, la ecuación (16) exige la conservación de flujo en la ruta, es decir, si el vehículo llega a un cliente, también debe salir de él. Asimismo, las restricciones (17)-(18) exigen cada vehículo debe iniciar exactamente una ruta en cada día y esta debe salir y regresar al depósito.

La ecuación (14) asegura que la demanda total atendida por un vehículo en un día no exceda su capacidad de carga. Por último, las ecuaciones (20)- (22) aseguran que los tiempos de inicio de servicio respeten estrictamente las ventanas de tiempo de cada cliente y que la duración total de cada ruta no exceda tiempo máximo de recorrido permitido, lo cual es ideal para el presente caso en el que se debe preservar la cadena de frío de los alimentos. Bajo la suposición de que el grafo no admite ciclos con un tiempo total de recorrido igual a 0, los subciclos quedan implícitamente eliminados por la ecuación (21).

2.7.3 Heurística Periódica de Construcción-Mejora para el PVRPTW

Dado que el PVRPTW pertenece a la clase de problemas fuertemente NP-hard, ya que contiene como casos particulares al VRPTW (Solomon, 1987) y al CVRP (Garey & Johnson, 1979), su resolución mediante algoritmos exactos se vuelve complejo para instancias de tamaño medio o grande, debido al crecimiento exponencial del espacio de búsqueda y al elevado número de combinaciones posibles entre patrones de visita, asignación de clientes, secuenciación y restricciones temporales. Además, la naturaleza combinatoria del problema, reforzada por la presencia de ventanas de tiempo, múltiples periodos y limitaciones de capacidad. En este contexto, las metaheurísticas constituyen una alternativa robusta y eficiente, capaces de explorar soluciones de alta calidad en tiempos computacionales razonables mediante mecanismos de búsqueda global.

Heurística propuesta:

Una vez determinada la frecuencia de visita requerida para cada cliente (Sección 2.7.1), se emplea una heurística compuesta diseñada para abordar de forma eficiente la complejidad combinatoria del PVRPTW.

El método propuesto se estructura en tres etapas. En primer lugar, se establece un orden de asignación basado en la clusterización de clientes y en el conjunto de escenarios o combinaciones de días disponibles para su atención. Posteriormente, se aplica un procedimiento constructivo de rutas por vehículo basado en una heurística de la inserción más lejana orientada al tiempo, que genera rutas factibles considerando simultáneamente distancias, ventanas horarias, tiempos de servicio y límite máximo de duración del recorrido. Finalmente, los clientes no asignados durante la fase constructiva inicial son evaluados mediante un esquema de inserciones posicionales factibles, seguido de una fase de mejora local 2-opt con verificación de ventanas de tiempo. La integración de estos tres componentes permite obtener soluciones

factibles de buena calidad, combinando exploración global, construcción greedy de rutas y una mejora local dentro de un algoritmo heurístico eficiente para el PVRPTW.

2.7.3.1 Fase inicial: Asignación de clusters por día por medio de K _medoids

Como punto de partida del algoritmo heurístico propuesto, se tomó como referencia la heurística propuesta por (Coene, Arnout, & Spieksma, 2008).

La asignación de días de visita se realiza en dos etapas. En primer lugar, se aplica el algoritmo k-medoids sobre la matriz de distancias entre clientes, con el objetivo de agruparlos en una cantidad de k-clusters de proximidad geográfica, minimizando la distancia total entre cada cliente y el centroide de su clúster. Cada clúster representa un conjunto de clientes cercanos geográficamente, por tanto, al estar agrupados son susceptibles de ser atendidos en los mismos días.

En una segunda etapa, a cada clúster se le asigna un patrón de días de visita factible, considerando las frecuencias requeridas por los clientes que lo componen. La asignación se ejecuta de manera que se respeten las restricciones de frecuencia de visita semanal y se distribuya la carga de trabajo o la operación a lo largo del horizonte de planificación, utilizando el clúster como referencia para la coherencia espacial de las visitas.

Algoritmo 1 : Clusterización K-medoids

Input:

C_d : Conjunto de locales

k : Número de k clusters.

D_{ij}, T_{ij} : Matrices de distancia y tiempo

f_i frecuencias por local

Output:

CL : Conjunto de clústers k

Asignación[c]

1: **Inicialización** : Seleccionar aleatoriamente k puntos de C_d como medoids iniciales.

2: **Para cada** punto $i \in C_d$ **hacer**

```

3:   Calcular la distancia  $D_{ij}$  a cada medoid  $m_i$ 
4:   Asignar  $i$  al medoid más cercano.
5:   Agregar al nuevo clúster  $CL$ 
6:   Para cada clúster  $CL$  hacer
7:       Calcular la suma de distancias de cada punto del clúster a
      todos los demás puntos del clúster.
8:       Elegir como nuevo medoid ( $m_i$ ) el punto  $i$  que minimice esta
      suma de distancias.
9:   Detenerse si se alcanza el número máximo de iteraciones o si los
      medoids no cambian entre iteraciones.
10:  Asignar clústeres a días según la frecuencia  $f_i$  de los locales
11:  Para cada clúster  $CL$ 
12:      Para cada cliente  $i \in CL$ 
13:          Generar todos los escenarios de días compatibles  $f_i$ 
14:           $mejor_{escenario} \leftarrow \emptyset$ ;  $Mejor\ costo \leftarrow +\infty$ 
15:          Para cada escenario  $esc$ 
16:              Para cada día  $d \in esc$ 
17:                  Si  $CL \notin clusters\_dia[d]$ :
18:                       $costo \leftarrow costo + penalización\_apertura$ 
19:                      Si  $clientes\_dia[d] \geq MaxClientes\ Dia$ :
20:                           $costo \leftarrow costo + penalización\_fuerte$ 
21:                      Si  $costo < Mejor\ costo$ :
22:                           $Mejor\ costo \leftarrow costo$ 
23:                           $mejor_{escenario} \leftarrow esc$ 
24:                       $asignación[c] \leftarrow mejor_{escenario}$ 
25:  Retornar  $Asignación[c]$ ;

```

2.7.3.2 Construcción Greedy de la heurística de inserción más lejana con ventanas de tiempo

Una vez se ha ordenado y agrupado la lista de clientes en clústers asignados por día, la heurística propuesta combina un procedimiento constructivo basado en la inserción del cliente más lejano con verificación explícita de ventanas de tiempo y límite máximo de duración, asignando a cada vehículo la mejor ruta posible evaluando todos los candidatos disponibles. Esta estrategia es una adaptación de la heurística planteada por (Rosenkrantz, Stearns, & Lewis, 1977), en la cual cada nueva ruta se inicia seleccionando al cliente no enrutado que se encuentra más alejado del depósito. En cada iteración subsecuente, el proceso continúa insertando el siguiente cliente más lejano respecto a los clientes ya asignados a la ruta, considerando las

ventanas de tiempo, el tiempo de regreso del vehículo al depósito y las restricciones de capacidad. Se inicia una nueva ruta cada vez que no es posible insertar ningún cliente adicional en la ruta actual, hasta que todos los clientes hayan sido programados.

Algoritmo 2 : Heurística de inserción más lejana

Input:

C_d : Conjunto de locales del día d
 k : Conjunto de vehículos disponibles
 Q_k : capacidad del vehículo
 D_{ij}, T_{ij} : Matrices de distancia y tiempo
 $[a_i, b_i]$: Ventanas de tiempo (inicio, fin)
 T_{max} : Duración máxima del recorrido

Output:

R_d : Conjunto de rutas factibles para el día d

```

1:  $R_d \leftarrow \emptyset$ ;  $C \leftarrow C_d$ ;  $K_{disponible} \leftarrow k$ 
2: Mientras  $C \neq \emptyset$  y  $K_{disponible} \neq \emptyset$  hacer
3:   mejorRuta  $\leftarrow \emptyset$ ; mejorDistancia  $\leftarrow +\infty$ 
4:   Para cada vehículo  $k \in K_{disponible}$  hacer
5:      $r \leftarrow (0)$  depósito; carga  $\leftarrow 0$ ;  $t \leftarrow 0$ 
6:     nodo_actual  $\leftarrow 0$ ; DistanciaRuta  $\leftarrow 0$ 
7:      $C_{restante} \leftarrow C$ 
8:     Mientras  $C_{restante} \neq \emptyset$  hacer
9:       Candidato  $\leftarrow \text{Null}$ ; mejorCosto  $\leftarrow +\infty$ 
10:      Para cada  $i \in C_{restante}$  hacer
11:        Si carga +  $q_i < Q_k$  entonces
12:           $t_{llegada} \leftarrow t + T_{actual,i}$ 
13:          Si  $t_{llegada} < b_i$  entonces
14:             $t_{inicioservicio} \leftarrow \max(t_{llegada}, a_i)$ 
15:             $t_{recorrido} \leftarrow t_{inicioservicio} + serv_i + T_{i,0}$ 
16:            Si  $t_{recorrido} > T_{max}$  entonces
17:              continuar con siguiente  $i$ 
18:            Si  $D_{actual,i} < mejorCosto$  entonces
19:              mejorCosto  $\leftarrow D_{actual,i}$ ; mejorCosto  $\leftarrow i$ 
20:          Fin Para
21:           $r.agregar(candidato)$ 
22:          DistanciaRuta  $\leftarrow DistanciaRuta + D_{actual,candidato}$ 
23:           $t \leftarrow \max(t + T_{actual,candidato} + a_{candidato}, serv_{candidato})$ 
24:          carga  $\leftarrow carga + demanda_{candidato}$ 
25:           $C_{restante} \leftarrow C_{restante} \setminus \{candidato\}$ 
26:        Fin Mientras
27:      Si DistanciaRuta < mejorDistancia entonces
28:        mejorDistancia  $\leftarrow DistanciaRuta$ ; mejorRuta  $\leftarrow r$ 
29:    Fin Para
30:   $R_d \leftarrow R_d \cup \{mejorRuta\}$ 

```

```

31:    $K_{disponible} \leftarrow K_{disponible} \setminus k\{mejorRuta\}$ 
32: Fin Mientras
33: Retornar  $R_d$ 

```

2.7.3.3 Inserción Factible en Rutas Existentes

Una vez las rutas han sido construidas preliminarmente para cada vehículo por día disponible para la visita a cada punto de entrega, el algoritmo incorpora un algoritmo de inserción posicional factible que intenta integrar a clientes faltantes en rutas existentes preservando la capacidad y la factibilidad temporal; caso contrario, reconstruye el día completo mediante la misma estrategia greedy. Esta parte, se utiliza principalmente, para los clientes que no hayan sido asignados previamente a una ruta o para el caso de los clientes con frecuencia igual a 1 día, de forma, que se evalúe la inserción cuya ruta y día se vea menos afectado en cuanto a distancia total recorrida. Para clientes con frecuencias periódicas, el método evalúa todas las combinaciones admisibles de días y selecciona aquella que minimiza el coste total, aplicando inserción o reconstrucción según corresponda.

Algoritmo 3 : Inserción Factible en Rutas Existentes

Input:

R_d : Conjunto de rutas diarias
 q_i : Demanda por local
 Q_k : capacidad del vehículo
 i : local no asignado

Output:

$R_{completa}$: Mejor inserción encontrada

```

1:  $mejorInsercion \leftarrow \text{Nulo}$  ;  $mejorCosto \leftarrow \infty$ 
2: Para cada  $ruta \in R_d$  hacer
3:   Si  $carga(ruta) + q_{ruta} < Q_k$  entonces
4:     Para cada  $pos=1$  hasta  $|ruta| - 1$  hacer
5:        $rcompleta \leftarrow$  insertar  $i$  en  $r$  en la posición  $pos$ 
6:       Si  $rcompleta \leftarrow$  es Factible en tiempo y
        $Trecorrido(rcompleta) < T_{max}$  entonces
7:          $costo\_insercion \leftarrow$   $\text{Distanciatotal}(rcompleta)$ 

```

```

8:      Si  $\text{costo\_insercion} < \text{mejorCosto}$  entonces
9:       $\text{mejorCosto} \leftarrow \text{costo\_insercion}$ 
10:      $\text{mejorInsercion} \leftarrow r_{\text{completa}}$ 
11:  Fin Para
12: Fin Para
13:  $R_{\text{completa}} \leftarrow \text{mejorInsercion}$ 
14: Retornar  $R_{\text{completa}}$ 

```

2.7.3.4 Mejora local 2-opt

Por último, una vez establecidas las rutas por vehículo de acuerdo con el cronograma de entregas, es decir, los días seleccionados para realizar las visitas a los locales según su frecuencia, se procede a hacer una mejora local.

Cada ruta es refinada mediante una búsqueda local 2-Opt con una verificación de ventanas de tiempo, lo que permite reducir la distancia total sin comprometer la factibilidad.

Este algoritmo introducido originalmente por Croes (1958), consiste en intercambiar repetidamente dos aristas del recorrido para encontrar uno más corto. El proceso implica eliminar dos aristas, invertir la sección del recorrido comprendida entre ellas y reconectar el tour, lo que potencialmente elimina cruces y produce trayectorias más cortas. Si la ruta resultante es factible y presenta una distancia menor que la actual, se reemplaza la ruta y el procedimiento continúa hasta que no se encuentren mejoras adicionales.

Algoritmo 4 : Mejora local 2-opt con ventanas de tiempo

Input:

r : Ruta factible
 D_{ij}, T_{ij} : Matrices de distancia y tiempo
 $[a_i, b_i]$: Ventanas de tiempo (inicio, fin)
 T_{max} : Duración máxima del recorrido

Output:

R_{opt} : Ruta mejorada con el intercambio 2-Opt

```

1:  $R_{opt} \leftarrow r$  ;  $\text{MejorCosto} \leftarrow \text{Costo}(R_{opt})$  ;  $\text{Rutamejorada} \leftarrow \text{verdadero}$ 
2: Mientras  $\text{Rutamejorada}$  hacer
3:    $\text{Rutamejorada} \leftarrow \text{falso}$ 
4:   Para  $i=1$  hasta  $|\text{Rutamejorada}| - 2$  hacer
5:     Para  $j=i+1$  hasta  $|\text{Rutamejorada}| - 1$ :

```

```

6:       $R_{nueva} \leftarrow R_{opt}$ ;
7:       $R_{nueva}[i + 1 : j] \leftarrow \text{Reversar}(R_{opt}[i + 1 : j])$ 
8:      tiempo  $\leftarrow 0$ ; factible  $\leftarrow$  verdadero
9:      Para cada  $k = 1$  hasta  $|R_{nueva}| - 1$ 
10:          $anterior \leftarrow R_{nueva}[k - 1]$ ;  $actual \leftarrow R_{nueva}[k]$ 
11:          $tiempo \leftarrow tiempo + T_{anterior, actual}$ 
12:         Si  $tiempo < b_{actual}$  entonces
13:             $tiempo \leftarrow \max(tiempo, a_{actual})$ 
14:         Sino : factible  $\leftarrow$  falso ; romper
15:          $tiempo \leftarrow tiempo + serv_{actual}$ 
16:         Si  $tiempo > T_{max}$  entonces
17:            factible  $\leftarrow$  falso
18:         Si  $DistanciaTotal[R_{nueva}] < DistanciaTotal[R_{opt}]$ 
entonces
19:             $R_{opt} \leftarrow R_{nueva}$  ;  $Rutamejorada \leftarrow$  verdadero
20:         Fin Para
21:     Fin Para
22:     Fin Para
32: Fin Mientras
33: Retornar  $R_{opt}$ 

```

2.7.3.5 Heurística Periódica Completa

Algoritmo 5 : Heurística Periódica de Construcción-Mejora para el PVRPTW

Input:

i : locales
 f_i frecuencias por local
 T : Horizonte de planificación

Output:

R_d : Conjunto de rutas factibles por día

```

1: Para  $d=1$  hasta  $T$  hacer
2:    $R_d \leftarrow \emptyset$ ;  $Agenda_d \leftarrow \emptyset$ ;
3: Fin Para
4:  $C_{ordenado} \leftarrow$ 
   Ordenar locales por  $f_i$  (Descendente) agrupados en cada cluster  $CL$ 
5: Si frecuencias ( $f_i$ ) son iguales, ordenar por  $q_i$ 
6: Para cada local  $i$  con  $f_i > 1$  hacer
7:    $Combos \leftarrow$  Generar combinaciones posibles para  $f_i$ 
8:   Asignado  $\leftarrow$  falso
9:   Para cada combinación  $C$  en  $Combos$  hacer
10:     combo_factible  $\leftarrow$  verdadero
11:     Para cada  $d \in C$  hacer
12:        $Agenda_{temp} \leftarrow Agenda_d \cup i$ 

```

```

13:      ( $R_{temporal}, i_{faltantes}$ )  $\leftarrow$  Alg2( $Agenda_{temp}$ )
14:      Para cada  $j \in i_{faltantes}$  hacer
15:           $R_{nueva} \leftarrow$  Alg3(insercion de j en  $R_{temporal}$ )
16:          Si  $R_{nueva} \neq Nulo$  entonces
17:               $R_{temporal} \leftarrow R_{nueva}$ 
18:          Fin Para
19:       $R_d \leftarrow R_{temporal}; Agenda_d \leftarrow Agenda_{temp}; asignado \leftarrow$ 
verdadero
20:      Fin Para
21:      Fin Para
22:      Si combo_factible  $\leftarrow$  falso entonces Romper
23: Fin Para
    Mejora local
24: Para  $d=1$  hasta  $T$  hacer
25:     Para cada  $r \in R_d$  hacer
26:          $R_{opt} \leftarrow$  Alg. 4(2 – Opt)
27:     Fin Para
28: Fin Para
29: Retornar  $R_d$ 

```

2.8 Softwares o herramientas a utilizar

Previo a la implementación de la metodología propuesta, los datos fueron procesados y analizados mediante diversas herramientas de apoyo. En particular, Microsoft Excel desempeñó un papel fundamental en esta etapa, ya que permitió organizar, depurar y estructurar adecuadamente los registros históricos proporcionados por la empresa en cuanto a los datos solicitados para el modelo. Su capacidad para gestionar grandes volúmenes de información, aplicar filtros, generar tablas dinámicas y realizar cálculos automáticos facilitó la identificación de patrones de demanda, la validación de inconsistencias y la preparación de las bases de datos requeridas tanto para el modelo exacto de optimización como para la heurística desarrollada.



Ilustración 5: Proceso de organización y depuración de datos en Microsoft Excel.

Por otra parte, para la implementación tanto del modelo exacto como de la heurística, fue necesario contar con datos reales de distancia y tiempo de viaje entre los diferentes locales. Debido a ello, se recurrió al uso de la librería OpenRouteService (ORS), una herramienta basada en datos abiertos de OpenStreetMap que permite calcular rutas, distancias y tiempos de desplazamiento con alta precisión geoespacial. ORS proporciona un conjunto robusto de servicios de enrutamiento mediante API, lo que facilita la generación automatizada de matrices origen–destino considerando características reales de la red vial, tales como límites de velocidad, sentidos de circulación, intersecciones, conectividad urbana y restricciones operativas del entorno. El uso de ORS resulta especialmente relevante en este caso de estudio, ya que garantiza que el modelo trabaje con parámetros de entrada fieles al comportamiento real del sistema logístico, incrementando la validez y precisión de los resultados obtenidos.

**openroute
service**

Ilustración 6: OpenRouteService (ORS), herramienta empleada para el cálculo de distancias y tiempos de viaje.



Ilustración 7: OpenStreetMap (OSM), base cartográfica utilizada por ORS.

Para acceder a este servicio fue necesario emplear Python, un lenguaje de programación de alto nivel ampliamente utilizado por su sintaxis sencilla, su capacidad para integrarse con servicios web y su gran variedad de librerías orientadas al manejo de datos. Gracias a estas características, Python facilitó la conexión con ORS, la automatización de las solicitudes y la construcción de las matrices de distancia y tiempo. Una vez generada y depurada toda la data necesaria, fue posible ejecutar la heurística propuesta, utilizando estos insumos para la construcción, inserción y posterior mejora de las rutas.



Ilustración 8: Python, lenguaje utilizado para conectarse a la API de ORS y procesar datos.

Por último, para resolver el modelo exacto del PVRP-TW formulado en este estudio, se empleó PuLP, la biblioteca de Python, diseñado específicamente para la formulación y resolución de problemas de optimización lineal (LP), entera mixta (MIP) y no lineal a gran escala. Este permite expresar modelos matemáticos de manera estructurada, facilitando la representación de las variables de decisión, función objetivo y restricciones de manera involucradas en el PVRPTW, tales como clientes, días del horizonte, vehículos, arcos de viaje y patrones de visita. Asimismo, su integración con solvers de alto rendimiento como CBC, CPLEX

o Gurobi permite la resolución computacional de modelos garantizando la obtención de soluciones óptimas en estudios académicos y aplicados, favoreciendo el análisis y la experimentación.



Ilustración 9: Entorno de modelación PuLP utilizado para resolver el modelo exacto del PVRPTW.

2.9 Consideraciones legales y éticas

El desarrollo del presente proyecto se enmarca en el cumplimiento estricto de los principios legales y éticos aplicables a las actividades de distribución, planificación logística y uso de información operativa entregada por la empresa colaboradora. Todas las etapas de recolección, procesamiento y análisis de datos se realizaron respetando la normativa ecuatoriana vigente y las buenas prácticas académicas establecidas por la ESPOL.

En primer lugar, la modelización matemática y el diseño del algoritmo consideran las restricciones asociadas a la jornada laboral del personal de transporte, en concordancia con el *Artículo 47 del Código del Trabajo*, el cual establece una jornada máxima de ocho horas diarias y cuarenta horas semanales. Por esta razón, dentro del modelo se incluyó una restricción explícita que limita la duración total de cada ruta a un máximo de siete horas, garantizando que los recorridos propuestos no generen tiempos de operación que excedan la normativa ni comprometan la seguridad ocupacional.

Adicionalmente, la manipulación de productos refrigerados y congelados obliga a cumplir con estándares mínimos de conservación y cadena de frío. En este sentido, el proyecto respeta las disposiciones sanitarias relacionadas con el transporte de alimentos perecederos, asegurando que el tiempo máximo permitido por jornada sea coherente con la temperatura exigida por la empresa ($>5\text{ }^{\circ}\text{C}$), evitando proponer rutas que puedan comprometer la integridad de los productos.

Desde el punto de vista tecnológico, el procesamiento de datos y la construcción de matrices de distancia y tiempo se realizó empleando herramientas de acceso público o licencias permitidas, tales como Microsoft Excel, Python y la API de OpenRouteService (ORS). ORS opera bajo licencias abiertas derivadas de OpenStreetMap, lo que garantiza un uso autorizado y transparente de la información geoespacial. Del mismo modo, el código desarrollado para la heurística y los experimentos computacionales utiliza únicamente librerías permitidas y ambientes de programación legales, evitando el uso de software no autorizado o sin respaldo de licencia.

Para ejecutar el modelo PVRPTW se empleó la librería de PuLP de Python, por medio del solver CBC bajo una licencia estudiantil, la cual permite resolver el modelo sin la limitante de un máximo de ecuaciones y variables a resolver. Dicho alcance resultó suficiente para el tamaño del problema analizado, manteniendo las funcionalidades esenciales para el desarrollo y validación del modelo en un entorno de acceso libre para fines académicos.

La información operativa proporcionada por la empresa —incluyendo direcciones, ventanas horarias, capacidades de almacenamiento, demanda histórica y datos de flota tercerizada— fue utilizada exclusivamente con fines académicos y de investigación. Para salvaguardar la privacidad y la estrategia comercial del negocio, se ha mantenido en anonimato el nombre de la cadena de restaurantes, la identidad de sus locales y toda información sensible

que pueda comprometer su operación. Ningún dato será divulgado fuera del alcance del proyecto, en cumplimiento con los principios de confidencialidad acordados con la empresa.

Asimismo, todos los conceptos teóricos, modelos matemáticos, algoritmos, herramientas computacionales y fuentes de información utilizadas en la formulación del PVRPTW y en la implementación de la heurística fueron debidamente citados siguiendo las normas APA 7. Esto garantiza trazabilidad metodológica, reproducibilidad del estudio y transparencia académica. De igual forma, la documentación de los experimentos, parámetros y supuestos facilita la auditoría y validación futura de los resultados.

Finalmente, se actuó bajo el principio ético de no manipulación de datos: todas las bases proporcionadas por la empresa fueron depuradas únicamente para corregir inconsistencias o estandarizar unidades (por ejemplo, conversión a jabs), sin alterar la demanda real ni modificar registros que pudieran influir en los resultados. Este enfoque asegura que las conclusiones del estudio representen fielmente la situación operativa actual y que las propuestas de mejora derivadas del modelo puedan ser implementadas de manera responsable y verificable.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

3.1 Experimentos computacionales.

Continuando con la metodología de (Coene, Arnout, & Spieksma, 2008) , se procede a resolver el algoritmo de asignación de días para distintos valores del número de clústeres CL , para el presente estudio, se ha realizado una comparación entre los clusters desde $CL = 5$ hasta $CL = 7$, ver Ilustración 10. Este rango busca lograr un equilibrio respecto a la división de locales, puesto que, un valor de CL pequeño puede resultar en grupos con demasiados clientes, mientras que un número elevado de clústeres puede fragmentar demasiado los sectores y resultar en varios grupos con muy pocos clientes.

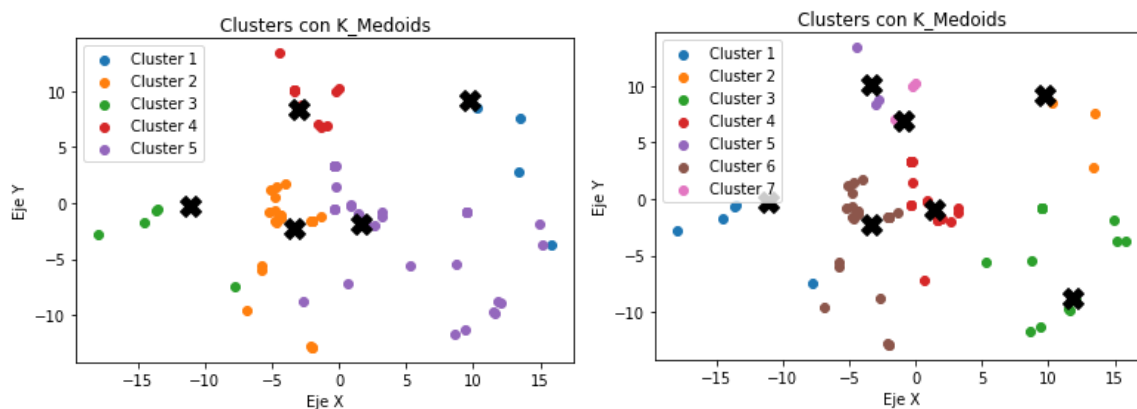


Ilustración 10: Clusterización para los valores $CL = 5$ y $CL = 7$

Por otra parte, se procedió a realizar otro análisis de sensibilidad con el parámetro *Max clientes*, este representa la cantidad máxima de clientes a atender cada día dentro de la asignación de clientes. Este análisis se dio con la intención de observar si era posible disminuir días de operación por medio del aumento de clientes a ser atendidos diariamente, así como la cantidad de viajes semanales a realizar.

Para poder calcular este parámetro, se tomó en consideración las nuevas frecuencias obtenidas por clientes, aquellas que se resumen en la Tabla 12, a partir, del cálculo realizado en la sección 2.7 Modelo matemático.3.1. Así se observa que 51 locales cuentan con una frecuencia de visita de 3 veces por semana, mientras que los 28 clientes restantes poseen una frecuencia de 2 visitas semanales.

Tabla 12

Resumen de nuevas frecuencias por cliente

Cantidad de clientes	Frecuencia de visita (f_i)
3	1
28	2
51	3
17	4
5	5

Nota. Elaboración Propia (2025).

De esta manera, sumando las frecuencias de los 104 clientes, se debe calendarizar un total de 305 entregas dentro de los 5 días activos de operación. La estimación de este parámetro se da en la ecuación (27), dando como resultado el cálculo de $MaxClientes = 61$, siendo este el mínimo de clientes que se debe atender por día.

$$MaxClientes = \frac{Total\ de\ entregas\ por\ semana}{Días\ de\ operación} = \left\lceil \frac{305}{5} \right\rceil = 61 \quad (27)$$

A partir de este valor, se evaluaron incrementos graduales hasta llegar a 83 clientes; para valores superiores se generan rutas desbalanceadas, en los que se asignan se asignan pocos clientes con baja demanda, dando como resultado un porcentaje de utilización menor a 30% sobre la capacidad de la flota vehicular.

3.2 Resultados

El desarrollo y la ejecución de los experimentos se ejecutaron en una HP Model 14 Ryzen 3 , utilizando el entorno de desarrollo Spyder versión 5.5.4, junto con el lenguaje de programación Python versión 3.12.3, garantizando así un entorno controlado y reproducible para los análisis realizados.

A continuación, se presentan los escenarios que han sido resueltos con la heurística de la Sección 2.7.3, se empieza resolviendo la primera fase de asignación de días por clusters CL y una cantidad máxima de clientes que se describe en la Tabla 13. Una vez obtenido los conjuntos de clientes a visitar cada día del horizonte de planificación se procede a buscar el orden de visita que disminuya la distancia total del recorrido, aplicando la heurística de inserción más lejana con ventanas de tiempo. De esta manera, se obtiene la ruta y el tiempo de recorrido por vehículo y por día, la suma de las distancia total por ruta nos dará la distancia semanal recorrida en km.

Tabla 13

Resumen de experimentos

CL	Max. Clientes	Distancia semanal recorrida (km)	Duración máxima del recorrido (min)
5	63	1541.31	312
	73	1433.66	325
	83	1464.25	315
	93	1485.52	327
6	63	1449.47	313
	73	1472.1	313
	83	1497.28	320
	93	1446.26	335

7	63	1476.86	313
	73	1515.00	336
	83	1513.43	313
	93	1497.44	335

Nota. Elaboración Propia (2025).

Como se puede observar, a primera vista los 12 escenarios presentan mejoras significativas respecto a la distancia de recorrido semanal de 1836 km de la situación actual , sin embargo, al momento de evaluar el tiempo de recorrido, se observa que existen rutas en cada escenario que exceden a los 300 minutos que equivalen a 5 horas. Sin embargo, al revisar la Sección 2.6 Análisis de la Situación Actual , se evidencia que la duración máximo de recorrido es de 4.5 horas , es decir, 270 minutos , por lo que, de acuerdo con lo conversado con la empresa, se recomienda que todos los recorridos tengan como límite un recorrido de hasta 5 horas (300 minutos) con el fin de conservar la cadena de frío de los productos transportados.

Por lo tanto, se procede a agregar como restricción en la heurística propuesta, la duración máxima de cada ruta sea de hasta 300 minutos para cumplir con los requerimientos de la operación. Adicionalmente, a pesar de satisfacer el primer filtro para seleccionar el mejor resultado, se evidenció en el análisis de los escenarios propuestos que la asignación diaria de clientes presenta un volumen a transportar significativamente bajo, resultando en rutas donde el vehículo opera con un nivel de utilización menor al 30% de su capacidad. Con el objetivo de no comprometer el uso correcto de recursos logísticos de la empresa, se plantea como segundo filtro que cada ruta utilice al menos el 30% de su capacidad máxima de carga.

Cabe mencionar que estos filtros o criterios de selección se consideran viables desde el punto de vista operativo de la empresa, pero, es importante destacar, que estos criterios pueden variar según las políticas y restricciones internas de cada organización. De esta forma, se presentan los escenarios para evaluar el comportamiento de cada uno en la Tabla 14- Tabla 16.

Cluster	MAX CLIENTES	RUTAS	Día 1	Día 2	Día 3	Día 5	Día 7	Rutas dentro de las 5 horas	Utilización mayor a 30%
5	63	Distancia Recorrida semanal (KM)	346.0	143.71	369.37	470.71	230.91	✓	X
		Demanda diaria promedio	118	105	122	93	93		
		% Utilización mínimo por ruta	26%	30%	26%	28%	30%		
		% Utilización promedio	61%	52%	63%	49%	50%		
		Cantidad de viajes	9	3	9	6	6		
	MAX CLIENTES	RUTAS	Día 1	Día 2	Día 3	Día 5	Día 7	Rutas dentro de las 5 horas	Utilización mayor a 30%
	73	Distancia Recorrida semanal (KM)	369.4	184.69	369.37	470.71	195.17	✓	X
		Demanda diaria promedio	122	92	122	139	93		
		% Utilización mínimo por ruta	26%	27%	26%	40%	21%		
		% Utilización promedio	62%	45%	62%	73%	49%		
		Cantidad de viajes	9	4	9	11	5		
	MAX CLIENTES	RUTAS	Día 1	Día 2	Día 3	Día 5	Día 7	Rutas dentro de las 5 horas	Utilización mayor a 30%
	83	Distancia Recorrida semanal (KM)	425.4	153.1	425.5	413	162.3	✓	✓
		Demanda diaria promedio	140	64	115	115	102		
		% Utilización mínimo por ruta	40%	33%	40%	32%	30%		
		% Utilización promedio	74%	33%	74%	62%	50%		
		Cantidad de viajes	10	3	10	10	4		
	MAX CLIENTES	RUTAS	Día 1	Día 2	Día 3	Día 5	Día 7	Rutas dentro de las 5 horas	Utilización mayor a 30%
	93	Distancia Recorrida semanal (KM)	369.4	184.69	369.37	470.71	195.17	✓	X
		Demanda diaria promedio	138	64	122	139	103		
% Utilización mínimo por ruta		32%	27%	9%	20%	36%			
% Utilización promedio		72%	30%	65%	73%	49%			
Cantidad de viajes		11	2	10	11	3			

Tabla 14: Resultados del escenario con clúster 5

Cluster	MAX CLIENTES	RUTAS	Día 1	Día 2	Día 3	Día 5	Día 7	Rutas dentro de las 5 horas	Utilización mayor a 30%
6	63	Distancia Recorrida semanal (KM)	323.1	129.54	351.33	438.29	241.06	✓	X
		Demanda diaria promedio	118	316	122	138	78		
		% Utilización mínimo por ruta	25%	27%	26%	44%	19%		
		% Utilización promedio	62%	40%	64%	75%	47%		
		Cantidad de viajes	9	4	9	11	7		
	MAX CLIENTES	RUTAS	Día 1	Día 2	Día 3	Día 5	Día 7	Rutas dentro de las 5 horas	Utilización mayor a 30%
	73	Distancia Recorrida semanal (KM)	351.3	170.53	351.33	438.29	189.57	✓	X
		Demanda diaria promedio	122	73	122	138	93		
		% Utilización mínimo por ruta	25%	27%	25%	44%	21%		
		% Utilización promedio	63%	36%	66%	75%	49%		
		Cantidad de viajes	9	5	9	11	6		
	MAX CLIENTES	RUTAS	Día 1	Día 2	Día 3	Día 5	Día 7	Rutas dentro de las 5 horas	Utilización mayor a 30%
	83	Distancia Recorrida semanal (KM)	351.3	170.53	351.33	438.29	189.57	✓	X
		Demanda diaria promedio	128	48	127	121	83		
		% Utilización mínimo por ruta	25%	5%	26%	29%	16%		
		% Utilización promedio	67%	30%	67%	64%	43%		
		Cantidad de viajes	11	4	11	10	4		
	MAX CLIENTES	RUTAS	Día 1	Día 2	Día 3	Día 5	Día 7	Rutas dentro de las 5 horas	Utilización mayor a 30%
	93	Distancia Recorrida semanal (KM)	351.3	170.53	351.33	438.29	189.57	✓	X
		Demanda diaria promedio	145	48	127	132	103		
% Utilización mínimo por ruta		55%	27%	45%	37%	40%			
% Utilización promedio		78%	66%	78%	68%	43%			
Cantidad de viajes		11	2	11	9	3			

Tabla 15: Resultados del escenario con clúster 6

Cluster	MAX CLIENTES	RUTAS	Día 1	Día 2	Día 3	Día 5	Día 7	Rutas dentro de las 5 horas	Utilización mayor a 30%
7	63	Distancia Recorrida semanal (KM)	320.2	126.78	362.78	423.89	263	✓	X
		Demanda diaria promedio	118	65	110	137	76		
		% Utilización mínimo por ruta	35%	17%	14%	76%	18%		
		% Utilización promedio	74%	30%	74%	73%	46%		
		Cantidad de viajes	9	4	10	11	8		
	MAX CLIENTES	RUTAS	Día 1	Día 2	Día 3	Día 5	Día 7	Rutas dentro de las 5 horas	Utilización mayor a 30%
	73	Distancia Recorrida semanal (KM)	362.8	179.15	362.78	423.89	189.57	✓	X
		Demanda diaria promedio	110	73	110	136	94		
		% Utilización mínimo por ruta	8%	14%	8%	44%	21%		
		% Utilización promedio	74%	30%	74%	73%	46%		
		Cantidad de viajes	10	5	10	11	5		
	MAX CLIENTES	RUTAS	Día 1	Día 2	Día 3	Día 5	Día 7	Rutas dentro de las 5 horas	Utilización mayor a 30%
	83	Distancia Recorrida semanal (KM)	402.7	152.4	402.66	394.29	156.68	✓	X
		Demanda diaria promedio	117	64	117	121	83		
		% Utilización mínimo por ruta	8%	34%	8%	11%	16%		
		% Utilización promedio	62%	30%	62%	64%	42%		
		Cantidad de viajes	12	3	12	10	4		
	MAX CLIENTES	RUTAS	Día 1	Día 2	Día 3	Día 5	Día 7	Rutas dentro de las 5 horas	Utilización mayor a 30%
	93	Distancia Recorrida semanal (KM)	402.7	152.4	402.66	394.29	156.68	✓	X
		Demanda diaria promedio	147	64	117	121	103		
% Utilización mínimo por ruta		55%	10%	38%	40%	40%			
% Utilización promedio		62%	30%	62%	64%	42%			
Cantidad de viajes		12	10	10	3	3			

Tabla 16: Resultados del escenario con clúster 7

3.3 Análisis de escenarios

A partir de la evaluación de las tablas de resultados con los escenarios de acuerdo con su clúster y la cantidad máxima de clientes, se evidencia que, en todos los casos, los días con mayor actividad, es decir, con más viajes se establecen en los días 1, 3 y 5. Esto se debe a la distribución de las frecuencias para los clientes revisado en la Tabla 12, en los que la mayor parte de ellos tienen una frecuencia de visita de 2 y 3 veces por semana, de forma que, la selección de los días de atención, se centra en las combinaciones de los días [1,3], [3,5] o [1,3,5].

Para la evaluación de los escenarios se ha señalado en rojo en cada escenario, aquellos días que, a pesar de satisfacer las restricciones teóricas, respecto al tiempo máximo de recorrido, cumplimiento de ventanas horarias entre otras, no cumplen con la restricción operativa planteada del nivel de carga. En cada escenario, se puede distinguir el porcentaje de utilización de los vehículos cada día, lo cual permite identificar el mejor escenario como propuesta de solución. Este criterio demuestra hasta qué nivel de carga se está cumpliendo por ruta y por día, de forma que,

se cumpla con el filtro de selección para garantizar que todos los vehículos salgan con un nivel de utilización mayor o igual al 30%.

Con respecto al escenario de clúster 7 y un máximo de 93 clientes , es posible visualizar que los días 1,3,5 y 7 presentan un nivel de utilización mayor al 30% , sin embargo, el día 2 presenta una ruta corta, en la cual la carga es mínima para el vehículo seleccionado por lo que solo llega a un nivel de carga del 10%, aquello que no puede ser aceptado en la operación.

No obstante, para el caso del escenario de clúster 5 con un máximo de 83 clientes , el porcentaje de utilización mínima de cada día está dentro del rango permitido, a pesar, de que el día 7 llega al nivel de carga mínimo del 30%, este es el mejor escenario que evaluar frente a la situación actual.

3.3.1 Escenario CL 5 – Máximo de clientes 83

Esta propuesta de cronograma (*Tabla 16*), presenta la menor cantidad de kilómetros recorridos frente a la situación actual. El cronograma presenta una propuesta atractiva de operación balanceando su carga en los días más pesados de la operación, con una estimación de la distancia semanal recorrida de 1580 km.

El cronograma comienza con el día 1 (domingo) para satisfacer las necesidad del cliente posterior a las ventas del fin de semana. Dada la combinación de los días y la frecuencia de los clientes que va de 1 a 5 veces por semanas, los días activos para la operación son los días 1,2,3,5,7; esto excluye el día 4 como la situación actual en el que no se lleva a cabo ninguna entrega y se elimina un día al no tener clientes con una frecuencia de visita de 6 días a la semana. Así , en la *Tabla 17* se resume el nuevo cronograma propuesto, las nuevas rutas parten del depósito identificado como “PKFC ” y retornan esta misma locación al concluir con la ruta.

Tabla 17*Nuevo cronograma de visita semanal*

Día	Ruta	Orden de visita	Distancia recorrida (km)
1,3	1	PKFC - K021- J001 -A019 - K161- K154- T043 - K092 - K095 - K034 - K085 -PKFC	50.22
	2	PKFC - K115- K088 - K083- K105 - J010- K039- M035- K110- K109- G052- K171 – PKFC	40.66
	3	PKFC - T032 - G048- K087 - J008 - I012- M021 - K074 - H062 -K172 -M062- J029- M057 – PKFC	41.55
	4	PKFC - H022- K094 -G049 -M047- M028 - A020 - J006 -K165 -K025- K153- PKFC	59.3
	5	PKFC- H012 - K059 -K058 -G050 -K129- K037 - K063 - K117 – PKFC	49.75
	6	PKFC- V053 - K077 - J005 - M061- K029- K052 - M058- G044 - K145 - G045 - K003- PKFC	57.45
	7	PKFC- K076 - M037 -T051 -K096- PKFC	30
	8	PKFC- K002 - K055 - K051- J002- M046- PKFC	23.69
	9	PKFC- K162 - K173 - K169 -V057- K123- G054 -M050 -A037 -PKFC	47.68
	10	PKFC - K007- G047 - K067-K045 -PKFC	25.18
2	1	PKFC - M043- T032 - A006 -G047- M033- J011- A033- V048- H062- J019 E044EC- M031- PKFC	71.85
	2	PKFC- H012 - A024 - J021- I004- M011- M014- PKFC	45.8

3	PKFC- DI03 - K012 -H022 -PKFC	35.41
Distancia total semanal recorrida (km)		1580

Nota. Elaboración Propia (2025).

Desde la Ilustración 11 a la Ilustración 12 se muestra el recorrido de ciertas rutas en los días de planificación, la ruta inicia en el depósito ubicado en Vía Daule (representado por la letra H) y continua hacia su primer cliente B, así hasta completar la atención de todos los puntos de entrega y retorna al punto de partida H.

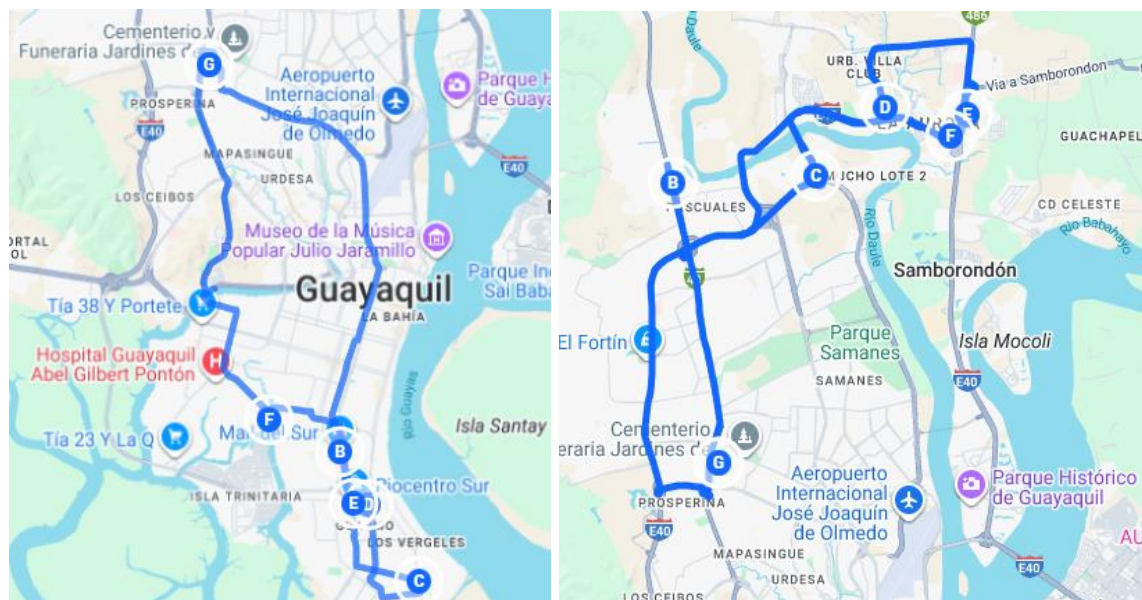


Ilustración 11: Ruta 6 y 9 del nuevo cronograma de visitas (Día 1 y 3)

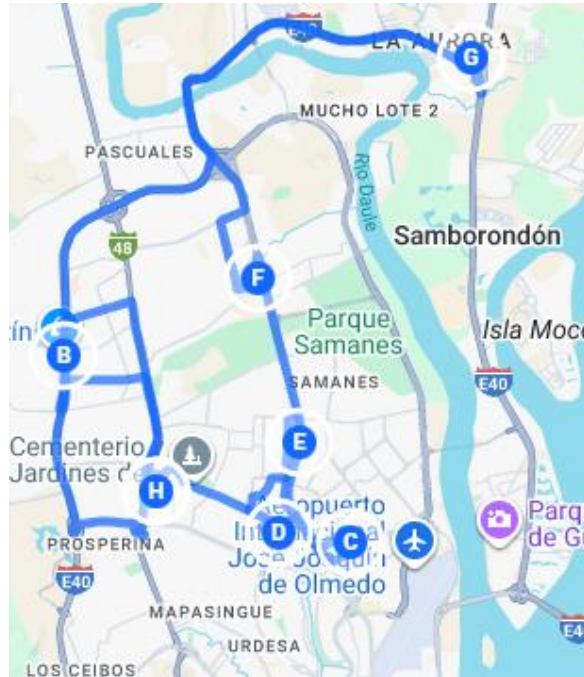


Ilustración 12: Ruta 1 del nuevo cronograma de visitas (Día 2)

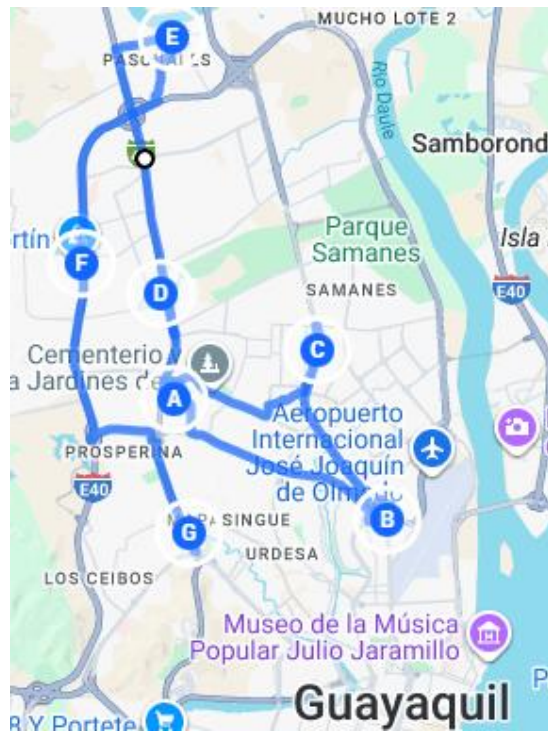


Ilustración 13: Ruta 1 del nuevo cronograma de visitas (Día 5)

3.3 Análisis de costos

La implementación de la metodología propuesta en esta investigación puede realizarse en cualquier software de uso libre que ejecute el código de Python para la resolución de la heurística. Cabe resaltar que, la heurística elabora un cronograma de rutas, por lo que no es necesaria su ejecución diaria, su implementación se limita a cuando se incluye un nuevo cliente o existe algún cambio en la ubicación de la recepción de los productos por los clientes.

Para el análisis de costos se utilizará el costo por flete de acuerdo con los vehículos utilizados, de acuerdo con su capacidad de carga , para lo cual se cuenta con 12 vehículos con un flete de \$110, y 1 vehículo de mayor capacidad (7 ton) con un flete de \$143. A continuación, se describe el número de viajes semanales por vehículo con su respectivo flete y su total de costo/flete semanal (Ver Tabla 18 *Resumen costo/flete semanal (\$)*).

Tabla 18

Resumen costo/flete semanal (\$)

Número de vehículos	Total de viajes por semana	Flete (\$)	Costo por flete semanal (\$)
1	4	\$143	\$572
12	34	\$110	\$3740
<i>Total costo por flete semanal (\$)</i>			\$4312

Nota. Elaboración Propia (2025).

3.4 Situación actual vs propuesta de mejora.

Una vez se ha evaluado la propuesta de mejora, en la Tabla 17 *Nuevo cronograma de visita semanal*, se ha estimado un total de distancia recorrida de 1580 km versus a la situación inicial de 1836 km, se deduce que la disminución en la cantidad de kilómetros

recorridos se traduce directamente, en un menor costo por flete y consumo de combustible lo que no solo implica un ahorro económico directo sino también una contribución a la sostenibilidad ambiental. Para realizar el análisis sobre las emisiones de CO₂ generados por la situación actual y el escenario propuesto, se estimó el factor de emisión por kilómetro recorrido mediante la ecuación (28), además se utilizaron los datos presentados en la Tabla 19, en la que se utilizó como referencia un vehículo de 4.5 ton.

Factor de Emisión por km

$$\begin{aligned}
 &= \text{Factor de emisión del combustible (kg CO}_2 \\
 &\text{/ Litro)} \\
 &\times [\text{Rendimiento del combustible (Litro/ km)}] \\
 &\times [\text{Distancia total recorrido (km)}]
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

Factor de Emisión por km

$$\begin{aligned}
 &= 2.67 \text{ kg CO}_2 \text{ /1 Litro} \times [3.785 \text{ Litro /1 galón} \\
 &\times 1 \text{ galón /15 km}] = 0.67373 \text{ kg CO}_2 \text{ /km}
 \end{aligned}
 \tag{30}$$

ESPECIFICACIONES DEL CAMION	
Marca	HYUNDAI
Modelo	HD65
Modelo del motor	D4DD-CRDI
Tipo de combustible	Diésel
Factor de Emisión del combustible (kg CO₂/Litro)	2.67
Capacidad de caja	4500 kg
Capacidad tanque	26 gal
Rendimiento combustible	15 (km/gln)

Tabla 19 Especificaciones del camión de 4.5 ton

Tomando como referencia los kilómetros semanales de ambos cronogramas de visita y el cálculo de kg de emisiones de CO₂, se demuestra una reducción del 14% tanto para la distancia

total semanal recorrida y las emisiones. Esto refleja como la metodología aplicada, tiene un impacto en la reducción por km recorrido y como consecuencia, contribuye a reducir el impacto ambiental por medio de las emisiones de CO2 (Ver Ilustración 14).

De esta manera, la Tabla 20 resume los resultados obtenidos , a partir de la solución seleccionada, en los que se puede observar una reducción en los días operativos, que pasan de ser 6 a 5 días activos para realizar la entrega a clientes. Asimismo, existe una disminución en la cantidad de viajes semanales que va de 66 a 37 viajes, esto se traduce también, en una menor utilización de recursos que son la flota vehicular tercerizada, haciendo más eficiente la operación de las visitas a los locales. Por último, se evidencia un ahorro en el costo por flete semanal, pasando a ser de \$4312 , aquello implica un cambio significativo para el costo logístico de la empresa.

	Situación actual	Nueva propuesta
Días de operación	6	5
Cantidad de viajes por semana	66	37
Distancia semanal recorrida (km)	1836	1580
Factor de emisión por km	0.67373	0.67373
Kg de emisiones de CO2 (semanal)	1236.97	1064.49
Costo total por flete semanal	\$ 7,678	\$ 4,312

Tabla 20 Comparación solución propuesta vs cronograma actual

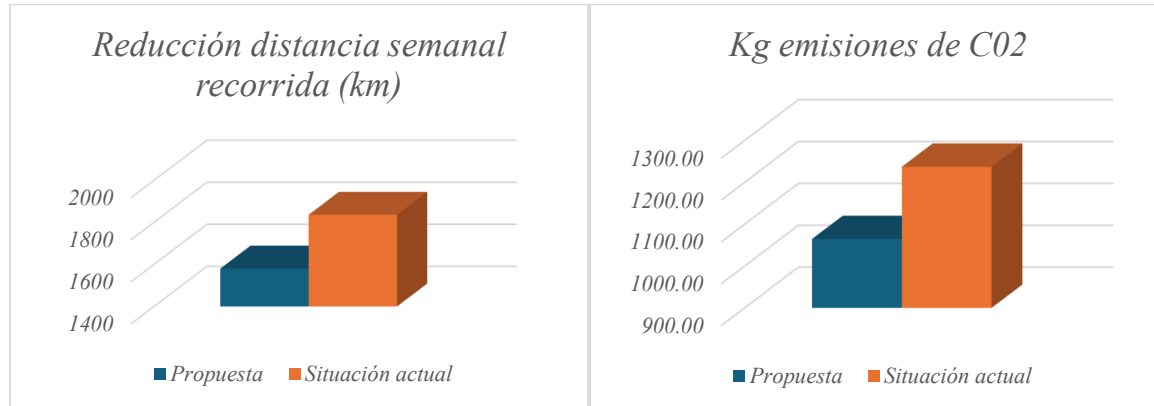


Ilustración 14 Reducción en el total de la distancia semanal recorrida en km y las emisiones de CO2 para el escenario actual y propuesto

Los resultados presentados dentro del presente trabajo investigativo confirman que la implementación es capaz de optimizar los recursos utilizados y el total de kilómetros recorridos haciendo que la propuesta sea significativa, ya que cumple con las restricciones del problema mientras se mantiene un buen servicio al cliente al garantizar la conservación de la cadena de frío de las referencias, que las entregas sean más organizadas, convirtiendo el proceso de distribución en una operación más eficiente.

3.5 Comparación de la heurística propuesta vs el modelo PVRP-TW

La ejecución de la heurística constructiva- mejora y el modelo matemático para el PVRP-TW fue desarrollado en una PC HP Model 14 Ryzen 3 , utilizando el entorno de desarrollo Spyder versión 5.5.4, junto con el lenguaje de programación Python versión 3.12.3.

Debido a la dimensión del problema real, se ha escogido una instancia de prueba de solo 10 clientes con sus respectivos datos; el modelo fue ejecutado durante 3600 segundos es decir 1 hora, sin llegar a la solución óptima, mientras la heurística fue resuelta en segundos, de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Instancia	Lower Bound (PVRP-TW)	Upper Boud (PVRP-TW)	% Gap modelo	Heurística propuesta
10 clientes	100 km	254 km	150 %	215 km

Tabla 21 Comparación de la heurística constructiva y el modelo exacto para el PVRP-TW

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

Los resultados obtenidos evidencian como la aplicación de algoritmos matemáticos permiten generar una operación más eficiente y sostenible. La estandarización de los procesos logísticos, le ofrecen a la empresa objeto de estudio la posibilidad de explorar soluciones basadas en el método científico, que, al no depender de estimaciones que se fundamentan en la experiencia o en una calendarización no dinámica , reducen la utilización excesiva de recursos.

La metodología implementada, permitió desarrollar una heurística que se ajusta a la situación de la empresa , sistematiza el proceso de planificación de entregas semanales, generando una solución factible para la optimización de los recursos en cumplimiento con las frecuencias establecidas por local y las restricciones operativas para la conservación de la cadena de frío de los alimentos perecibles.

El análisis de la demanda histórica fue fundamental para la creación del nuevo cronograma de abastecimiento semanal, puesto que, facilitó el cálculo de las nuevas frecuencias de entregas basándose en la estimación de la demanda promedio semanal y la capacidad de almacenamiento por local.

De esta manera, la comparación entre la situación actual con el escenario propuesto demostró que el esquema de costos actuales y la utilización de la flota vehicular de la empresa refleja una operación muy costosa, por lo que una de las ventajas de la heurística propuesta es el reducción del 14% en la distancia total recorrida y el impacto ambiental medida en kg de emisiones de CO₂. Además, la propuesta presenta un ahorro económico de costo por flete semanal de \$3366 , aquello que tiene un impacto anual de \$175,032. Así, la nueva solución logra el cumplimiento de ventanas de tiempo de los clientes y máximo tiempo de recorrido por ruta.

Esto confirma que la metodología propuesta es más eficiente que la planificación empírica utilizada por la empresa, ya que genera soluciones factibles que mejoran el nivel de servicio,

reducen los costos de transporte, cantidad de vehículos a utilizar que pasaron de ser 13 vehículos por día a un máximo de 10 vehículos en los días de operación más cargados, por otra parte, se libera un día de operación , es decir, un día de entrega o visita a los locales , permitiendo a la empresa emplear este tiempo en otro tipo de actividades productivas.

En general, esta automatización de la planificación del cronograma de entregas es un método replicable y escalable para medianas y grandes empresas, puesto que su diseño permite adaptarse con facilidad al contexto de la industria, y ajustarse ante cambios en la lista de clientes o condiciones operativas diferentes a las analizadas en la presente investigación.

4.1.2 Recomendaciones

A continuación, se presentan recomendaciones respecto al presente trabajo de calendarización y planificación de entregas :

- La heurística implementada, ofrece una nueva propuesta en la cual las frecuencias de visita han sido recalculadas considerando una nueva estimación en la demanda diaria, ajustada a la capacidad de almacenamiento de cada local. Si bien este enfoque ofrece una planificación más homogénea en el horizonte temporal, también introduce la necesidad de revisar el alcance de la propuesta con las políticas de inventario de cada punto de entrega. En particular, se recomienda evaluar si la demanda estimada (q_i), converge con la cantidad a pedir, asegurando que dichas cantidades sean compatibles con las condiciones reales de consumo, stock de seguridad y reposición de las referencias.
- Esta propuesta presenta como principal fortaleza la priorización de la regularidad y el equilibrio temporal en la asignación de clientes, sin embargo, se debe considerar que el procedimiento no busca explícitamente garantizar una consolidación de carga más eficiente, aquello que constituye como una limitación relevante desde el punto de vista operativo. En particular, las penalizaciones incorporadas se basan únicamente en el número de clientes asignados por día, sin hacer énfasis en la utilización capacidad de carga de los vehículos. Como consecuencia, pueden generarse escenarios en los que, aun cumpliéndose con las restricciones operativas y del número máximo de clientes atendidos, la carga diaria transportada resulte baja, afectando la eficiencia del uso de la flota vehicular. Así, se recomienda extender la heurística incorporando penalizaciones asociadas a niveles mínimos de consolidación de la carga.

- Para posibles estudios futuros, se sugiere agregar e implementar técnicas de inicialización para definir el mejor número de clústeres a utilizar para la clusterización, en la cual se agrupan los clientes, con el fin de reducir su aleatoriedad de ubicación de centroides que tiene una importante influencia dentro de la optimalidad global de la solución.
- Por último, dado que la heurística no incorpora de forma explícita restricciones de capacidad vehicular, se recomienda validar distintos escenarios de tamaño de flota, partiendo desde el análisis del porcentaje de utilización promedio de recorrido en el que se evidencia que no se llega a completar la capacidad del camión en más del 70% . Esta validación resulta clave para reducir los viajes subutilizados y potenciando una mayor eficiencia operativa.

Referencias

- Adesoga, Ajibaye, Nwafor, Imam-Lawal, Ikekwere, , & Ikechukwu. (2024). The rise of the “smart” supply chain: How AI and automation are revolutionizing logistics. *International Journal of Science and Research Archive*, 790–798.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2021). Código del Trabajo. ÚLTIMA REFORMA: EDICIÓN CONSTITUCIONAL DEL REGISTRO OFICIAL 231. Registro Oficial: Quito
- Birkmaier, Imeri, & Reiner. (2024). Improving supply chain planning for perishable food: data-driven implications for waste prevention. *Journal of Business Economics*, 1-36.
- Christofides, & Beasley. (1984). The period routing problem. *Networks*, 237–256. doi:<https://doi.org/10.1002/net.3230140205>
- Coene, S., Arnout, & Spieksma. (2008). The Periodic Vehicle Routing Problem: A Case Study. doi:<https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1368749>
- Croes. (1958). A method for solving traveling-salesman problems. *Operations Research*, 791-812.
- Croes, G. (1958). A method for solving traveling-salesman problems. *Operations Research*, 791–812. doi:<https://doi.org/10.1287/opre.6.6.791>
- Garey, & Johnson. (1979). Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness. *W. H. Freeman and Company*.
- Gaudioso, & Paletta, G. (1992). A Heuristic for the Periodic Vehicle Routing Problem. *Transportation Science*, 87-89.
- Kirci, & Seifert. (2022). Managing Perishability in the Fruit and Vegetable Supply Chains. *Sustainability*. doi:<https://www.mdpi.com/2071-1050/14/9/5378>
- Lahyani, Khemakhem, & Semet. (2015). Rich vehicle routing problems: From a taxonomy to a definition. *European Journal of Operational Research*, 1–14.

- Marsetiya, Kusuma, Santoso, & Wahid. (2020). Perishable goods delivery routing problem with time windows: A systematic review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1088/1757-899X/847/1/012040>
- Rosenkrantz, Stearns, & Lewis. (1977). An analysis of several heuristics for the traveling salesman problem. *SIAM Journal on Computing* 6 (3), 563–581.
- Sitompul, & Manasye. (2021). A Vehicle Routing Problem with Time Windows Subject to the Constraint of Vehicles and Good's Dimensions. *International Journal of Technology (IJTech)*, 865-875. doi:<https://doi.org/10.14716/ijtech.v12i4.4294>
- Solomon. (1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research*, 254-265. doi:<https://doi.org/10.1287/opre.35.2.254>
- Spieksma, Arnou, & Coene. (2008). The periodic vehicle routing problem: A case study. *European Journal of Operational Research*, 837–852. doi:<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1368749>

Apéndice A

Ruteo del nuevo cronograma de abastecimiento semanal

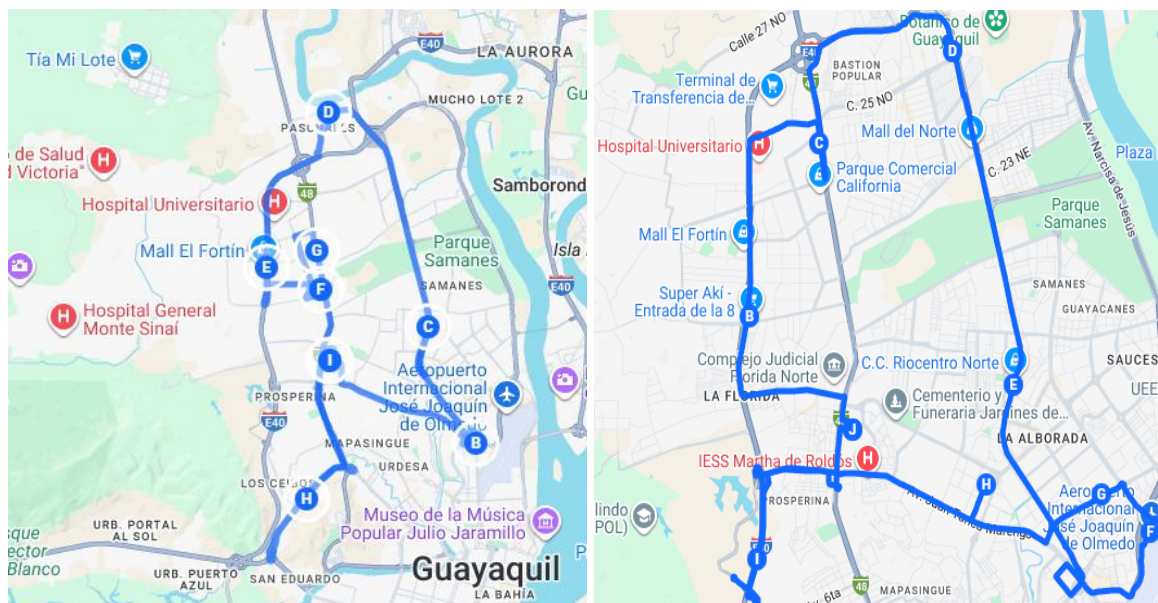


Ilustración 15: Ruta 1 y 2 del nuevo cronograma de visitas (Día 1 y 3)

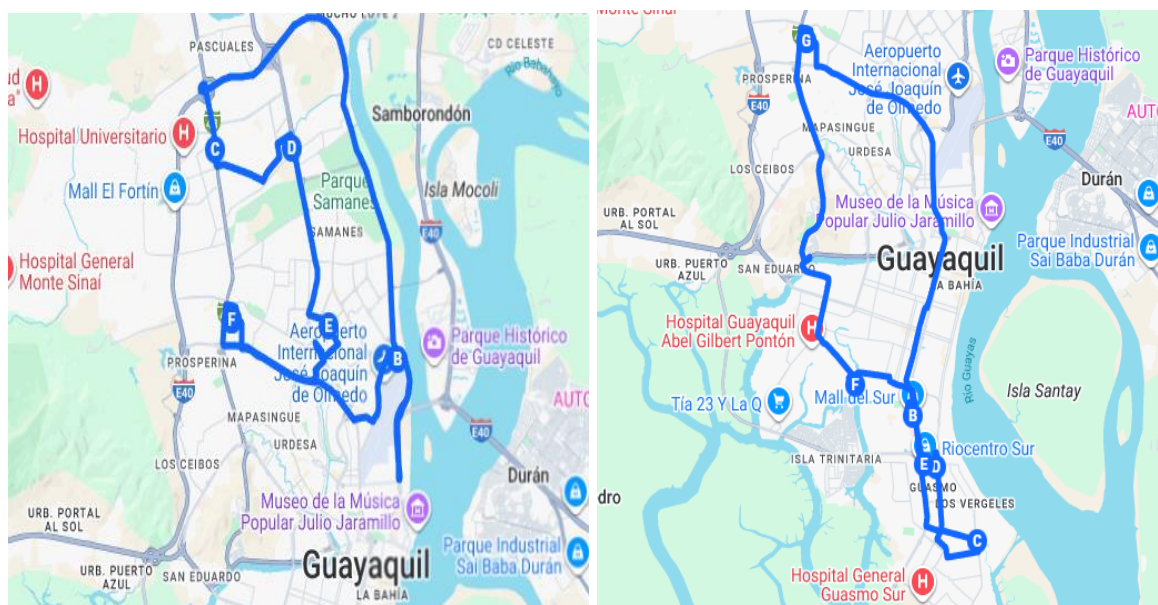


Ilustración 16: Ruta 3 y 5 del nuevo cronograma de visitas (Día 1 y 3)

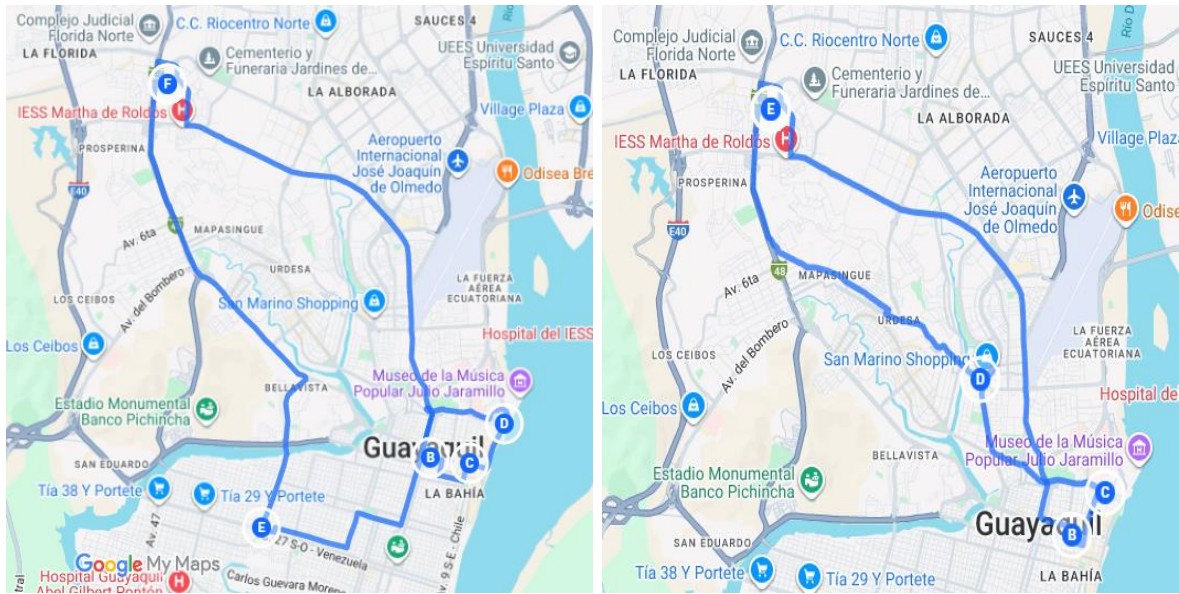


Ilustración 17: Ruta 7 y 8 del nuevo cronograma de visitas (Día 1 y 3)

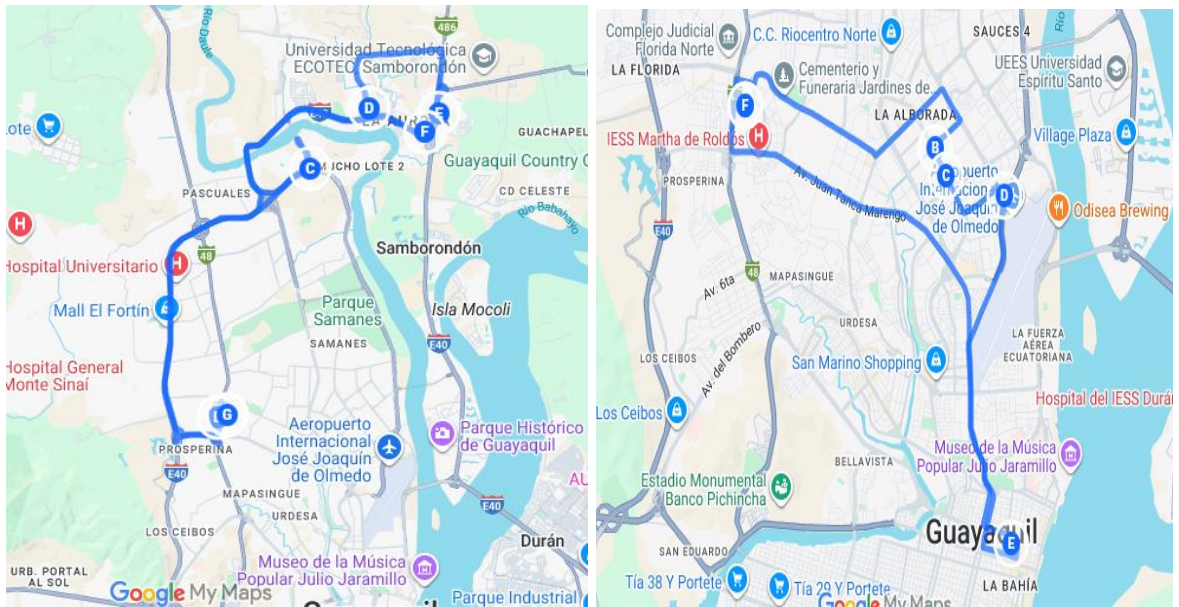


Ilustración 18: Ruta 9 y 10 del nuevo cronograma de visitas (Día 1 y 3)

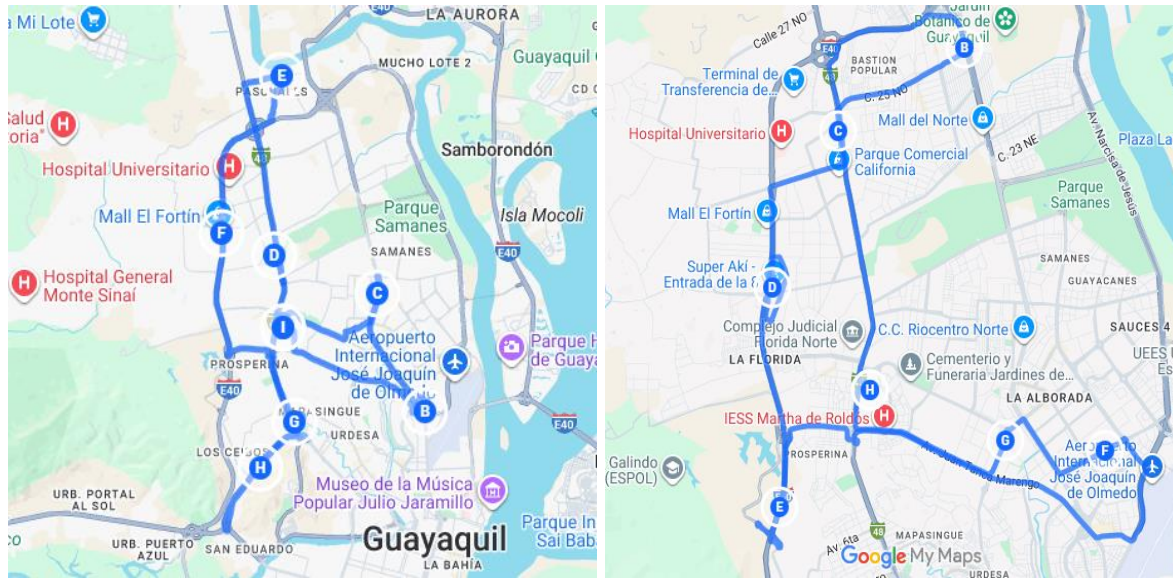


Ilustración 19: Ruta 1 y 2 del nuevo cronograma de visitas (Día 5)

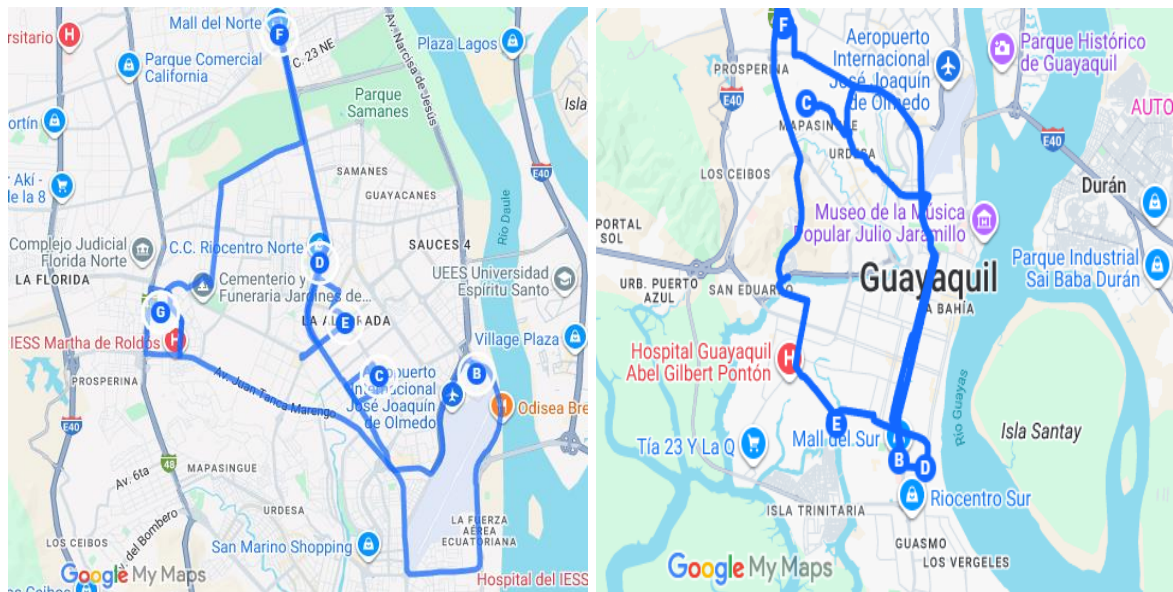


Ilustración 20: Ruta 3 y 4 del nuevo cronograma de visitas (Día 5)

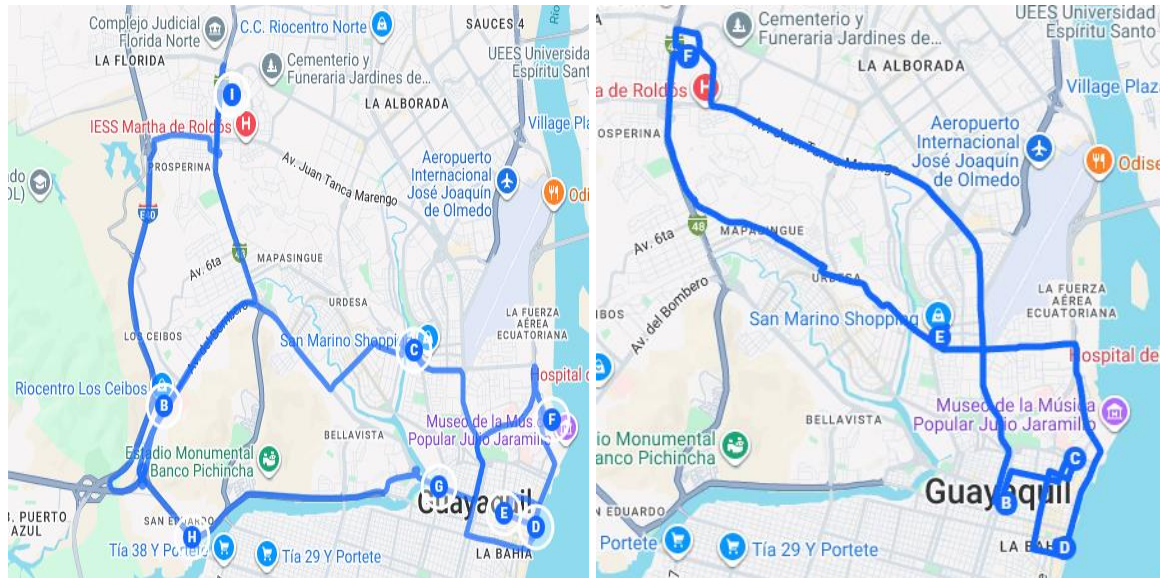


Ilustración 21: Ruta 5 y 7 del nuevo cronograma de visitas (Día 5)

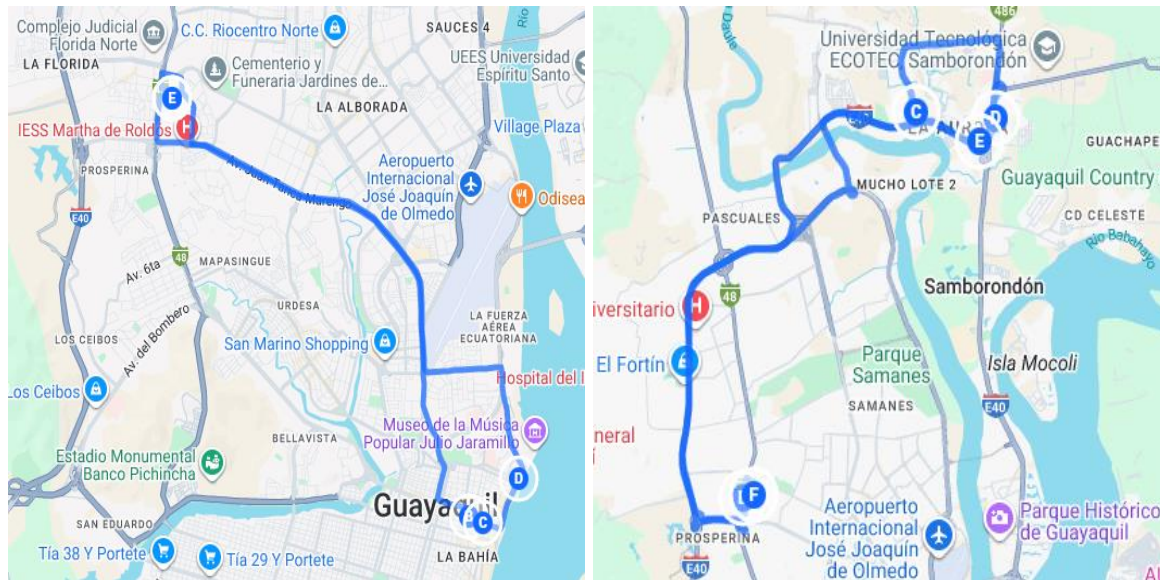


Ilustración 22: Ruta 8 y 9 del nuevo cronograma de visitas (Día 5)



Ilustración 25: Ruta 4 del nuevo cronograma de visitas (Día 7)

Tabla 22

Nuevo cronograma de visita semanal

Día	Ruta	Orden de visita	Distancia recorrida (km)	
2	1	PKFC - M043- T032 - A006 -G047- M033- J011- A033- V048- H062- J019 E044EC- M031- PKFC	71.85	
		2	PKFC- H012 - A024 - J021- I004- M011- M014- PKFC	45.8
		3	PKFC- DI03 - K012 -H022 -PKFC	35.41
5	1	PKFC- K021 - J001 - A019 - K161 - V048- K095 - K154 - T043 - M043 -K034 - K085- PKFC	50.67	

	2	PKFC- K083 - K088 -K115 -K171- K039- M035 -K110- K109 -G052 -M033- J011-	43.83
	3	A033- PKFC	29.04
		PKFC - T032 - G048 - K087 - J008 - I012 - A006 - G047 - K105 - J010 - M031 - M057	57.12
	4	- H062 - K172 - M062 - J029 – PKFC	
		PKFC - H022 - K094 - G049 - M047 - M028 - A020 - J006 - DI03 - K165 - K025-	49.60
	5	PKFC	
		PKFC - H012 - K059 - K058 - G050 - A024	49.60
	6	- J021 - I004 - K129 - K037 - K117 – PKFC	
		PKFC - K077 - J005 - I002 - K003 - K029 - K052 - G044 - V053 - G045 - K145 –	49.63
	7	PKFC	
		PKFC - K076 - K055 - M010 - K051 - J002	26.13
	8	- A007 - I005 – PKFC	
		PKFC - K162 - K169 - V057 - K123 - G054	44.21
	9	- M050 - A037 - J019 - E044EC – PKFC	
		PKFC - K007 - K063 - M014 - K067-	39.74
	10	PKFC	
		PKFC - K002 - M037 - T051 - PKFC	23.52
7	1	PKFC - T043 - T032 - G048 - K021 - J001 - A019 - G047 - K105 - K083 - H062 - K110 - K109 – PKFC	50.67
	2	PKFC - I002 - K076 - M010 - G045 - A007 - I005 - K075 – PKFC	33.25
	3	PKFC - H012 - K059 - K058 - H022 - K094 - G049 – PKFC	54.68
	4	PKFC - T051 - G044 - PKFC	23.68
<i>Distancia total semanal recorrida (km)</i>			<i>1580</i>

Nota. Elaboración Propia (2025).

