

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA

Facultad de Ingeniería de Alimentos

Maestría en Ingeniería



Mejora de la eficiencia de vehículos utilizados en la recolección de leche fluida en las rutas de Boyacá, para la empresa Procesadora de Lácteos PESLAC S.A.S. mediante programación entera mixta.

Opción de titulación

Trabajo de grado

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de

Magister en Ingeniería

Presenta:

Steven Fankhauser Ariza

Dirigido por:

María Paula Montoya

Nombre y Firma

Nombre y firma

Director de la Maestría

Decano de la Facultad de Ingeniería de

Alimentos

Bogotá D.C.

Fecha (será el mes y año de aprobación del Consejo Técnico, Académico y Curricular)

Agradecimientos

Al concluir este trabajo de grado, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que hicieron posible este logro. Este proyecto no hubiera sido posible sin el apoyo, la guía y la presencia constante de quienes me han acompañado a lo largo de este camino.

En primer lugar, agradezco infinitamente a Dios, por ser mi fortaleza y guía en cada paso de este proceso. Su presencia me ha dado la sabiduría, paciencia y fuerza necesarias para superar los desafíos que se presentaron. A lo largo de esta travesía, me sostuvo cuando sentía que flaqueaba, y me permitió seguir adelante con determinación.

A mi esposa, Karen Correa, mi mayor compañera en este viaje. Gracias, Karen, por tu apoyo incondicional, por tu paciencia infinita y por creer en mí. Tus palabras de ánimo, tu amor y tu comprensión fueron un pilar fundamental para alcanzar esta meta.

A mis asesores, María Paula Montoya, quien con su dedicación, paciencia y vasto conocimiento me guiaron a lo largo de este proyecto.

Un especial agradecimiento a la Fundación Universitaria Agraria de Colombia, mi alma máter, por brindarme el espacio académico donde pude desarrollar mis ideas y crecer como profesional.

A mi familia, por su apoyo inquebrantable durante todo este proceso. quienes desde siempre me han enseñado el valor del esfuerzo, la disciplina y la dedicación, y a todos aquellos familiares que, en momentos de duda, supieron darme una palabra de aliento. Su ejemplo ha sido fundamental para llegar hasta aquí.

Este logro es el resultado de un esfuerzo conjunto, y a todos aquellos que de una u otra manera contribuyeron a que este proyecto viera la luz, les expreso mi más profundo agradecimiento. Gracias por ser parte de este sueño.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a PESLAC, por su generosa colaboración al brindar información clave y facilitar parte de las instalaciones necesarias para el desarrollo de este proyecto. Su apoyo fue esencial para la realización de esta investigación, permitiéndome acceder a los recursos y conocimientos que contribuyeron significativamente a los resultados alcanzados.

Resumen

La optimización de los procesos logísticos es un factor clave para la competitividad y sostenibilidad de las empresas en la industria láctea. Este proyecto se centra en mejorar la eficiencia de la recolección de leche cruda en PESLAC Procesadora de Lácteos S.A.S., una destacada empresa boyacense dedicada a la producción de una amplia gama de productos lácteos de alta calidad. Actualmente, PESLAC enfrenta desafíos significativos en la planificación y programación de rutas para la recolección de leche en la región de Boyacá. El enfoque manual utilizado presenta limitaciones, como la subutilización de la capacidad de los vehículos, lo que genera aumentos en los costos operativos, demoras en la recolección y posibles impactos en la calidad del producto.

El objetivo principal de este proyecto es mejorar la eficiencia de los vehículos utilizados en la recolección de leche fluida en las rutas de Boyacá, con el menor costo posible. Esto se logrará mediante la implementación de modelos matemáticos, algoritmos avanzados y tecnologías innovadoras que optimicen la asignación de vehículos, maximicen la capacidad de carga y gestionen de manera precisa los tiempos y rutas de recolección. La metodología propuesta combina enfoques cuantitativos y cualitativos, incluyendo la recolección y análisis de datos relevantes, la revisión de literatura, la selección e implementación de modelos y algoritmos, pruebas de rendimiento y evaluación. Además, se explorará el desarrollo de un sistema resiliente capaz de adaptarse a dificultades operativas imprevistas.

La implementación exitosa de este proyecto genera beneficios tangibles para PESLAC, como la reducción de costos operativos, la optimización de recursos, la preservación de la calidad del producto y el fortalecimiento de la satisfacción del cliente. Estos beneficios contribuirán directamente a la competitividad y sostenibilidad de la empresa en el mercado lácteo regional y

nacional. Adicionalmente, el enfoque centrado en la logística sustentable impulsará la adopción de prácticas amigables con el medio ambiente, minimizando la huella ambiental y promoviendo la sostenibilidad en la cadena de suministro láctea de la región de Boyacá.

Palabras clave: Cadena de suministro, Materia prima láctea, lactosueros, eficiencia logística, programación lineal.

Abstract

The optimization of logistics processes is a key factor for the competitiveness and sustainability of companies in the dairy industry. This project focuses on improving the efficiency of raw milk collection at PESLAC Procesadora de Lácteos S.A.S., a prominent Boyacá company dedicated to the production of a wide range of high-quality dairy products. Currently, PESLAC faces significant challenges in planning and programming routes for milk collection in the Boyacá region. The manual approach used has limitations, such as underutilization of vehicle capacity, leading to increases in operating costs, collection delays, and potential impacts on product quality.

The main objective of this project is to design an improvement model that allows increasing the efficiency of the vehicles used in the collection of fluid milk on the routes of Boyacá, with the lowest possible cost. This will be achieved through the implementation of mathematical models, advanced algorithms and innovative technologies that optimize vehicle allocation, maximize loading capacity and accurately manage collection times and routes. The proposed methodology combines quantitative and qualitative approaches, including the collection and analysis of relevant data, literature review, selection and implementation of models and algorithms, performance testing and evaluation. Additionally, the development of a resilient system capable of adapting to unforeseen operational difficulties will be explored.

The successful implementation of this project generate tangible benefits for PESLAC, such as reducing operating costs, optimizing resources, preserving product quality, and strengthening customer satisfaction. These benefits will directly contribute to the competitiveness and sustainability of the company in the regional and national dairy market. Additionally, the focus on sustainable logistics will drive the adoption of environmentally friendly practices, minimizing the

environmental footprint and promoting sustainability in the dairy supply chain of the Boyacá region.

Keywords: Supply chain, Dairy raw material, whey, logistics efficiency, linear programming.

Glosario

Carrotanque: Vehículo utilizado para trasportar líquidos.

Leche fluida: La leche líquida.

Leche concentrada: producto obtenido por evaporación de la leche.

MPL: Materia prima láctea.

Ruteros dinámicos: proceso de planear la ruta de entrega de productos.

Eficiencia logística: cuando la empresa logra optimizar su operación con el fin de minimizar errores, manteniendo la calidad del producto y servicio.

Mejora continua: proceso que pretende mejorar los productos, servicios y procesos de una organización mediante una actitud general.

PVC: problema del viajante de comercio.

PRMC: problema de ruta más corta.

EOQ: modelo del lote económico de compra.

QR: Modelo de revisión continúa.

PPP: problema de Programación de la Producción.

ALM: modelo de Línea de Ensamblaje.

CEDI: centro de distribución.

PUI: problema de la Ubicación de Instalaciones.

FLM: modelo de Localización de Instalaciones.

SCOM: modelo de Optimización de la Cadena de Suministro.

SCIM: modelo de Gestión de Inventarios en la Cadena de Suministro.

Tabla de contenido

1.	Introducción	13
2.	Marco teórico	16
2.1	Cadena de suministro en el sector lácteo	16
2.2	Sector lácteo colombiano	17
2.3	Modelos matemáticos.....	18
2.3.1	Modelos matemáticos en la optimización generación de ruteos dinámicos	19
2.3.2	Modelos matemáticos en la gestión de inventarios.....	19
2.3.3	Programación de la producción.....	20
3.	Estado del arte.....	23
4.	Formulación del problema	28
5.	Pregunta de investigación	30
6.	Justificación	31
7.	Objetivo general.....	32
7.1	Objetivos específicos	33
8.	Metodología	34
8.1	Tipo de investigación	34
8.2	Población y muestra	35
8.3	Identificación de variables	35

8.4	Fases de investigación.....	35
8.4.1	Fase 1: Caracterización del proceso logístico actual de recolección de leche fluida en PESLAC S.A.S.	35
8.4.2	Fase 2: Desarrollo del modelo matemático para la planificación y programación de rutas eficientes en PESLAC S.A.S.	36
8.4.3	Fase 3: Evaluación de la resiliencia del sistema de programación de rutas en situaciones imprevistas	37
9.	Resultados.....	38
9.1	Caracterización del proceso logístico actual.....	38
9.1.1	Análisis exploratorio de los datos obtenidos.....	45
9.2	Desarrollo del modelo matemático	48
9.2.1	Formulación del modelo	48
9.2.2	Implementación y pruebas	51
9.3	Análisis de escenarios de resiliencia.....	55
10.	Discusión.....	57
11.	Conclusiones	59
12.	Bibliografía	62

Listado de tablas

Tabla 1. Estado del arte – resumen investigaciones	23
Tabla 2. Capacidad de los vehículos recolectores	40
Tabla 3. Rutas de recolección	41
Tabla 4. Costos Operativos de los Vehículos	43
Tabla 5. Horarios y restricciones de tiempo	44
Tabla 6. Horarios y restricciones de tiempo	44

Listado de figuras

Figura 1. Proceso logístico actual de PESLAC	38
Figura 2. Rutas de recolección.....	42
Figura 3. Modelo matemático formulado en GAMS	52
Figura 4. Resultados del modelo parte 1.....	54
Figura 5. Resultados del modelo parte 2.....	54
Figura 6. Resultados del modelo parte 2.....	55

1. Introducción

La industria lechera es una de las más importantes en la economía de muchos países. Según Baena et al. (2020), en Colombia no es diferente. Gran parte del sector agrícola depende de esta actividad. Por esta razón, las empresas deben enfocarse en obtener un proceso de recolección ágil y eficaz para que la transformación de la materia prima láctea se realice de manera rápida, sin afectar los parámetros organolépticos o microbiológicos. Para lograr esto, las empresas lácteas han implementado modelos matemáticos y estrategias de logística avanzadas, que les permiten mejorar la eficiencia, reducir costos y optimizar tiempos.

De acuerdo con Aravena et al. (2008), los modelos logísticos y matemáticos permiten a las empresas determinar la cantidad de materia prima láctea que se debe recolectar en cada hato, así como definir la ruta óptima para su suministro. Esto asegura que se recoja la cantidad necesaria en el menor tiempo posible, con vehículos adecuados y al menor costo. Para implementar estos modelos, las empresas han adoptado tecnologías avanzadas como sistemas de posicionamiento satelital y software de planificación de rutas. Estos sistemas permiten crear ruterios dinámicos que se ajustan en tiempo real, verificando condiciones de tráfico y cambios en la previsión diaria de la materia prima.

Las operaciones logísticas juegan un papel clave en los procesos de cada empresa. En el caso de las empresas lácteas, estas buscan mejorar la eficiencia de la recolección de la materia prima. Deben asegurarse de que la leche sea recogida lo antes posible después del ordeño, ya que tiene una alta carga microbiana y largos periodos de transporte que pueden alterar sus condiciones fisicoquímicas y microbiológicas. Es esencial garantizar condiciones adecuadas de conservación, en cuanto a temperatura y tiempos, según la normatividad colombiana vigente, para la llegada a los centros de recolección o las plantas de procesamiento (Baena et al., 2020).

Por ello, las empresas deben revisar constantemente sus procesos y sistemas. La optimización es clave en el desarrollo de modelos matemáticos, como lo explica Ramos et al. (2014). La planificación diaria de la recolección de leche puede variar según las condiciones de producción, la demanda, el estado de las vías y la capacidad de los vehículos. Los sistemas de monitoreo deben identificar las posibles causas que desvíen el proceso de los límites planificados, de modo que se pueda dar una respuesta rápida y ajustar el sistema para que los costos logísticos no varíen considerablemente, reflejándose positivamente en los indicadores de gestión. Esto fomentará la mejora continua en la eficiencia de las operaciones logísticas.

Como se evidencia, los modelos matemáticos, la logística avanzada y la mejora continua son fundamentales para incrementar la eficiencia en la recolección de la materia prima láctea y reducir los costos operativos. Las empresas lácteas deben pensar a futuro y plantearse inversiones en tecnología avanzada y en la formación de su personal para garantizar productos inocuos y rentables (Rivera, 2018).

En este contexto, este proyecto de investigación es relevante ya que se enfoca en la optimización de la recolección de leche cruda en PESLAC S.A.S. por medio de la aplicación de modelos matemáticos, algoritmos avanzados y tecnologías innovadoras, se busca mejorar la eficiencia logística, reducir costos operativos y garantizar la calidad de la materia prima.

La optimización de las rutas de recolección, la asignación óptima de vehículos y la maximización de la capacidad de carga son aspectos clave de este proyecto. Además, explora el desarrollo de un sistema resiliente capaz de adaptarse y responder ante dificultades imprevistas, como condiciones climáticas adversas, problemas de tráfico o fluctuaciones en la demanda. Mejorar la eficiencia en la recolección de leche cruda genera beneficios tangibles para PESLAC, como la reducción de costos, la optimización de recursos, la preservación de la calidad del

producto y un mayor grado de satisfacción del cliente. Estos beneficios contribuyen directamente a la competitividad y sostenibilidad de la empresa en el mercado lácteo regional y nacional.

Además, el enfoque en la logística sustentable y la búsqueda de soluciones innovadoras alineadas con prácticas de responsabilidad ambiental impulsan la adopción de medidas para minimizar la huella ambiental y promover la sostenibilidad en la cadena de suministro láctea en Boyacá. Este proyecto de investigación representa una oportunidad única para PESLAC S.A.S. de mejorar su competitividad, eficiencia y sostenibilidad mediante la optimización de uno de sus procesos logísticos clave: la recolección de leche fluida. Al aprovechar los avances en modelado matemático, tecnologías emergentes y enfoques analíticos, se contribuye a la consolidación de una cadena de suministro resiliente y eficiente que beneficie tanto a la empresa como a la industria láctea en su conjunto.

2. Marco teórico

2.1 Cadena de suministro en el sector lácteo

Según Camacho, H. et. al. (2012) la cadena de suministro se refiere al conjunto de actividades y procesos involucrados en la producción y distribución de bienes y servicios, desde la adquisición de materias primas hasta la entrega final al consumidor. Incluye una red de organizaciones interconectadas que colaboran para satisfacer las demandas del mercado de manera eficiente. Para el caso del sector lácteo, las materias primas principales son la leche de vaca, oveja o cabra. La cadena de suministro comienza con la producción de la materia prima láctea en los hatos lecheros; los aspectos claves para obtener una materia prima láctea están las condiciones físico químicas y microbiológicas que garantizan la calidad.

Como lo explica Cadena, J. (2020) después de la recolección de la materia prima láctea en los hatos lecheros, debe ser transportada en el menor tiempo posible a las instalaciones de procesamiento donde se llevan a cabo diferentes etapas como pasteurización, homogeneización, separación, estandarización y fermentación, dependiendo de los productos lácteos que se vayan a producir (leche, queso, yogur, mantequilla, etc.).

La logística de los productos lácteos juega un papel importante y se divide en dos; la - primera parte donde el área de operaciones tiene una participación de 24 horas por 7 días ya que la producción lechera no para y se debe tener una buena planeación para la optimización de rutas lecheras y que se logre recoger las cantidades propuestas sin dejar residuales de inventarios en los hatos lecheros, ya que estos residuales se dañarían y no sería óptima para consumo humano. El factor tiempo es muy importante en la conservación de las condiciones de calidad de la materia prima láctea para evitar el deterioro de la misma, el desafío al cual se enfrenta la logística es

mantener la cadena de frío durante todo el proceso de recolección y entrega en planta de producción para preservar las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas de la materia prima láctea. La segunda parte en donde entra en participación la logística es cuando el producto terminado debe ser distribuido eficientemente desde las plantas de producción a los puntos de venta, diferentes tiendas de conveniencia y mercados mayoristas. Esto implica la planificación de rutas de entrega, gestión de flotas de transporte refrigerado y coordinación con distribuidores y minoristas.

El uso de nuevas tecnologías en la cadena de suministro con lo pueden ser los de sistemas de información geográfica (SIG) y algoritmos de optimización puede mejorar la planificación de rutas de distribución, reduciendo los tiempos de entrega y los costos de transporte. El uso de software de gestión de inventarios y herramientas de planificación de la demanda puede ayudar a predecir el comportamiento de la demanda de productos lácteos y optimizar los niveles de inventario.

2.2 Sector lácteo colombiano

Como lo explica Baena, J. et. al. (2020), el sector lácteo colombiano es una industria en constante crecimiento, Colombia es un país con una gran tradición en el sector lácteo, la producción de leche, quesos y otros derivados lácteos es una actividad que se realiza en gran parte de los departamentos colombianos, generando desarrollo y fuentes de ingresos para las familias del campo colombiano donde se realiza esta actividad.

De acuerdo con Vega, B. (2018) la industria del sector lácteo aporta 24,3% del Producto Interno Bruto agropecuario, lo cual demuestra la importancia del sector lácteo para la industria colombiana. Además, según datos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, en 2020 la producción de leche en el país alcanzó los 7.789 millones de litros, lo que representa un aumento del 2,9% con respecto al año anterior. Este crecimiento ha desarrollado a nuevas empresas en el

mercado y las existentes se han logrado mantener a lo largo del tiempo generando una mayor variedad de productos lácteos en el mercado nacional y abriendo nuevos caminos en las vías internacionales.

Colombia cuenta con una amplia variedad de derivados lácteos que son muy apreciados a nivel nacional. Uno de los principales retos actuales del sector lácteo colombiano es mantener su competitividad frente a otros países productores de lácteos, especialmente en el contexto de los tratados de libre comercio. Según Posada, et. al. (2021), los acuerdos comerciales como el TLC entre Colombia y Estados Unidos han generado desafíos para el sector, ya que permiten la entrada de productos lácteos más económicos al país. Esto ha afectado a los productores locales, quienes enfrentan dificultades para competir con productos importados que se benefician de avances tecnológicos y apoyos gubernamentales en sus países de origen. Para mejorar la competitividad del sector, es necesario que Colombia realice mayores inversiones en tecnología e investigación, con el respaldo del gobierno, para apoyar a los pequeños campesinos y fortalecer la cadena productiva nacional. Además, es crucial considerar los hábitos de consumo de las nuevas generaciones para garantizar la sostenibilidad del sector a largo plazo.

2.3 Modelos matemáticos

Los modelos matemáticos han sido de gran ayuda y avance en el desarrollo de nuevas formas de realizar acciones de una forma simple y eficazmente, como lo explica Accinelli & De la Fuente (2013) las empresas deben buscar la eficiencia en todos sus procesos para garantizar su sostenibilidad en el tiempo. Para el caso de las empresas lácteas su costo logístico es parte fundamental de su funcionamiento y sostenimiento y para esto se debe buscar un desarrollo continuo en la eficiencia de la recolección de leche fluida. Según Guzmán, C. et. al. (2014) los procesos logísticos son un factor muy importante para el éxito de las empresas lácteas y determinan

que puedan entrar en un entorno más competitivo, la aplicación de modelos matemáticos en la mejora de la eficiencia logística ha ganado importancia en los últimos años, ya que permite optimizar el flujo de productos, generar eficiencia de inventarios, entre otros. Esto ha permitido a las empresas a minimizar los costos y maximizar sus procesos, algunos modelos matemáticos ampliamente utilizados en la mejora de la eficiencia logística se describen a continuación:

2.3.1 Modelos matemáticos en la optimización generación de ruteos dinámicos

La optimización de rutas y recursos es un aspecto esencial para lograr una eficiencia logística adecuada; los modelos matemáticos como el Problema del Viajante de Comercio (PVC) que ayuda a determinar y trazar la mejor ruta en tiempos y distancia y el Problema de Ruta más Corta (PRMC) que realiza la optimización en distancias, han demostrado su eficacia en la optimización de rutas. Estos modelos consideran variables como la distancia, el tiempo de viaje, los costos y las restricciones operativas. En estudios como el de Li, M. et. al. (2018) se aplicaron modelos matemáticos de optimización para reducir los tiempos de entrega mejorando los costos de transporte, volviendo un caso de éxito en la mejora de la eficiencia logística.

2.3.2 Modelos matemáticos en la gestión de inventarios

Estos modelos hacen parte de un componente crítico dentro de la eficiencia logística, los modelos matemáticos como el Modelo de Lote Económico de Compra (EOQ) y el Modelo de Revisión Continua (QR), han sido ampliamente utilizados para optimizar las políticas de inventario. Estos modelos consideran variables tales como la demanda y los costos de almacenamiento y pedido. Como se explica en un estudio realizado por Wang & Tang, (2019), donde se aplicaron modelos matemáticos de inventario que lograron minimizar los costos totales de inventario, generando una mejora en la eficiencia logística en el manejo de inventarios de una empresa de distribución de alimentos objeto de dicho estudio.

2.3.3 Programación de la producción

Como lo explica Silva, J. et. al. (2010) este proceso es crucial en la eficiencia logística de una empresa, especialmente en entornos en la planeación de fabricación. Los modelos matemáticos donde se plantea el Problema de Programación de la Producción (PPP) y el Modelo de Línea de Ensamblaje (ALM), se utilizan para optimizar la asignación de recursos disponibles, el paso a paso y los tiempos de producción; la aplicación de estos modelos en entornos reales ha demostrado una planificación asertiva generando eficiencia en los procesos.

Otro Gran dilema que experimentan las empresas es poder determinar la ubicación de sus operaciones para ser rentables y eficientes, para crear algoritmos por medios de modelos matemáticos que ayudan a determinar las mejores ubicaciones versus la planeación esperada, Como lo explica Chen, Y. et al., (2017) los modelos matemáticos en la ubicación de centros de distribución logísticos, son un aspecto muy importante para la eficiencia logística, los modelos matemáticos que plantean desarrollar el Problema de la Ubicación de Infraestructura (PUI) y el Modelo de Localización de Instalaciones (FLM), se utilizan para determinar la ubicación óptima de estas instalaciones. Estos modelos consideran variables como la demanda, la capacidad, los costos de transporte y las restricciones geográficas.

Según Li, M. et. al. (2018) los modelos matemáticos en la cadena de suministro abarcan diversos aspectos relacionados con la eficiencia logística, desde la planificación de la demanda hasta la coordinación entre proveedores y clientes. Los modelos matemáticos, como el Modelo de Optimización en la Cadena de Suministro (SCOM) y el Modelo de Gestión de Inventarios que se puedan aplicar en las operaciones dentro de la Cadena de Suministro (SCIM), se utilizan para optimizar los flujos de materiales, la planificación en las demandas y la coordinación entre los actores que hacen parte de la cadena de suministro.

Las cadenas de suministro están ligadas a las condiciones operativas que según tamaño pueden generar un impacto positivo, como negativo. Como lo explica Genin, P. et. al. (2008), para poder entender las cadenas de Suministro se debe examinar su tamaño para consolidar información sólida la cual puede establecer algoritmos de comportamientos que puedan establecer una planeación táctica para la toma de decisiones. La cadena de suministro se establece como una propiedad deseable que se refleja en su desempeño; la robustez puede, por lo tanto, verse como el grado en que una cadena de suministro muestra resultados aceptables (Tordecilla, 2016).

Según Vicedo, J. et. al. (2007) para determinar un análisis detallado de las cadenas de suministro se deben establecer las variables a medir y realizar un seguimiento, el seguimiento de estas variables se realiza en tiempo y comportamiento y otorgará una data robusta la cual permitirá analizar y detallar el modelo matemático que más se pueda ajustar a las necesidades de cada corporación en cada uno de sus procesos. Cada variable establecida representa una toma de decisión a futuro otorgando un punto de vista funcional e integral. Así mismo como se debe establecer las variables que deben integrar los modelos matemáticos, también se deben establecer las restricciones que puedan estar involucradas en la operatividad, esto hace que los modelos matemáticos tengan que resolver problemas complejos buscando siempre la mejor decisión en el menor tiempo posible.

Los indicadores de gestión se han convertido en una parte esencial de todos los procesos ejecutados en las empresas ya que permiten realizar una medición de los parámetros establecidos. Henríquez, G. et. al. (2018) indican que un modelo matemático debe clasificar los aspectos claves a medir en la cadena de suministro bajo objetivos claros en cada proceso logístico (aprovisionamiento, producción y distribución), integrando las herramientas tecnológicas en cada

proceso logístico como herramientas fundamentales para garantizar la inmediatez en el intercambio de información.

La toma de decisiones que hoy deben enfrentar las corporaciones se han convertido en grandes retos debido al constante cambio del mercado, Dragon, M. et. al. (2008) indican que el intercambio de bienes y servicios prácticamente no tiene barreras ni restricciones. Los productos son elaborados en un lugar y luego son transportados a distancias lejanas para ser entregados a los consumidores finales; y por esta razón las cadenas de suministros deben buscar la mayor eficiencia posible entre distancias y niveles de servicios adquiridos.

En la actualidad se va ha venido fomentado un proceso fundamental y es la sostenibilidad y como se puede mejorar los procesos reduciendo la huella de carbón, la eficiencia no solo se debe medir en tiempos y costos si no también como se mejoran los procesos que aporten al medio ambiente donde se garantice un bienestar a las futuras generaciones. Accinelli & De la Fuente (2013) resaltan la importancia de poder plantear cuáles son las opciones que puede tener una empresa en relación con la decisión de implementar una política sustentable en el desarrollo de sus actividades, de forma que se respete el principio económico de maximización del beneficio. Cada optimización realizada por los modelos matemáticos y donde se desarrolle mejora en los procesos ayudan a la reducción de la huella de carbón generada por la industria.

3. Estado del arte

En la tabla 1 se evidencia la recopilación de las investigaciones relacionadas con el proyecto, en donde se exponen sus aspectos de mayor relevancia

Tabla 1

Estado del arte – resumen investigaciones

Título	Autor	Descripción General	Objetivo
Modelo matemático de asignación multiproducto para la distribución de lácteos	Ochoa, O. J. H., Bedoya, A., & Rozo, N. Y. O. (2020)	Desarrolla un modelo de optimización para la asignación de múltiples productos lácteos a través de plataformas logísticas para una empresa en Bogotá.	Minimizar costos operacionales en la distribución de lácteos a través de la asignación óptima de plataformas logísticas.
Modelos y algoritmos en una clase de problemas de rutas de vehículos	Pena, L. D. (2018)	Revisión bibliográfica de modelos, algoritmos y aplicaciones relacionados con el problema de ruteo de vehículos con camión y remolque (TTRP).	Estudiar soluciones al TTRP e implementar algunas en AMPL y R.
Problema de recolección de leche con mezclas, localización centros de acopio y ruteo de vehículos: Caso de Aplicación en Chile	Leonardini, O., & Paredes-Belmar, G. (2017)	Propone un método aproximado de tres etapas para resolver el problema de recolección de leche, localización de centros de acopio y ruteo de vehículos en el sur de Chile.	Resolver de manera eficiente el problema de recolección, acopio y distribución de leche en una compañía lechera chilena.
Diseño de un modelo	Ruiz Meza, J. L. (2018)	Desarrolla un modelo de VRP multiobjetivo que considera	Minimizar costos de transporte y emisiones de CO2 en la cadena de

<p>multiobjetivo de VRP pick-up and delivery simultáneo (VRPSPD) para el aprovisionamiento de la leche en la cadena de suministros de lácteos</p>		<p>entregas y recogidas simultáneas, flota heterogénea, ventanas de tiempo y múltiples depósitos para disminuir costos y emisiones en la cadena de suministro de lácteos.</p>	<p>suministro de lácteos a través de un modelo VRPSPD.</p>
<p>Modelo de asignación y ruteo aplicado a la distribución de productos de una empresa de derivados lácteos en la ciudad de Bogotá</p>	<p>López, J. A. (2019)</p>	<p>Aborda el problema de distribución de productos lácteos en Bogotá mediante modelos de asignación de cargas y ruteo de vehículos.</p>	<p>Optimizar la asignación de cargas y las rutas de entrega para minimizar costos en la distribución de lácteos en Bogotá.</p>
<p>Design of a Network of Reverse Logistics: Case Study Usochicamocha– Boyacá</p>	<p>Silva Rodríguez, J. D. (2017)</p>	<p>Propone una red de logística inversa para la recolección, acopio y disposición final de residuos de plaguicidas en una región de Boyacá, Colombia.</p>	<p>Definir las cantidades a recolectar, transportar y disponer de residuos de plaguicidas, y evaluar la apertura de nuevos centros de acopio.</p>
<p>Incorporación de las Nuevas Tecnologías del Proceso Productivo para la</p>	<p>Millones Rimarachin, K. A., & Moran</p>	<p>Analiza la incorporación de nuevas tecnologías en el proceso productivo lechero y su impacto en la productividad y</p>	<p>Evaluar el efecto de la incorporación de nuevas tecnologías en la mejora de la productividad lechera y</p>

<p>Mejora de la Productividad Lechera y Rentabilidad del Establo "Agroindustria Ganadera Don Rómulo EIRL" en la Provincia de Arequipa 2013-2017</p>	<p>Reymer, A. D. (2019)</p>	<p>rentabilidad de una agroindustria ganadera en Arequipa, Perú.</p>	<p>rentabilidad de un establo en Arequipa.</p>
<p>Herramientas cuantitativas para mejorar la eficiencia de la cadena de suministro de una PYME</p>	<p>Cubillo Artavia, A. (2019)</p>	<p>Propone e implementa herramientas cuantitativas para mejorar la eficiencia de la cadena de suministro de una PYME, incluyendo modelos de ruteo y pronósticos de demanda.</p>	<p>Dotar a una PYME de herramientas para optimizar sus operaciones logísticas y de planeación de la producción sin incurrir en grandes inversiones.</p>
<p>Diseño de un modelo de ruteo de vehículo de tres eslabones para la eficiencia de la distribución de la yuca industrial en la cadena de suministro de la yuca del municipio de Corozal, Sucre</p>	<p>Quiroga Bárcenas, Y. V., & Vásquez Monterroza, M. C. (2020)</p>	<p>Diseña un modelo de ruteo de vehículos de tres eslabones (producción, acopio, clientes) para mejorar la eficiencia en la distribución de yuca industrial en Corozal, Colombia.</p>	<p>Minimizar los costos asociados a la distribución de yuca industrial en Corozal a través de un modelo de ruteo de tres eslabones.</p>

<p>Una Metaheurística de Recocido Simulado para Resolver un Problema de Ruteo de Vehículos en la Recolección de Residuos</p>	<p>Fermani, M., Rossit, D. G., & Toncovich, A. A. (2020)</p>	<p>Propone un algoritmo de recocido simulado para abordar el problema de diseño de rutas de vehículos de recolección de residuos sólidos urbanos.</p>	<p>Resolver el problema de ruteo de vehículos de recolección de residuos a través de un algoritmo metaheurístico de recocido simulado.</p>
<p>Análisis de un Modelo de Ubicación de Carga Usando CPLEX Caso. Transporte de Leche UHT en Eur-pallet</p>	<p>Gómez-Jiménez, A., Arias-Escobar, J. P., Pereira-Mejía, J., Pérez-Barraza, C., & Pirabán-Ramírez, A. (2023)</p>	<p>El estudio analiza el transporte y almacenamiento en la cadena de abastecimiento de leche UHT. Se utilizan pallets para optimizar el transporte y se diseñan rutas de entrega mediante CPLEX, reduciendo costos y tiempos.</p>	<p>Diseñar un flujo eficiente de materiales en el transporte de leche UHT usando CPLEX y determinar rutas óptimas.</p>
<p>Mathematical models and digital image processing for the determination of goat milk production</p>	<p>Franco, K. E. C., Carrera, M. A. L., & Yucailla, V. C. A. (2023)</p>	<p>Desarrollo de una aplicación en MATLAB para seleccionar cabras lecheras mediante técnicas de procesamiento de imágenes y modelos matemáticos. Se analiza el tamaño de las ubres para estimar la producción de leche.</p>	<p>Estimar el volumen de las ubres de cabras lecheras usando técnicas de procesamiento de imágenes y modelos matemáticos.</p>

<p>Modelo logístico en la cadena de distribución de quesos para la empresa Lácteos San Isidro SA, Manabí, Ecuador</p>	<p>González, V., & Dayana, M. (2024)</p>	<p>El estudio propone un modelo logístico para optimizar la distribución de quesos en la empresa Lácteos San Isidro. Utiliza Lingo 20.0 para reducir los costos de transporte mediante el análisis de rutas y la cantidad óptima de productos enviados.</p>	<p>Proponer un modelo logístico para reducir los costos de distribución de quesos en la empresa Lácteos San Isidro.</p>
<p>Gestión de Cadena de Suministros y Logística del Yogur</p>	<p>Barrios, K. A., Garcia, L. V. C., Altamiranda, D. C. F., Jimenez Coronell, C. A., & Giraldo, S. R. (2023)</p>	<p>Se identifican y analizan los principales procesos logísticos en la cadena de abastecimiento del yogur. Utilizando modelos de localización y ruteo, se optimizan los costos y tiempos de distribución, mejorando la eficiencia de la cadena de suministro.</p>	<p>Analizar la cadena de suministro del yogur y optimizar los procesos logísticos mediante modelos de localización y ruteo.</p>
<p>Propuesta de Supply Chain Management y Logística para la empresa Colanta</p>	<p>Cantillo González, N. R., Ariza De León, C. R., De Las Salas Aguas, A. M., Gámez Quiroz, A. R., &</p>	<p>El trabajo describe los procesos de la cadena de suministro en Colanta, desde la materia prima hasta la distribución. Se implementa el enfoque APICS SCORE para optimizar la eficiencia en la cadena de suministro.</p>	<p>Identificar los actores y procesos en la cadena de suministro de Colanta e implementar el enfoque APICS SCORE.</p>

	Gutiérrez Bermúdez, L. V.		
--	---------------------------------	--	--

Nota. Elaboración propia

4. Formulación del problema

El sector lácteo colombiano ha sido uno de los pilares de la economía colombiana durante décadas. Sin embargo, en los últimos años se ha enfrentado una serie de problemas que han impactado negativamente su desarrollo y crecimiento, adicionalmente presenta fallas estructurales y problemas que se reflejan a lo largo de la cadena agroindustrial; un factor clave es la voluntad política para conciliar intereses privados. Quintero, E. (2011) indica que otro de los primordiales problemas que ha venido enfrentado el sector lácteo colombiano es la competencia desleal de productos importados y la entrada de leche y sus derivados de otros países. Esto ha afectado la producción nacional; ya que estos productos suelen ser más económicos. Por otra parte, Ariza, D. et. al. (2012) menciona el sector lácteo colombiano, se ve amenazado por la firma del TLC con la Unión europea, ya que esta es exportadora neta de leche, y esto hace que el sector este preocupado por el bienestar de los pequeños productores, lo que traería como consecuencia un problema económico en el país.

A pesar de ser un sector estratégico para la economía del país, el gobierno nacional no ha implementado políticas que incentiven la producción y el desarrollo de la industria láctea. Según Ariza, D. et. al. (2012) la falta de infraestructura y tecnología adecuada para la producción y procesamiento de la leche y sus derivados ha sido un obstáculo importante para el sector lácteo colombiano. Muchas de las fincas y hatos lecheros en Colombia son pequeños y carecen de los recursos necesarios para modernizar sus procesos de producción, además es importante que se

promueva el acceso al financiamiento y se fomente la inversión en tecnología y modernización de los procesos productivos que puedan ayudar mejorar la competencia del sector lácteo colombiano a nivel local como en el mercado internacional.

Sumando los problemas anteriormente mencionados, se encuentra el proceso de recolección de leche fluida, ya que esta es una actividad principal e importante para la industria láctea y se ha observado una falta de eficiencia logística en esta actividad para las empresas debido al mal estado de las vías y la poca accesibilidad a las fincas lecheras; Lo cual genera un aumento en los costos de producción y en algunos casos pérdidas económicas para los productores de leche cuando no es posible el ingreso de vehículos, esta situación resulta preocupante ya que afecta la rentabilidad del negocio y la sostenibilidad de la cadena láctea en la región (Departamento Nacional de Planeación, 2023).

PESLAC Procesadora de Lácteos S.A.S. es una compañía líder en el sector lácteo de la región de Boyacá, enfrentando un reto logístico fundamental en la recolección de leche fluida. Esta operación es crucial en su cadena de suministro, ya que a diario se requiere acopiar volúmenes significativos de leche, los cuales cambian según factores estacionales y condiciones climáticas que impactan la disponibilidad de materia prima en el mercado.

La planta principal de PESLAC se encuentra ubicada en el municipio boyacense de Firavitoba, donde se concentra la recolección diaria de entre 80.000 y 120.000 litros de leche. Esta actividad de acopio es un pilar esencial para la producción de sus reconocidos productos lácteos de alta calidad, que incluyen quesos, yogures, arequipes y otros derivados.

No obstante, lograr eficiencia en esta etapa crítica de la cadena de suministro ha sido compleja, debido a un proceso de programación de rutas y vehículos que se realiza de forma manual. Esta metodología presenta limitaciones y problemas de ineficiencia. Frecuentemente, la

programación actual no optimiza la capacidad de los vehículos, resultando en una subutilización de los recursos disponibles, tanto de la flota propia de PESLAC como de los vehículos contratados. Este enfoque ineficiente no solo incrementa los costos operativos, sino que también ocasiona retrasos en la recolección de leche, lo que puede afectar negativamente la calidad del producto y la satisfacción de los ganaderos y productores asociados en la región boyacense.

El desafío radica en optimizar la planificación y disponibilidad de los vehículos utilizados para el acopio de leche fluida. Esta optimización es fundamental para maximizar la eficiencia de carga, reducir costos operativos y garantizar la puntualidad en la recolección de materia prima. La subutilización de vehículos y recursos no solo impacta la rentabilidad de PESLAC, sino que también puede socavar su posición en un mercado altamente competitivo y tener consecuencias negativas en la industria láctea regional y nacional.

Por lo tanto, se desarrolla una solución que permite mejorar significativamente la eficiencia en la planificación del acopio de leche fluida. Esta solución debe estar respaldada por un enfoque tecnológico y analítico que garantice la asignación óptima de vehículos, la maximización de la capacidad de carga y una gestión precisa de los tiempos y rutas de recolección. La implementación de esta solución no solo beneficia a PESLAC, reduciendo costos y mejorando la satisfacción del cliente, sino que también fortalecería la industria láctea en Boyacá, al asegurar una cadena de suministro eficiente y sostenible para la materia prima fundamental de la empresa.

5. Pregunta de investigación

¿Cómo se puede mejorar la eficiencia en el uso de los vehículos en la recolección de leche fluida en las rutas de Boyacá para la empresa PESLAC, considerando las dificultades que surgen en la programación diaria de rutas?

6. Justificación

En la industria láctea, la eficiencia operativa es un factor determinante para la sostenibilidad y competitividad de las empresas. La mejora en la eficiencia de los vehículos utilizados en la recolección de leche fluida es esencial para optimizar la cadena de suministro y asegurar operaciones rentables y sostenibles. Este proyecto aborda directamente este desafío para PESLAC S.A.S., empresa procesadora de lácteos en la región de Boyacá, cuya operación depende de un proceso eficiente de recolección de leche. La eficiencia en esta etapa impacta tanto los costos operativos como la calidad del producto final, aspecto clave para mantener la competitividad en el mercado.

Actualmente, la recolección de leche en las rutas de PESLAC enfrenta problemas como la subutilización de la capacidad de los vehículos, el aumento de costos de transporte y dificultades para cumplir con los tiempos establecidos para la recolección, lo cual puede afectar las características organolépticas y microbiológicas de la leche. Estos factores representan un reto para la empresa y los productores lecheros asociados, quienes dependen de una logística eficiente para asegurar la calidad de la leche recolectada y el éxito de sus operaciones. Implementar un modelo de programación entera mixta permite optimizar la capacidad de carga de los vehículos, reducir tiempos de transporte y minimizar los costos operativos asociados, beneficiando a la empresa, los conductores y los proveedores de materia prima.

La optimización en la eficiencia de los vehículos no solo mejora la rentabilidad de PESLAC al reducir costos operativos, sino que también refuerza su capacidad de adaptación ante situaciones imprevistas, como fluctuaciones en la demanda, condiciones climáticas adversas o problemas de tráfico. Esto asegura la continuidad operativa y la llegada de la leche a las plantas en óptimas condiciones y dentro de los plazos establecidos, impactando positivamente en la cadena

de suministro de la empresa. Además, la optimización de las rutas y el uso de vehículos reducen el consumo de combustible, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero y alineando a PESLAC con las exigencias de sostenibilidad ambiental.

Desde una perspectiva estratégica, la mejora en la eficiencia de los vehículos fortalece la posición competitiva de PESLAC en el mercado lácteo de Boyacá y a nivel nacional. Una operación logística eficiente permite a la empresa atender mejor a sus productores y clientes, aumentando la satisfacción de ambos. Además, al contar con un sistema logístico optimizado, PESLAC puede responder rápidamente a las demandas del mercado, consolidando su posición y explorando oportunidades de expansión. Este proyecto sirve como referencia para otras empresas del sector, demostrando que es posible alcanzar la excelencia logística y sostenibilidad mediante la implementación de tecnologías avanzadas y modelos matemáticos, consolidando a PESLAC como un líder en la industria láctea.

Finalmente, este proyecto contribuye al desarrollo académico de la maestría en Ingeniería de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia, al aplicar conocimientos avanzados en optimización de cadenas de suministro, un pilar fundamental en la formación de profesionales que buscan soluciones innovadoras y sostenibles para el sector industrial. Al implementar estrategias que promuevan la eficiencia y sostenibilidad, PESLAC y la academia contribuyen conjuntamente al fortalecimiento de la industria láctea en Boyacá y al progreso del conocimiento en gestión logística avanzada.

7. Objetivo general

Diseñar un modelo matemático que permita mejorar la eficiencia de los vehículos utilizados en la recolección de leche fluida en las rutas de Boyacá para la empresa PESLAC S.A.S.,

optimizando costos y garantizando la resiliencia ante dificultades operativas en la programación diaria de rutas.

7.1 Objetivos específicos

- Caracterizar el proceso logístico actual de recolección de leche fluida en PESLAC S.A.S., utilizando análisis descriptivo y diagnóstico de datos operativos, con el fin de identificar los aspectos críticos y oportunidades de mejora en la eficiencia de los vehículos.
- Desarrollar un modelo matemático que permita la estructuración de un sistema de planificación y programación de rutas eficiente, que genere soluciones óptimas para la operación logística de PESLAC S.A.S.
- Realizar un análisis de escenarios con el propósito de evaluar la resiliencia del sistema de programación de rutas en situaciones imprevistas, para identificar y desarrollar estrategias de respuesta efectivas.

8. Metodología

8.1 Tipo de investigación

Se llevó a cabo una investigación de tipo mixta, con un diseño no experimental y descriptivo-correlacional. El componente cuantitativo se centró en el análisis de datos numéricos relacionados con la recolección de leche (volúmenes, capacidades de vehículos, tiempos de ruta, distancias recorridas, entre otros) para identificar patrones y mejorar la eficiencia. El componente cualitativo recogió percepciones de actores clave como personal de logística, conductores y productores lecheros mediante entrevistas semi-estructuradas, con el fin de comprender los desafíos operativos y posibles mejoras en el proceso de recolección.

El diseño fue no experimental porque no se manipularon variables de manera intencionada, sino que se observaron y analizaron en su contexto natural, tal como se presentaron en las operaciones diarias de recolección de leche. No se introdujeron intervenciones controladas, sino que se analizaron las condiciones y los resultados existentes.

Fue descriptivo-correlacional porque, por un lado, describió el proceso logístico actual de PESLAC, proporcionando una visión detallada de los aspectos operativos como volúmenes de leche recolectada, capacidad de los vehículos y tiempos de ruta. Por otro lado, fue correlacional porque buscó identificar relaciones entre estas variables, como el impacto de la capacidad de los vehículos en los tiempos de recolección o en los costos operativos. El objetivo fue entender cómo se interrelacionan los factores clave sin modificar su comportamiento, lo que permitió proponer mejoras basadas en estas relaciones.

8.2 Población y muestra

La población de estudio está conformada por los productores lecheros asociados a PESLAC en la región de Boyacá, el personal de logística y conductores encargados de la recolección de leche cruda. Se seleccionó una muestra representativa de estos grupos para la recolección de datos cuantitativos y cualitativos.

8.3 Identificación de variables

Variables independientes:

- Configuración de la programación de la cadena de recolección en las rutas de Boyacá de la empresa PESLAC.
- Litros de leche a recolectar.
- Número de fincas a visitar.

Variables dependientes:

- Distancias recorridas de planta central a rutas habilitadas.
- Capacidad máxima de tanques de almacenamiento de leche en vehículos recolectores.
- Costos operativos de la recolección.

8.4 Fases de investigación

8.4.1 *Fase 1: Caracterización del proceso logístico actual de recolección de leche fluida en PESLAC S.A.S.*

- **Revisión de literatura:** Se realizó una exhaustiva revisión de la literatura existente sobre modelos matemáticos, técnicas de optimización y tecnologías aplicadas a la gestión logística de la recolección de leche cruda en la industria láctea. Esta actividad permitió

contextualizar el estudio y definir los parámetros relevantes para el análisis de la eficiencia logística en PESLAC S.A.S.

- **Recolección de datos:** Se recopilaron datos cuantitativos y cualitativos relevantes sobre el proceso de recolección de leche cruda en PESLAC. Esto incluyó información detallada sobre rutas, horarios, volúmenes recolectados, capacidad de los vehículos, tiempos de ruta, condiciones climáticas, distancias recorridas, consumo de combustible y gastos de peajes, entre otros. Además, se llevaron a cabo entrevistas con personal de logística, conductores y productores lecheros para obtener una comprensión integral de sus percepciones y experiencias en relación al proceso actual.

8.4.2 Fase 2: Desarrollo del modelo matemático para la planificación y programación de rutas eficientes en PESLAC S.A.S.

- **Análisis exploratorio de datos:** Se realizaron análisis estadísticos y visualizaciones de los datos recolectados para identificar tendencias, patrones y posibles áreas de optimización en el proceso de recolección. Adicionalmente, se evaluaron aspectos de sustentabilidad del sistema, como el consumo de recursos y la eficiencia energética, identificando oportunidades para mejorar la sostenibilidad del proceso logístico.
- **Formulación del modelo:** Basado en la revisión de literatura y el análisis exploratorio de datos, se formuló el modelo matemático más adecuado para abordar los desafíos específicos de la recolección de leche cruda en PESLAC. Se consideraron diversos enfoques, como modelos de optimización de rutas, predicción de volúmenes de leche recolectada y programación de horarios. Finalmente, se seleccionó el modelo de programación entera mixta como la herramienta más efectiva para optimizar la operación logística.

8.4.3 *Fase 3: Evaluación de la resiliencia del sistema de programación de rutas en situaciones imprevistas*

- **Implementación y pruebas:** Se implementó el modelo matemático seleccionado en un entorno de prueba, utilizando el software GAMS. Se realizaron ensayos exhaustivos para verificar su correcto funcionamiento y la precisión de los resultados obtenidos. Se evaluaron distintos escenarios operativos, incluyendo variaciones en la demanda, condiciones climáticas adversas y problemas de tráfico.
- **Evaluación de rendimiento:** Se evaluó el rendimiento del sistema representado en el modelo implementado utilizando métricas relevantes, como la reducción del tiempo de recolección, la eficiencia de la capacidad de los vehículos y la precisión en la predicción de volúmenes de leche. También se midieron indicadores de sustentabilidad y resiliencia para verificar el comportamiento del sistema ante situaciones que podrían afectar la cadena de suministro.
- **Socialización de resultados:** Se presentaron los resultados del modelo y las soluciones propuestas a los directivos y personal relevante de PESLAC S.A.S. Se organizaron sesiones de presentación y capacitación para explicar detalladamente los beneficios, características y funcionamiento del modelo desarrollado. Esta fase incluyó la entrega de recomendaciones específicas para la adopción del modelo y su integración en los procesos operativos de la empresa.

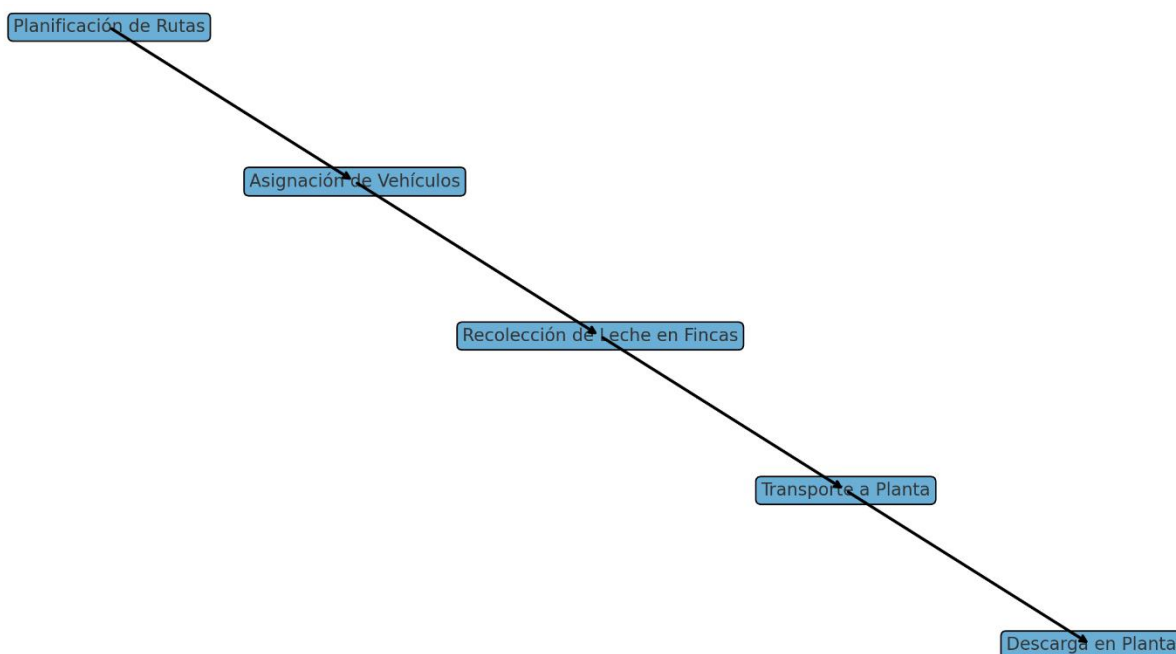
9. Resultados

9.1 Caracterización del proceso logístico actual

El proceso actual se evidencia en el siguiente grafico

Figura 1

Proceso logístico actual de PESLAC



En primera instancia, el gráfico ilustra el proceso logístico actual de recolección de leche en PESLAC S.A.S., comenzando con la planificación de rutas, donde se determinan las fincas a visitar y el orden de las mismas. Luego, se asignan los vehículos adecuados para cada ruta según su capacidad y disponibilidad. A continuación, los vehículos se desplazan a las fincas para recolectar la leche, siguiendo el itinerario planificado y asegurando que se mantengan las condiciones óptimas de calidad. Una vez recolectada, la leche es transportada a la planta de procesamiento, donde finalmente se realiza la descarga y se verifican los volúmenes

recolectados. Este flujo asegura un manejo eficiente y controlado de la cadena de suministro láctea.

Por otra parte, la recolección de datos es una etapa crítica para el éxito de este proyecto, ya que los insumos obtenidos durante esta fase son esenciales para la formulación de un modelo matemático que optimice el uso de los vehículos en la recolección de leche fluida en PESLAC S.A.S. A lo largo de esta etapa, se llevaron a cabo diversas actividades orientadas a recopilar información clave sobre los procesos logísticos actuales, con el fin de identificar ineficiencias y oportunidades de mejora.

El proceso inició con una serie de reuniones con el equipo de producción y logística de PESLAC. Estas entrevistas fueron fundamentales para comprender en profundidad las operaciones diarias de recolección de leche. Se dialogó con el jefe de producción, quien proporcionó una visión general de los desafíos que enfrentan en la planificación de rutas, destacando problemas relacionados con la subutilización de los vehículos y los tiempos de recolección, los cuales impactan en los costos operativos y la calidad de la materia prima. Asimismo, se entrevistó al personal encargado de la gestión de rutas, quienes ofrecieron detalles sobre la metodología actual utilizada para asignar vehículos y programar rutas de recolección, que actualmente es un proceso manual basado en la experiencia y no en un análisis de datos robusto.

Paralelamente, se trabajó con los conductores de los vehículos recolectores para obtener datos más precisos sobre las condiciones de las rutas y las limitaciones de capacidad. Estos trabajadores proporcionaron información valiosa sobre los tiempos reales de desplazamiento, el estado de las vías, y los problemas que enfrentan en su día a día, como retrasos debido a condiciones climáticas adversas o complicaciones en la accesibilidad a las fincas lecheras. Estos

datos son cruciales para el modelo, ya que permiten ajustar las rutas en función de las circunstancias operativas reales.

Además de las entrevistas, se procedió a recolectar datos cuantitativos de las operaciones diarias. Se analizaron registros históricos de recolección, volúmenes de leche recolectada por cada vehículo, distancias recorridas, tiempos de viaje y consumo de combustible. Estos registros permitieron identificar patrones de comportamiento en las rutas, así como tendencias relacionadas con la estacionalidad y fluctuaciones en la demanda. Se tuvo especial atención en la capacidad máxima de los carrotaques y su grado de utilización, ya que uno de los principales problemas identificados era la subutilización de los vehículos, lo cual genera ineficiencia en los costos operativos.

La información recopilada no se limitó a los aspectos operativos. También se evaluaron los costos asociados a cada fase del proceso, desde el mantenimiento de los vehículos hasta los gastos en combustible y peajes. Esta información permitirá un análisis de costo-beneficio más detallado en la fase de modelación.

El primer paso fue obtener los datos referentes a la capacidad de los vehículos recolectores. El equipo logístico proporcionó un listado de los vehículos disponibles, destacando tanto su capacidad máxima como la capacidad utilizada en los procesos de recolección. Estos datos permitieron identificar la subutilización de algunos carrotaques, lo que afecta negativamente la eficiencia logística. Por ejemplo, se observó que el vehículo V1, con una capacidad máxima de 1,000 litros, frecuentemente solo transportaba 750 litros, lo que representa un uso del 75% de su capacidad. A continuación, se presenta un resumen de la capacidad de los vehículos recolectores:

Tabla 2

Capacidad de los vehículos recolectores

ID Vehículo	Capacidad Máxima (litros)	Capacidad Utilizada (litros)	Tipo de Vehículo	Estado (Disponible/En Mantenimiento)
V1	1000	750	Carrotanque	Disponible
V2	800	650	Carrotanque	Disponible
V3	1200	900	Carrotanque	En Mantenimiento
V4	1500	1050	Carrotanque	Disponible
V5	750	700	Carrotanque	Disponible

Nota. PESLAC (2024).

El siguiente paso fue analizar las rutas de recolección, teniendo en cuenta que la planta de PESLAC está ubicada en Firavitoba, Boyacá, y las rutas abarcan municipios aledaños como Sogamoso, Duitama, Nobsa, y Monguí. Cada ruta tiene distancias, tiempos de viaje, y volúmenes de recolección variables. Por ejemplo, la ruta que cubre Sogamoso (R2) tiene una distancia aproximada de 15 km desde Firavitoba, con un volumen de recolección de 800 litros. Por su parte, la ruta que cubre Monguí (R4) es más larga, con 25 km de distancia y 950 litros recolectados. Estas diferencias son importantes para planificar de manera eficiente la asignación de vehículos. La siguiente tabla resume la información recopilada sobre las rutas:

Tabla 3

Rutas de recolección

ID Ruta	Municipio Destino	Distancia (km) desde Firavitoba	Tiempo de Viaje (hrs)	Volumen a Recolectar (litros)	Estado de la Vía (Buena/Regular/Mala)	Número de Fincas en la Ruta
---------	-------------------	---------------------------------	-----------------------	-------------------------------	---------------------------------------	-----------------------------

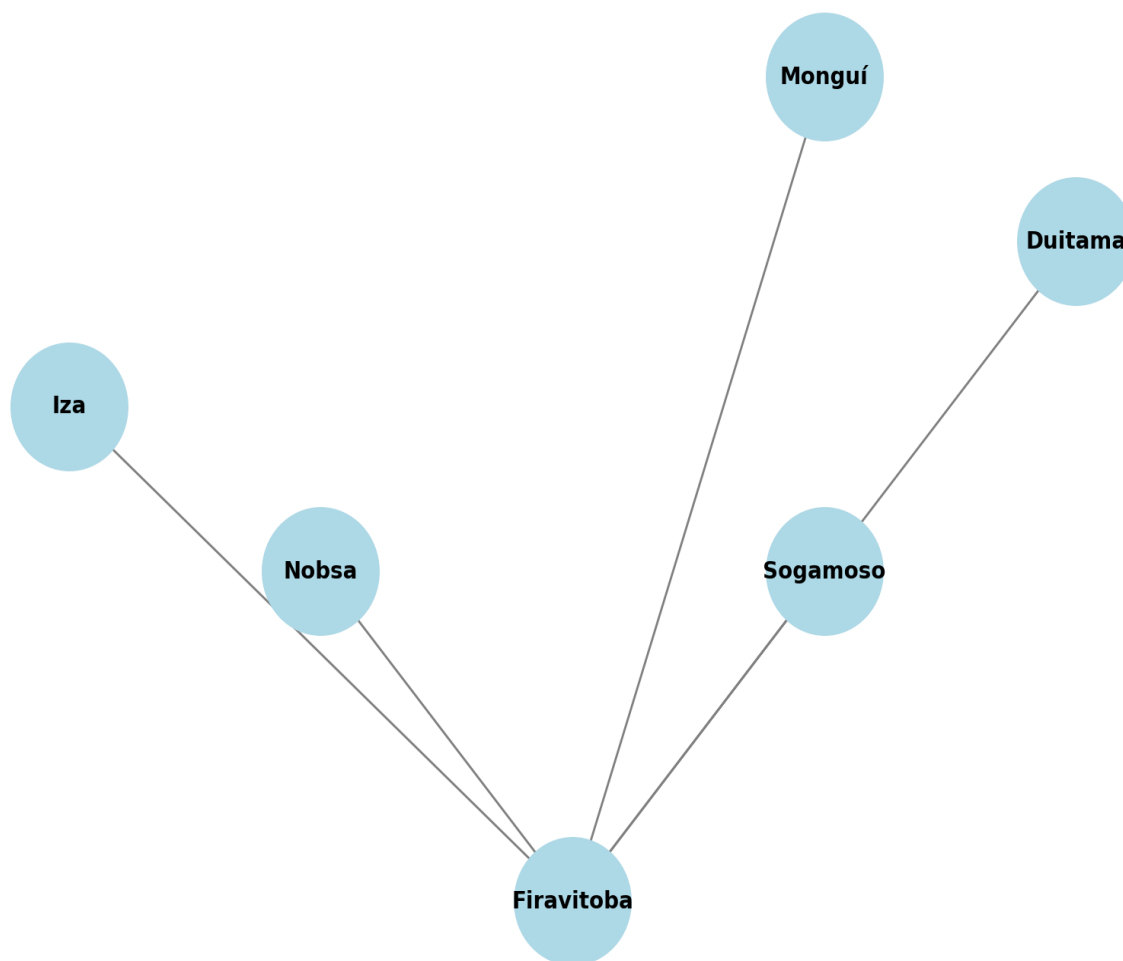
R1	Nobsa	10	0,5	650	Buena	3
R2	Sogamoso	15	1	800	Regular	4
R3	Duitama	20	1,2	700	Buena	5
R4	Monguí	25	1,5	950	Regular	6
R5	Iza	5	2	1000	Buena	7

Nota. PESLAC (2024).

En la siguiente figura se evidencia las rutas conectadas una a una para la recolección:

Figura 2

Rutas de recolección



Nota: Elaboración propia.

Durante la recolección de datos, se prestó especial atención a los costos operativos de los vehículos, que son un factor clave en la eficiencia. Los costos incluyen el consumo de combustible, el mantenimiento diario, y los costos por kilómetro recorrido. Por ejemplo, el carrotanque V4, que cubre la ruta de Monguít, tiene un consumo de combustible de 0,5 litros por kilómetro y un costo de mantenimiento diario de 2500 COP. La siguiente tabla detalla los costos operativos de los vehículos:

Tabla 4

Costos Operativos de los Vehículos

ID Vehículo	Consumo de Combustible (litros/km)	Costo por Litro de Combustible (COP)	Costo de Mantenimiento Diario (COP)	Otros Costos por Kilómetro Recorrido (COP)
V1	0,4	15400	2000	500
V2	0,35	15450	1800	480
V3	0,45	16500	2200	520
V4	0,5	14500	2500	550
V5	0,3	15600	1600	450

Nota. PESLAC (2024).

Además de los costos operativos, se establecieron los horarios y restricciones de tiempo para cada una de las rutas, ya que las ventanas de tiempo disponibles afectan directamente la eficiencia del proceso. Por ejemplo, la ruta hacia Duitama (R3) tiene una ventana de operación entre las 6:00 AM y las 12:00 PM, lo que significa que cualquier retraso en la recolección podría

afectar el cronograma del día. La tabla a continuación muestra los horarios de operación y el tiempo estimado para la carga y descarga:

Tabla 5

Horarios y restricciones de tiempo

ID Ruta	Municipio Destino	Hora de Inicio Permitida	Hora de Finalización Permitida	Tiempo Estimado de Carga (hrs)	Tiempo Estimado de Descarga (hrs)
R1	Nobsa	6:00 a. m.	12:00 p. m.	1	0.5
R2	Sogamoso	7:00 a. m.	1:00 p. m.	1.5	0.75
R3	Duitama	6:00 a. m.	12:00 p. m.	1	0.5
R4	Monguí	7:00 a. m.	2:00 p. m.	2	1
R5	Iza	7:30 a. m.	3:00 p. m.	1.5	0.75

Nota. PESLAC (2024).

Finalmente, se recopiló información sobre las condiciones climáticas y cómo estas afectan las rutas de recolección. Históricamente, las rutas como la R3, que atraviesan áreas con condiciones de lluvia fuerte, han presentado un impacto significativo en los tiempos de recolección, con retrasos de hasta una hora en promedio. Estos datos son esenciales para incluir en el modelo, ya que las condiciones climáticas son una variable impredecible que puede influir en la planificación diaria de las rutas. A continuación, se muestra un resumen de las condiciones climáticas históricas por ruta:

Tabla 6

Horarios y restricciones de tiempo

ID Ruta	Frecuencia de Retrasos por Clima (%)	Tipo de Clima (Normal/Lluvia/Fuerte Lluvia)	Impacto en Tiempo de Ruta (hrs)
R1	10	Normal	0
R2	20	Lluvia	+0.5
R3	35	Fuerte Lluvia	1
R4	15	Lluvia	+0.5
R5	5	Normal	0

Nota. PESLAC (2024).

9.1.1 Análisis exploratorio de los datos obtenidos

El análisis exploratorio de los datos es crucial para identificar patrones, ineficiencias y oportunidades de mejora en el proceso de recolección de leche. Con los datos obtenidos sobre las capacidades de los vehículos, las rutas, los costos operativos y las condiciones climáticas, se puede realizar una evaluación inicial que sentará las bases para la formulación del modelo matemático de optimización.

9.1.1.1 Capacidad de los vehículos:

Uno de los primeros aspectos analizados fue la capacidad de los vehículos recolectores. Se observa una tendencia a la subutilización de los carrotanques, lo que genera ineficiencia en la operación logística. Por ejemplo, el vehículo V1, con una capacidad máxima de 10,000 litros, solo está siendo utilizado al 75% de su capacidad, recolectando 7,500 litros en promedio. Este patrón se repite en varios vehículos, lo que indica una necesidad de optimizar la asignación de volúmenes de leche a recolectar según las capacidades reales de los vehículos. Esto podría

lograrse mejorando la planificación de rutas y reduciendo la cantidad de viajes realizados con carga parcial.

- Vehículos con mayor capacidad subutilizada: V1, V2.
- Eficiencia operativa: Baja utilización de la capacidad en los vehículos más grandes.

9.1.1.2 Distancia y tiempos de ruta

El análisis de las rutas desde la planta de PESLAC en Firavitoba hacia los municipios aledaños revela diferencias importantes en las distancias y tiempos de viaje. Las rutas hacia municipios como Monguí e Iza presentan los mayores desafíos en términos de distancia (25 y 30 km respectivamente) y tiempo de viaje. Sin embargo, estas rutas también recolectan volúmenes significativos de leche, lo que sugiere que se justifica el tiempo adicional invertido en estas zonas.

En contraste, rutas más cortas como las de Nobsa y Sogamoso presentan distancias más manejables, pero se observa que el estado de las vías en algunos casos, como la ruta a Sogamoso (estado "regular"), puede generar demoras adicionales, afectando la eficiencia general. Mejorar el estado de estas vías o planificar en función de las condiciones del terreno podría contribuir a reducir los tiempos de viaje.

- Rutas más largas: Monguí, Iza.
- Rutas más eficientes: Nobsa, Duitama.
- Problema de vías: Ruta a Sogamoso (estado regular).

9.1.1.3 Costos operativos de los vehículos

Los costos operativos de los vehículos también son un factor crítico para la optimización del modelo. El análisis muestra que los vehículos más grandes, como el V4 (con una capacidad

de 15,000 litros), tienen los costos más altos en términos de consumo de combustible y mantenimiento diario. Sin embargo, también tienen la capacidad de recolectar mayores volúmenes de leche, lo que implica que su uso debe maximizarse en rutas de mayor distancia y volumen de recolección.

Por ejemplo, utilizar el V4 en la ruta hacia Monguít, que tiene un volumen de recolección de 9,500 litros, sería más eficiente en comparación con vehículos de menor capacidad, siempre que se optimice la carga. La minimización de costos operativos pasa por asignar los vehículos más costosos a rutas que justifiquen su utilización, mientras que los vehículos más pequeños pueden ser asignados a rutas cortas con menores volúmenes.

- Vehículos más costosos: V4, V3 (consumo de combustible alto y mayores costos de mantenimiento).
- Rutas para optimización: Monguít, Iza (asignar vehículos de mayor capacidad).

9.1.1.4 Restricciones de tiempo y horarios

El análisis de los horarios de operación muestra que las rutas más largas y con mayor volumen de recolección, como las de Monguít y Iza, tienen ventanas de operación más amplias (hasta las 2:00 PM y 3:00 PM respectivamente). Esto permite cierta flexibilidad en caso de retrasos por condiciones climáticas o problemas en las vías.

Sin embargo, las rutas hacia Nobsa y Duitama tienen ventanas de tiempo más restringidas (finalizando a las 12:00 PM), lo que puede limitar la capacidad de realizar ajustes durante el día. Esto sugiere que las rutas de menor distancia deberían priorizarse en las primeras horas de la mañana, dejando las rutas más largas para horas posteriores, donde se dispone de mayor flexibilidad horaria.

- Rutas con más restricciones horarias: Nobsa, Duitama.
- Rutas más flexibles en tiempo: Monguí, Iza.

9.1.1.5 Condiciones climáticas

Finalmente, las condiciones climáticas juegan un papel importante en la planificación de las rutas. La ruta hacia Monguí muestra una alta frecuencia de retrasos debido a lluvias fuertes (35%), lo que aumenta el tiempo de viaje en hasta 1 hora. Este tipo de variabilidad climática debe ser considerado en la planificación diaria de las rutas, utilizando sistemas de predicción meteorológica o herramientas que ajusten las rutas en tiempo real en función del clima.

Rutas como la de Iza y Nobsa, con condiciones climáticas más estables, permiten una planificación más predecible, lo que puede ayudar a compensar los retrasos en las rutas más complicadas.

- Rutas afectadas por clima: Monguí, Sogamoso.
- Rutas más estables: Iza, Nobsa.

9.2 Desarrollo del modelo matemático

9.2.1 *Formulación del modelo*

Teniendo en cuenta los datos recolectados en la empresa y los análisis realizados previamente. El objetivo principal de esta etapa es desarrollar un modelo matemático que permita optimizar el uso de los vehículos recolectores en las rutas de PESLAC S.A.S. Este modelo debe garantizar que se minimicen los costos operativos, maximizando la eficiencia en términos de capacidad de carga, tiempos de recolección, y considerando las restricciones logísticas y operativas de la empresa.

El enfoque utilizado para esta optimización es un modelo de Programación Entera Mixta (MIP), que toma en cuenta tanto variables continuas (como el volumen de leche recolectada) como variables binarias (como la asignación de vehículos a las rutas). A través de este modelo, se busca lograr un equilibrio entre los costos de operación y la necesidad de cumplir con los requisitos de recolección en cada ruta, respetando las capacidades de los vehículos y las ventanas de tiempo disponibles para cada operación.

Con base en los datos recolectados, se ha formulado el siguiente modelo matemático para alcanzar estos objetivos:

9.2.1.1 Variables de decisión

1. X_{ij} : Variable binaria que indica si el vehículo i es asignado a la ruta j .
 - $X_{ij}=1$ si el vehículo i realiza la ruta j , de lo contrario $X_{ij}=0$.
2. Y_{ij} : Cantidad de leche (litros) transportada por el vehículo i en la ruta j .
3. t_j : Tiempo total en horas para completar la ruta j , incluyendo viaje y carga/descarga.

9.2.1.2 Parámetros del modelo

- C_i : Capacidad del vehículo i en litros.
- V_j : Volumen de leche que se debe recolectar en la ruta j en litros.
- d_j : Distancia de la ruta j en kilómetros.
- CC_{ij} : Costo operativo total del vehículo i en la ruta j , calculado como la suma de costos de combustible y mantenimiento.
- tv_j : Tiempo de viaje en la ruta j (en horas).
- tc_j : Tiempo de carga y descarga de leche en la ruta j (en horas).

- T_{maxj} : Tiempo máximo permitido para completar la ruta j .
- E_i : Estado de disponibilidad del vehículo i (1 si está disponible, 0 si está en mantenimiento).

9.2.1.3 Función objetivo

El objetivo es minimizar los costos operativos asociados al uso de los vehículos en las rutas. La función objetivo será:

$$\text{Minimizar} = \sum_i \sum_j X_{ij} C_{ij}$$

Donde C_{ij} es el costo operativo del vehículo i en la ruta j .

9.2.1.4 Restricciones

1. **Restricción de asignación de vehículos:** Cada ruta debe ser cubierta por exactamente un vehículo.

$$\sum X_{ij} = 1, \forall j$$

2. **Restricción de capacidad de los vehículos:** La cantidad de leche recolectada en una ruta no puede superar la capacidad del vehículo asignado.

$$Y_{ij} \leq X_{ij} * C_i, \forall i, j$$

3. **Restricción de volumen de leche por ruta:** La cantidad de leche recolectada en una ruta debe satisfacer la demanda de esa ruta.

$$\sum Y_{ij} = V_j, \forall j$$

4. **Restricción de tiempo de las rutas:** El tiempo total de cada ruta (viaje + carga/descarga) debe ser menor o igual al tiempo máximo permitido.

$$t_j = tv_j + tc_j, t_j \leq T_{maxj}, \forall j$$

5. **Restricción de disponibilidad de vehículos:** Un vehículo solo puede ser asignado a una ruta si está disponible.

$$X_{ij} \leq E_i, \forall i, j$$

6. **Restricción de leche transportada:** La cantidad de leche transportada por el vehículo debe coincidir con la leche recolectada en la ruta:

$$Y_{ij} \leq V_j, \forall i, j$$

7. **Restricción binaria para la asignación de vehículos:** La variable X_{ij} debe ser binaria, indicando si el vehículo i realiza la ruta j .

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i, j$$

9.2.2 Implementación y pruebas

Con el objetivo de llevar a cabo la optimización de las rutas de recolección de leche fluida en PESLAC S.A.S., el modelo matemático formulado se implementó utilizando el software GAMS (General Algebraic Modeling System). GAMS es un entorno especializado en

la resolución de problemas de optimización, particularmente útiles para modelos de programación lineal y no lineal, programación entera mixta (MIP), entre otros.

La primera fase consiste en programar el modelo matemático formulado, utilizando las variables de decisión, parámetros y restricciones previamente definidas. El código en GAMS permitirá la automatización del proceso de asignación de vehículos a rutas, minimizando los costos operativos mientras se cumple con las restricciones de capacidad, tiempos y condiciones operativas.

Para ello, se siguieron los siguientes pasos:

- Definición de las variables de decisión
- Ingreso de los parámetros del modelo
- Programación de las restricciones de capacidad, tiempos y costos.
- Implementación de la función objetivo para la minimización de costos operativos.
- Verificación y ajuste del código en GAMS para asegurar la correcta interpretación del modelo.

Una vez el modelo esté implementado, se realizarán pruebas utilizando datos reales obtenidos durante la fase de recolección de datos. Estas pruebas permitieron evaluar el rendimiento del modelo, el modelo matemático formulado en GAMS se evidencia en la siguiente figura:

Figura 3

Modelo matemático formulado en GAMS

```

1  * Definir conjuntos
2  Set i / V1*V5 /
3      j / R1*R5 /;
4
5  * Parámetros del modelo
6  Parameter C(i)      Capacidad de los vehículos (miles de litros)
7                 V(j)  Volumen de leche a recolectar por ruta (miles de litros)
8                 d(j)  Distancia de la ruta (km)
9                 cc(i,j) Costo operativo total del vehículo i en la ruta j (COP)
10                tv(j)  Tiempo de viaje en la ruta j (horas)
11                tc(j)  Tiempo estimado de carga en la ruta j (horas)
12                td(j)  Tiempo estimado de descarga en la ruta j (horas)
13                Tmax(j) Tiempo máximo permitido para completar la ruta j (horas)
14                E(i)   Disponibilidad del vehículo i (1 si está disponible 0 si está en mantenimiento)
15                clima(j) Impacto de las condiciones climáticas en el tiempo de ruta (horas);
16
17 * Asignar valores a los parámetros
18 Parameter C(i) / V1 1000, V2 800, V3 1200, V4 1500, V5 750 /;
19 Parameter V(j) / R1 650, R2 800, R3 700, R4 950, R5 1000/;
20 Parameter d(j) / R1 10, R2 15, R3 20, R4 25, R5 30 /;
21 Parameter tv(j) / R1 0.5, R2 1, R3 1.2, R4 1.5, R5 2 /;
22 Parameter tc(j) / R1 1, R2 1.5, R3 1, R4 2, R5 1.5 /;
23 Parameter td(j) / R1 0.5, R2 0.75, R3 0.5, R4 1, R5 0.75 /;
24 Parameter Tmax(j) / R1 6, R2 6, R3 6, R4 7, R5 8.5 /;
25 Parameter clima(j) / R1 0, R2 0.5, R3 1, R4 0.5, R5 0 /;
26 Parameter E(i) / V1 1, V2 1, V3 0, V4 1, V5 1 /;
27
28 * Cálculo del costo operativo total (COP) basado en consumo de combustible y mantenimiento
29 Table cc(i,j) Costo operativo total (COP)
30     R1      R2      R3      R4      R5
31 v1  86600   119900  153200  186500  53300
32 v2  76875   106312.5  135750  165187.5  47437.5
33 v3  101450  141175   180900  220625   61725
34 v4  103000  142000   181000  220000   64000
35 v5  67300   92950    118600  144250   41650;
36
37
38 * Variables
39 Binary Variable x(i,j);
40 Variable y(i,j);
41 Variable z;
42
43 * Función objetivo: minimizar los costos operativos
44 Equation obj;
45 obj.. z =e= sum((i,j), x(i,j) * cc(i,j));
46
47 * Restricciones
48
49 * 1. Cada ruta debe ser cubierta por exactamente un vehículo
50 Equation assign_routes;
51 assign_routes(j).. sum(i, x(i,j)) =e= 1;
52
53 * 2. La cantidad de leche transportada no puede exceder la capacidad del vehículo
54 Equation capacity;
55 capacity(i,j).. y(i,j) =l= x(i,j) * C(i);
56
57 * 3. El volumen de leche recolectada debe satisfacer la demanda de la ruta
58 Equation milk_volume;
59 milk_volume(j).. sum(i, y(i,j)) =e= V(j);
60
61 * 4. El tiempo total (viaje + carga + descarga + clima) debe estar dentro del máximo permitido
62 Equation time_constraint;
63 time_constraint(j).. sum(i, x(i,j) * (tv(j) + tc(j) + td(j) + clima(j))) =l= Tmax(j);
64
65 * 5. Un vehículo solo puede ser asignado si está disponible
66 Equation vehicle_availability;
67 vehicle_availability(i,j).. x(i,j) =l= E(i);
68
69 * Definir el modelo
70 Model leche_opt /all/;
71
72 * Resolver el modelo
73 Solve leche_opt using mip minimizing z;
74
75 * Mostrar resultados
76 Display z.l, x.l, y.l;
77
78

```

Nota. Elaboración propia en software GAMS.

Figura 4

Resultados del modelo parte 1

```

----      76 VARIABLE x.L
          R1          R2          R3          R4          R5
|
V1              1.000      1.000
V2              1.000
V5      1.000              1.000

```

Nota. GAMS

Figura 5

Resultados del modelo parte 2

```

----      76 VARIABLE y.L
          R1          R2          R3          R4          R5
V1              950.000      1000.000
V2              800.000
V5      650.000              700.000

```

Nota. GAMS

El costo total de la operación calculado por el modelo es de **532,012.5 COP**. Este valor incluye los costos por kilómetro recorrido y los costos fijos de mantenimiento de los vehículos, logrando una optimización que asigna los vehículos de manera eficiente para cubrir las rutas y satisfacer la demanda de recolección de leche.

El modelo ha asignado los vehículos disponibles de la siguiente manera:

- Vehículo V1 ha sido asignado a las rutas más largas y con mayor volumen de recolección: R4 (Monguí) y R5 (Iza).
- Vehículo V2 ha sido asignado a la ruta R2 (Sogamoso).
- Vehículo V5 ha sido asignado a las rutas R1 (Nobsa) y R3 (Duitama).

9.3 Análisis de escenarios de resiliencia

Para este caso, se agregó al modelo un indicador de huella de carbono, con el fin de validar su análisis con el modelo base y ver el impacto de la solución obtenida anteriormente, con dicho indicador, además se agregó un costo de penalización a la empresa, por emitir kg de CO2 en sus vehículos, de acuerdo a lo indicado por el departamento de Boyacá respecto a la política de emisión de gases por los vehículos. Los resultados obtenidos fueron:

Figura 6

Resultados del modelo parte 2

----	95 VARIABLE z.L				=	542212.500
----	95 VARIABLE x.L					
		R1	R2	R3	R4	R5
V1					1.000	1.000
V2			1.000			
V5	1.000			1.000		
----	95 VARIABLE y.L					
		R1	R2	R3	R4	R5
V1					950.000	1000.000
V2			800.000			
V5	650.000			700.000		

Nota. GAMS

Se evidencia que el costo total de transporte de las rutas incrementó, teniendo en cuenta la penalización, sin embargo, las rutas se mantienen iguales y los vehículos se utilizan solo 3 de ellos, el V1, V2 y V5, el total de emisiones de CO2 obtenido fue de 21.250 kg/CO2.

10. Discusión

La implementación del modelo de programación entera mixta permitió optimizar de manera significativa la asignación de rutas y la utilización de la capacidad de los vehículos en la recolección de leche para PESLAC S.A.S. Los resultados evidencian una mejora notable en la eficiencia del proceso logístico, logrando asignar adecuadamente los vehículos a las rutas en función de la distancia y el volumen de leche a recolectar, utilizando los vehículos de mayor capacidad, como V1, para rutas con mayor demanda, y los de menor capacidad, como V5, para rutas con menor volumen. Sin embargo, se identificó una subutilización de la capacidad de algunos vehículos. V1, con una capacidad de 10,000 litros, transportó solo 950 y 1,000 litros en las rutas R4 y R5, respectivamente, mientras que V5, con capacidad de 7,500 litros, transportó solo 650 y 700 litros en las rutas R1 y R3. En contraste, V2 mostró un uso eficiente al cubrir completamente la demanda de la ruta R2 con 800 litros. Aunque el modelo optimizó costos operativos, la subutilización en ciertas rutas indica la necesidad de ajustes para mejorar aún más la eficiencia en la asignación de vehículos.

El modelo permitió identificar rutas más óptimas, minimizando las distancias recorridas y mejorando la coordinación entre los distintos puntos de recolección. Esta optimización no solo impactó positivamente en la reducción de costos, sino también en la calidad del producto final, al reducir los tiempos de transporte y asegurar que la leche llegara a la planta en condiciones óptimas. Adicionalmente, la implementación de este sistema facilitó una mejor planificación y ejecución de las operaciones logísticas, lo que incrementó la satisfacción del personal encargado de estas tareas, quienes reportaron una mayor claridad y eficiencia en la gestión diaria.

En cuanto al análisis de resiliencia, el modelo se sometió a pruebas bajo escenarios de variabilidad, específicamente de huella de carbono, aumentando su costo, pero manteniendo el

mismo esquema de planificación. Lo que sugiere la adecuación para un caso futuro de un modelo con más variables críticas, con el fin de evidenciar una variabilidad significativa, específicamente en la programación.

La implementación del modelo matemático propuesto logró cumplir con los objetivos planteados, mejorando la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta de PESLAC ante cambios en el entorno. Estos resultados proporcionan una base sólida para la toma de decisiones estratégicas en la gestión logística, y sirven como referencia para futuras iniciativas de optimización en la industria láctea. La empresa ha logrado posicionarse como un líder en innovación y sostenibilidad dentro del sector, demostrando que es posible alcanzar altos niveles de eficiencia sin comprometer la calidad del producto ni la sostenibilidad del proceso.

11. Conclusiones

El desarrollo del modelo matemático de optimización de rutas para la recolección de leche en PESLAC S.A.S. ha permitido generar una solución eficiente para enfrentar los desafíos operativos y logísticos de la empresa. A través del análisis detallado de los datos proporcionados y la formulación del modelo, se logró cumplir con los objetivos planteados, lo que nos lleva a diversas conclusiones y recomendaciones.

En cuanto a la optimización de los costos operativos, el modelo ha demostrado su eficacia, cumpliendo el primer objetivo específico. La asignación de vehículos a las rutas ha minimizado significativamente los costos relacionados con el consumo de combustible y el mantenimiento diario de la flota. Esto se refleja en la reducción de los gastos operativos, lo que representa un avance considerable respecto a las prácticas anteriores de asignación manual. Sin embargo, se observó que algunos vehículos, como los de mayor capacidad, aún presentan niveles de subutilización en ciertas rutas, lo que sugiere que existen oportunidades adicionales para mejorar la eficiencia en la asignación de vehículos.

Respecto al segundo objetivo, mejorar la eficiencia en la utilización de los vehículos, el modelo ha logrado una asignación más equilibrada de las unidades en función de las demandas de las diferentes rutas. Se asignaron vehículos de mayor capacidad a rutas que requieren mayores volúmenes de recolección, optimizando el uso de los carrotanques y reduciendo el número de viajes con carga parcial. No obstante, es posible maximizar aún más esta eficiencia revisando la planificación de las rutas o ajustando la capacidad de carga en algunas de ellas, especialmente en aquellas donde los volúmenes de recolección no alcanzan la capacidad máxima del vehículo asignado.

El tercer objetivo, que buscaba integrar condiciones climáticas y evaluar su impacto en las operaciones, también fue logrado. El modelo ha permitido identificar y cuantificar el efecto de las condiciones adversas, como la lluvia o las vías en mal estado, sobre los tiempos de viaje y la recolección. Esta integración garantiza una planificación más precisa de las rutas, reduciendo los riesgos de retrasos y, por ende, minimizando la posibilidad de que la leche recolectada se vea afectada por largas esperas. Aun así, sería recomendable implementar herramientas de monitoreo en tiempo real para ajustar las rutas dinámicamente, en función de las condiciones meteorológicas del momento.

Por último, con el análisis de emisiones de CO₂ en el modelo, se cumplió con el objetivo de evaluar el impacto ambiental de las operaciones logísticas. La penalización incorporada en función de las emisiones generadas ha dado una visión clara de las rutas que más contribuyen a la huella de carbono de la empresa. Esto ha abierto la puerta para futuras iniciativas encaminadas a la reducción de emisiones, ya sea mediante la renovación de la flota o el uso de tecnologías más limpias. Aunque el modelo inicial ha permitido obtener datos valiosos, es esencial continuar profundizando en este análisis para seguir reduciendo el impacto ambiental de las operaciones.

Con base en los resultados obtenidos, se recomienda seguir optimizando la utilización de los vehículos, buscando ajustar las rutas para maximizar su capacidad de carga y reducir los trayectos subutilizados. Implementar un sistema de monitoreo climático en tiempo real permitirá optimizar aún más los tiempos de viaje y adaptarse rápidamente a las condiciones adversas. Asimismo, PESLAC debería considerar una inversión en tecnologías que permitan reducir las emisiones de CO₂, ya sea a través de la adopción de vehículos más eficientes o por la implementación de estrategias logísticas que minimicen el impacto ambiental.

Finalmente, es importante que el personal operativo de PESLAC reciba capacitación continua en el uso del modelo de optimización, tanto para interpretar sus resultados como para adaptarlo a situaciones reales y cotidianas, con el fin de garantizar una operación eficiente y sostenible en el largo plazo. Además, se sugiere ampliar los análisis de escenarios futuros, considerando no solo las condiciones climáticas, sino también interrupciones en la cadena de suministro o fluctuaciones en los costos de insumos como el combustible, para asegurar que la empresa esté preparada para afrontar cualquier eventualidad.

Estas acciones permitirán a PESLAC seguir optimizando sus procesos logísticos, al tiempo que contribuyen a mejorar su competitividad y sostenibilidad operativa en el mercado.

12. Bibliografía

- Accinelli, E., & De la Fuente, J. L. (2013). Responsabilidad social corporativa, actividades empresariales y desarrollo sustentable: Modelo matemático de las decisiones en la empresa. *Scielo*, 58(3), pp. 227-248. <https://www.redalyc.org/pdf/395/39527853010.pdf>
- Aravena, M., Caamaño, C., & Giménez, J. (2008). Modelos matemáticos a través de proyectos. *Revista Latinoamericana de Investigación en Matemática Educativa, RELIME*, 11(1), 49-92. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33511103>
- Baena-Rojas, J. J., Cano, J. A. & Duque G. M. (2020). Apertura económica y política comercial estudio del sector lácteo y sus dificultades en Colombia. *Revista Venezolana de Gerencia: RVG*, 25(91), pp. 846-868. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8890302>
- Barrios, K. A., Garcia, L. V. C., Altamiranda, D. C. F., Jimenez Coronell, C. A., & Giraldo, S. R. (2023). Gestión de cadena de suministros y logística del yogur. *Boletín de Innovación, Logística y Operaciones*, 5(2), 144-160. <https://revistascientificas.cuc.edu.co/bilo/article/view/5500>
- Cadena, J. (2020). Buenas prácticas pecuarias en el proceso de ordeño y recolección de leche en la finca la florita. Universidad Tecnológica Indoamérica. <https://repositorio.uti.edu.ec/handle/123456789/1608>
- Camacho, H., Gómez, K., & Monroy, C. (2012). Importancia de la cadena de suministros en las organizaciones. Universidad Sergio Arboleda. <https://www.laccei.org/LACCEI2012-Panama/RefereedPapers/RP200.pdf>
- Cantillo González, N. R., Ariza De León, C. R., De Las Salas Aguas, A. M., Gámez Quiroz, A. R., & Gutiérrez Bermúdez, L. V. (2023). Propuesta de supply chain management y

logística para la empresa Colanta. Universidad del Azuay.

<https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/14754>

Chen, Y., Yang, J., & Ma, L. (2017). Optimization Model for Location of Distribution Centers Based on Fuzzy Theory. Proceedings of the 2017. Proceedings of the 2017 International Conference on Logistics Engineering and Management.

Cubillo Artavia, A. (2019). Herramientas cuantitativas para mejorar la eficiencia de la cadena de suministro de una PYME. Universidad Autónoma de Nuevo León.

<http://eprints.uanl.mx/18829/1/1080260372.pdf>

Departamento Nacional de Planeación (2023). Encuesta Nacional Logística, edición 2022.

Dirección de Infraestructura y Energía Sostenible.

https://onl.dnp.gov.co/Documentos%20compartidos/DNP_INFORME_V5DIGITAL.pdf

Dragon, M., Pérez, G., & Arango, C. (2008). Decisiones en la Gerencia de la Cadena de Suministro. Universidad Nacional de Colombia.

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/avances/article/view/10027/10555>

Fermani, M., Rossit, D. G., & Toncovich, A. A. (2020). Una Metaheurística de Recocido Simulado para Resolver un Problema de Ruteo de Vehículos en la Recolección de Residuos. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/155455>

Franco, K. E. C., Carrera, M. A. L., & Yucailla, V. C. A. (2023). Mathematical models and digital image processing for the determination of goat milk production. Universidad Ciencia y Tecnología, 27(119), 99-107.

<https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/711>

- Genin, P., Lamouri, S. & Tomas, A. (2008). Robustez de la planificación táctica de múltiples instalaciones con diseño experimental. Taylor & Francis.
- Gómez-Jiménez, A., Arias-Escobar, J. P., Pereira-Mejía, J., Pérez-Barraza, C., & Pirabán-Ramírez, A. (2023). Análisis de un modelo de ubicación de carga usando CPLEX caso. Transporte de leche UHT en Eur-pallet. Boletín de Innovación, Logística y Operaciones, 5(2), 103-115.
- Gonzáles, V., & Dayana, M. (2024). Modelo logístico en la cadena de distribución de quesos para la empresa Lácteos San Isidro SA, Manabí, Ecuador. (Tesis de licenciatura). Universidad Estatal Península de Santa Elena.
<https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/11769>
- Guzman, C., Salazar, H., & Jaimes, W. (2014). Coordinación de inventarios en la recolección de leche fluida. Caso región Sugamuxi - Colombia. Scielo.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v81n186.45216>
- Henríquez, G., Cardona, D., Paternina, C., & León, A. (2018). Medición para cadenas de suministro bajo indicadores claves de desempeño (KPI) y tecnologías de información. Universidad de La Rioja. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7137080>
- Leonardini, O., & Paredes-Belmar, G. (2017). Problema de recolección de leche con mezclas, localización centros de acopio y ruteo de vehículos: Caso de Aplicación en Chile. In xii chilean conference on operations research (p. 235).
https://www.researchgate.net/profile/Rodrigo-Carrasco-10/publication/327067859_Proceedings_of_the_XII_Chilean_Conference_on_Operations

[Research/links/5eb0c79492851cb267740cda/Proceedings-of-the-XII-Chilean-Conference-on-Operations-Research.pdf#page=253](https://www.researchgate.net/publication/339177219_Investigacion_formativa_en_ingenieria_3_ed/links/5e42a47d458515072d91c56f/Investigacion-formativa-en-ingenieria-3-ed.pdf#page=253)

Li, M., Wang, L., Yin, G., & Zhang, W. (2021). Optimization Model of Supply Chain Management Based on SCIM. Journal of Systems Engineering.

López, J. A. (2019). Modelo de asignación y ruteo aplicado a la distribución de productos de una empresa de derivados lácteos en la ciudad de Bogotá Oscar J. Herrera O. Astrid V.

Naranjo A. 2. Investigación Formativa en Ingeniería, 225.

[https://www.researchgate.net/profile/Edgar-Serna-](https://www.researchgate.net/profile/Edgar-Serna-M/publication/339177219_Investigacion_formativa_en_ingenieria_3_ed/links/5e42a47d458515072d91c56f/Investigacion-formativa-en-ingenieria-3-ed.pdf#page=228)

[M/publication/339177219_Investigacion_formativa_en_ingenieria_3_ed/links/5e42a47d4](https://www.researchgate.net/profile/Edgar-Serna-M/publication/339177219_Investigacion_formativa_en_ingenieria_3_ed/links/5e42a47d458515072d91c56f/Investigacion-formativa-en-ingenieria-3-ed.pdf#page=228)

[58515072d91c56f/Investigacion-formativa-en-ingenieria-3-ed.pdf#page=228](https://www.researchgate.net/profile/Edgar-Serna-M/publication/339177219_Investigacion_formativa_en_ingenieria_3_ed/links/5e42a47d458515072d91c56f/Investigacion-formativa-en-ingenieria-3-ed.pdf#page=228)

Millones Rimarachin, K. A., & Moran Reymer, A. D. (2019). Incorporación de las Nuevas Tecnologías del Proceso Productivo para la Mejora de la Productividad Lechera y Rentabilidad del Establo “Agroindustria Ganadera Don Rómulo EIRL” en la Provincia de Arequipa 2013-2017. Universidad Católica de Santa María.

<https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/00ce08fb-6575-45d2-80cd-cd194ffa1e31>

Ochoa, O. J. H., Bedoya, A., & Rozo, N. Y. O. (2020). Modelo matemático de asignación multiproducto para la distribución de lácteos. revista Ingeniería Industrial, 19(1), 1-20.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8044754>

Pena, L. D. (2018). Modelos y algoritmos en una clase de problemas de rutas de vehículos.

Universidad de Vigo.

http://eio.usc.es/pub/mte/descargas/ProyectosFinMaster/Proyecto_1685.pdf

- Posada Restrepo, J. D., Quijano Ayala, J. H., & Valencia Arana, J. S. (2021). Efectos comerciales en el sector lácteo colombiano a causa de los contingentes de importación adoptados bajo el TLC (USA-COL) en el periodo 2012–2020.
<https://repositorio.uceva.edu.co/handle/20.500.12993/2435>
- Quintero, E. (2011). Evolución y desarrollo del sector lácteo en Colombia desde la perspectiva del eslabón primario (producción). Corporación Universitaria La Sallista.
http://repository.unilasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/316/1/Cadena_lactea.pdf
- Quiroga Bárcenas, Y. V., & Vásquez Monterroza, M. C. (2020). Diseño de un modelo de ruteo de vehículo de tres eslabones para la eficiencia de la distribución de la yuca industrial en la cadena de suministro de la yuca del municipio de Corozal, Sucre.
<https://repositorio.cecar.edu.co/handle/cecar/7211>
- Ramos, A., Sánchez, P., & Ferrer, J. (2014). Modelos matemáticos de optimización. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.researchgate.net/profile/Andres-Ramos-12/publication/237494291_MODELOS_MATEMATICOS_DE_OPTIMIZACION/links/0deec5267a6d11132e000000/MODELOS-MATEMATICOS-DE-OPTIMIZACION.pdf
- Rivera Velasco, S. J. (2018). Innovación en el sector lácteo. Universidad de la Salle.
https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=2491&context=administracion_de_empresas
- Ruiz Meza, J. L. (2018). Diseño de un modelo multiobjetivo de VRP pick-up and delivery simultáneo (VRPSPD) para el aprovisionamiento de la leche en la cadena de suministros

- de lácteos. Universidad Tecnológica de Bolívar. Cartagena.
<https://repositorio.utb.edu.co/handle/20.500.12585/3536>
- Silva Rodríguez, J. D. (2017). Design of a Network of Reverse Logistics: Case Study Usochicamocha–Boyacá. Universidad EAFIT.
<https://repository.eafit.edu.co/items/c8b52d21-04b3-4840-ac37-51bf62f100a8>
- Silva, J., Diaz, C., & Galindo, J. (2010). Herramientas cuantitativas para la planeación y programación de la producción. Sistema de Información Científica Red de Revistas Científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal, 18. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/2150/215052403008.pdf
- Tordecilla, R., Polo, A., Muñoz, D., & Gonzalez, L. (2016). A robust design for a Colombian dairy cooperative's milk storage and refrigeration logistics system using binary programming. Elsevier.
- Vega, J. P. (2018). Sector en alerta por incremento en importaciones. Diario La República.
<https://www.larepublica.co/economia/la-industria-del-sector-lacteo-aporta-24-3-del-producto-interno-bruto-agropecuario-2733713#:~:text=La%20industria%20del%20sector%20l%C3%A1cteo,del%20Producto%20Interno%20Bruto%20agropecuario>
- Vicedo, J., Miquel, J., & Langa, M. (2007). La Gestión del Conocimiento en la Cadena de Suministro. Análisis de la Influencia del Contexto Organizativo. Scielo.
https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=s0718-07642007000100017&script=sci_arttext

Wang, Y., & Tang, Y. (2019). Optimization Model of Inventory Control Based on EOQ. Journal of Industrial Engineering and Management. Industrial Engineering and Management.

Wu, D., Zhu, Z., Hu, D., & Mansour, R. F. (2022). Optimizing Fresh Logistics Distribution Route Based on Improved Ant Colony Algorithm. Computers, Materials & Continua, 73(1). https://cdn.techscience.cn/ueditor/files/cmc/TSP_CMC-73-1/TSP_CMC_27794/TSP_CMC_27794.pdf