



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**DISEÑO DE UNA RED DE SUMINISTRO MULTI-CLIENTE EN UNA EMPRESA
DEL SECTOR LÁCTEO DEL VALLE DEL CAUCA**

Programa de Maestría en Ingeniería

Presentado por:

**JOHN ALEXANDER MENESES ROSERO
RODRIGO BERMÚDEZ MARTÍNEZ**

Dirigido por:

JONNY JAIR PANTOJA DÍAZ, Msc.

Pontificia Universidad Javeriana Cali
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Diciembre de 2025

Diseño de una red de suministro multi-cliente en una empresa del sector lácteo del Valle del Cauca.

John A. Meneses ^{a,b}, Rodrigo Bermúdez ^{a,b}

^a *Estudiante Maestría en ingeniería y ciencias*

^b *Departamento de ingeniería civil e industrial, Pontificia universidad Javeriana de Cali, Calle 18 No. 118-250 Cali, Colombia.*

Resumen

El presente proyecto se enfoca en el diseño de una red de suministro multi-eslabón y multi-cliente utilizando modelos de Programación Lineal Entera Mixta para una empresa del sector lácteo. El objetivo principal fue determinar la configuración más eficiente de la red, incluyendo la decisión de apertura de centros de acopio y centros de distribución, así como la definición de los flujos de productos entre estos eslabones. Se minimizó el costo logístico total, que abarca costos fijos de operación de instalaciones y costos variables de transporte, al mismo tiempo que se garantiza el cumplimiento de la demanda de los clientes. El proyecto analiza las interdependencias entre las decisiones estratégicas de infraestructura y las decisiones tácticas de flujo de productos. Para ello se aplicó herramientas de modelado y técnicas de optimización para proporcionar una hoja de ruta clara y aplicable para la configuración de la cadena de suministros, mejorando así la eficiencia operativa, la competitividad y la resiliencia frente a las fluctuaciones del mercado.

Palabras clave: Cadena de abastecimiento, Red Multi-Eslabón, Optimización, AMPL, Distribución, Lácteos.

Abstract

The present project focuses on the design of a multi-echelon, multi-client supply network using Mixed Integer Linear Programming models for a company in the dairy sector. The main objective is to determine the most efficient configuration of the network, including the decision to open collection and distribution centers, as well as the definition of product flows among these echelons. The total logistics cost, encompassing fixed operating costs of facilities and variable transportation costs, was minimized while ensuring that customer demand is satisfied. The project analyzes the interdependencies between strategic infrastructure decisions and tactical product-flow decisions. To this end, modeling tools and optimization techniques were applied to provide a clear and actionable roadmap for configuring the supply chain, thereby improving operational efficiency, competitiveness, and resilience to market fluctuations.

Palabras clave: Cadena de abastecimiento, Red Multi-Eslabón, Optimización, AMPL, Distribución, Lácteos.

1. Introducción

La producción de lácteos en América Latina cumple un papel clave en el bienestar social y desarrollo económico de la región, ya que reúne más de tres millones de productores y contribuye aproximadamente con el 12% de la producción mundial de leche bovina y participa con un 13% y un 7% en las importaciones y exportaciones mundiales de productos lácteos, respectivamente, esta actividad impulsa el desarrollo sostenible al generar cadenas de valor que fortalecen las economías locales y promueven la inclusión laboral, especialmente de jóvenes y mujeres, no obstante, la entrega de productos de calidad exige un alto nivel de procesamiento industrial, y ante la creciente apertura e integración comercial. El sector enfrenta desafíos que comprometen su sostenibilidad en los aspectos social, ambiental y económico [1].

De acuerdo con informes de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, el mercado lácteo proyecta un crecimiento sostenido a nivel mundial, se estima que para el año 2025 la producción alcance los 992,7 millones de toneladas, lo que representa un incremento del 1,0 % respecto al periodo anterior. Este comportamiento posiciona al 2025 como el segundo año consecutivo con un crecimiento moderado en el sector, reflejando la estabilidad productiva y la adaptación del mercado a las condiciones globales de oferta y demanda de productos lácteos [2].

En este contexto, la rápida degradación de la leche exige que los fabricantes implementen estrategias orientadas a reducir las pérdidas y preservar la calidad del producto [1], por ello, la optimización de la cadena de suministro (SCM) cobra especial relevancia como alternativa viable para mejorar la eficiencia

operativa, garantizar la frescura del producto final y fortalecer la sostenibilidad del sector frente a los retos logísticos y de conservación [3].

Las SCM comprenden la gestión y coordinación de un conjunto interconectado de actividades que incluyen la adquisición de materias primas, producción, almacenamiento, transporte y distribución de bienes o servicios, este sistema abarca todas las organizaciones, procesos y flujos de bienes implicados desde la extracción de recursos hasta la entrega del producto final al cliente, por esta razón, cada eslabón desempeña un papel esencial en la capacidad de una empresa para responder eficazmente a la demanda del mercado, optimizar costos operativos y garantizar la calidad de los bienes o servicios ofrecidos, una gestión eficiente de la SCM permite fortalecer la competitividad empresarial, asegurar la continuidad operativa y generar valor a lo largo de todo el proceso productivo [4], [5].

El objetivo principal de la gestión de la SCM es satisfacer eficazmente la demanda de los clientes en cuanto a precio, calidad y tiempo; para el caso de las SCM de productos alimenticios se ha estudiado ampliamente y se las conoce como SCM agroalimentarias [6], [7].

No obstante, en las operaciones tradicionales de las SCM suelen predominar rutas fijas o prácticas empíricas que desestiman la optimización de recursos, lo que genera ineficiencias productivas, mayores costos e insatisfacción de los clientes [8]. Por esta razón, la ubicación de las instalaciones en las SCM no debe limitarse únicamente a satisfacer la demanda inmediata, por el contrario, requieren un análisis integral de todos los eslabones que la componen [9].

Para el caso de la leche y derivados lácteos, el tiempo es un recurso escaso y la eficiencia resulta crucial si se pretende minimizar los gastos operativos y al mismo tiempo garantizar la integridad y seguridad alimentaria [10]. Es aquí donde los modelos matemáticos de optimización emergen como una alternativa estratégica para potenciar las operaciones dentro de las SCM, ya que su aplicación no solo representa una mejora significativa en la eficiencia de las actividades logísticas, sino que también se establece como una herramienta valiosa para la toma de decisiones estratégicas [11].

Adoptar estos modelos permite a las empresas optimizar la asignación de recursos, mejorar los tiempos de entrega y reducir los costos operativos, lo que contribuye no solo a la eficiencia de los procesos actuales, sino también a la construcción de SCM más ágiles, adaptables y resilientes frente a los desafíos del entorno empresarial contemporáneo [12].

Diversos estudios respaldan la efectividad de estos enfoques. En Ruiz-Meza et al., [13] formuló un modelo de ruteo con múltiples depósitos, productos variados, una flota diversa y ventanas de tiempo estrictas, buscando mejorar la eficiencia del transporte y reducir costos para las empresas, al implementar este modelo en un estudio de caso, observaron una reducción significativa en la distancia recorrida, hasta un 35%, lo que validó su efectividad como herramienta competitiva.

Por su parte, Afzal & Dalheim [14] propusieron un modelo matemático lineal entero mixto orientado a minimizar el costo total de la red de suministro, considerando factores como la capacidad, los costos de transporte y la demanda, con resultados que

demonstraron una solución factible, de menor costo y mayor eficiencia.

De acuerdo con Ruvalcaba-Sandoval et al., [15] se abordó el diseño de redes de suministro mediante programación lineal entera mixta y métodos metaheurísticos, con el propósito de reducir los costos fijos de apertura de fábricas y almacenes, así como los costos de compra y fabricación; no obstante, si bien se obtuvieron soluciones viables en tiempos de cálculo cortos, las soluciones óptimas se alcanzaron a costa de mayores tiempos de ejecución.

Considerando lo anterior, la presente investigación busca abordar un problema real identificado en una empresa del sector lácteo, relacionado con la configuración óptima de su red de suministro. El propósito es mejorar la eficiencia operativa y asegurar el cumplimiento de la demanda al menor costo posible, contribuyendo al fortalecimiento logístico y competitivo de la organización

En este marco, se propone el desarrollo de un modelo de programación lineal entera mixta orientado a resolver el problema de diseño de una red de suministro multi cliente, permitiendo una toma de decisiones más precisa y sustentada en criterios de optimización.

2. Métodos.

Con el propósito de dar solución al problema planteado y estructurar un modelo que permita optimizar la red de suministro de la empresa de lácteos, se estableció una metodología que integra la definición de objetivos, la formulación matemática del sistema y la resolución del modelo bajo un entorno de programación especializado, de manera que los resultados obtenidos respondan tanto a las condiciones reales de la

operación como a los criterios de eficiencia, costo y cumplimiento de la demanda.

La metodología se desarrolló en tres fases. En la primera se definieron los objetivos de optimización, orientados a minimizar costos, mejorar la eficiencia y garantizar el cumplimiento de la demanda, además de recopilar la información necesaria como fletes, costos, capacidades de producción, almacenamiento y demanda de los clientes. En la segunda fase se formuló el modelo matemático de la red de suministro, estableciendo conjuntos, parámetros, variables, función objetivo y restricciones que

representaran los flujos entre centros de acopio (CA), plantas de producción (PP), centros de distribución (CD) y clientes (CL). Finalmente, en la tercera fase el modelo fue programado en AMPL y resuelto con el solver CPLEX, obteniendo los flujos óptimos y el costo mínimo de la red, cuyos resultados fueron analizados y validados para apoyar la toma de decisiones estratégicas en la empresa. En la Figura 1 se muestra secuencialmente la metodología mediante la cual se desarrollará la investigación.

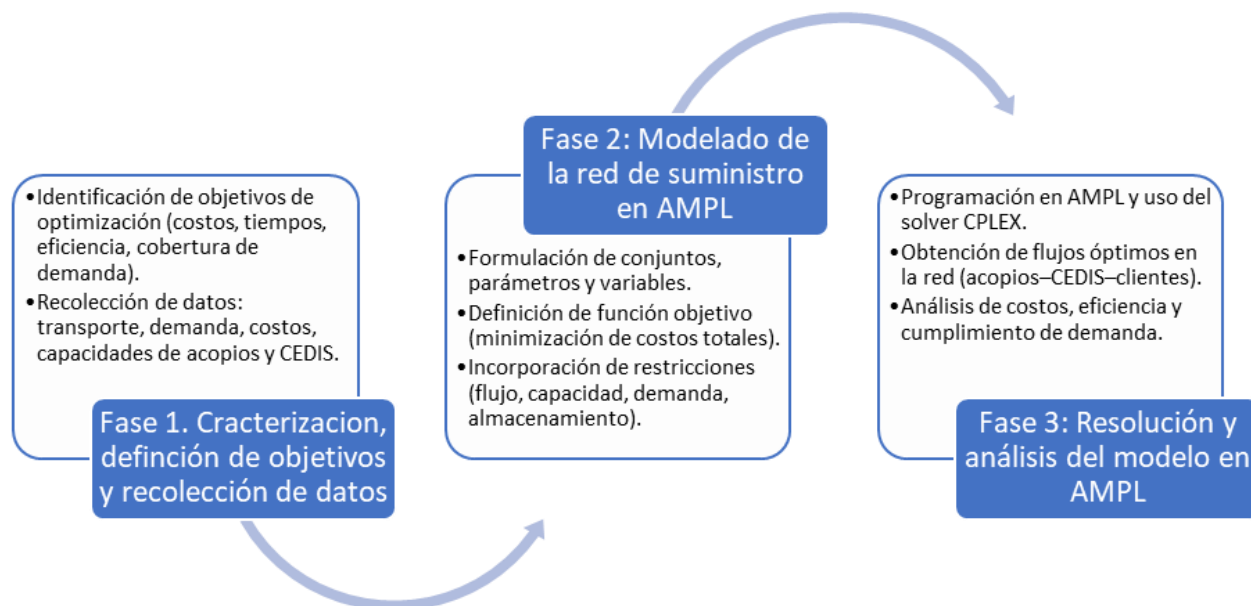


Figura 1. Metodología de estudio propuesta.

Fase 1: Definición de objetivos y recolección de datos.

En la primera fase se establecieron los objetivos del estudio considerando la estructura completa de la SCM. Se identificó que el proceso de abastecimiento de leche inicia en las granjas, donde se llevan a cabo las actividades de ordeño y cuidado de los animales. Posteriormente, la leche es transportada por los productores hacia los

CA, donde se realiza el almacenamiento y enfriamiento temporal.

A continuación, la compañía traslada la materia prima a las PP para su procesamiento, el cual incluye etapas de pasteurización, homogeneización y estandarización según el tipo de producto final. Una vez procesada, la leche y sus derivados son distribuidos a través de la red logística hacia los CD, desde donde se

gestiona la entrega final a los CL de la empresa [16].

La recolección de información se realizó en colaboración directa con la empresa y con los responsables de la toma de decisiones, quienes suministraron los datos técnicos y operativos necesarios para la formulación y validación del modelo propuesto, estos datos se suministran en las tablas 1 a 6

Tabla 1. Capacidad y costos fijos de los CA y CD

Eslabón	Capacidad L/año	Costos fijos COP \$/año
CA1	7.630.000	25.000.000
CA2	9.790.000	25.000.000
CA3	20.916.000	30.000.000
CA4	61.206.600	80.000.000
CA5	8.989.908	25.000.000
CA6	941.000	7.000.000
CA7	1.989.132	15.000.000
CD10	2.716.392	10.000.000
CD11	18.857.064	20.000.000
CD12	5.062.704	17.000.000
CD13	5.516.304	17.500.000
CD14	48.516.096	25.000.000
CD15	6.449.544	18.000.000
CD16	5.678.556	17.500.000
CD17	5.743.632	17.500.000
CD18	5.996.652	18.000.000
CD19	5.854.944	18.000.000

La Tabla 1 presenta la capacidad anual y los costos fijos de los eslabones CA y CD dentro de la SCM. Los CA poseen capacidades que oscilan entre 0,94 y 61,2 millones de litros por año, con costos fijos anuales entre 7 y 80 millones de COP. En el caso de los centros de distribución, las capacidades varían entre 2,7 y 48,5 millones de litros por año, con costos fijos que fluctúan entre 10 y 25 millones de COP/año, reflejando su importancia operativa dentro del sistema logístico

En la Tabla 2 se muestra las capacidades anuales de las PP, con costos unitarios de 350 y 380 COP\$/L, respectivamente.

Por otra parte, en la Tabla 3 se presenta la demanda anual de los clientes, expresada en litros por año. Se observa una amplia variabilidad entre los distintos clientes, con volúmenes que oscilan entre 1,1 y 48,5 millones de litros anuales, lo que evidencia diferentes niveles de requerimiento y segmentación dentro de la SCM.

Tabla 2. Capacidad y costos de producción de las PP

Planta de producción	Capacidad L/año	Costos de producción COP \$/litro
PP8	96.000.000	350
PP9	18.000.000	380

Tabla 3. Demanda de los clientes.

Cliente	Demanda L/año
CL20	2.021.772
CL21	4.774.752
CL22	1.122.816
CL23	1.227.540
CL24	12.260.508
CL25	1.418.604
CL26	1.302.684
CL27	1.322.280
CL28	1.311.156
CL29	1.315.452
CL30	48.516.096
CL31	13.996.212

Los costos de transporte asociados a cada eslabón de la cadena de suministro (SCM) se estimaron a partir de las distancias geográficas, expresadas en kilómetros, que conectan cada nodo de origen con su correspondiente destino. Estas distancias fueron calculadas utilizando la herramienta Google Maps, seleccionando en todos los casos la ruta terrestre más corta disponible.

Para el presente estudio, los valores resultantes se expresan como unidades monetarias por litro transportado, considerando una relación directa entre la distancia recorrida y el costo de flete.

Tabla 4. Costo de transporte desde CC a PP en COP\$/L

Centro de acopio	Plantas de proceso	
	PP8	PP9
CA1	528	289
CA2	603	439
CA3	458	684
CA4	25	251
CA5	236	7
CA6	174	169
CA7	27	252

La Tabla 4 muestra los costos de transporte entre los centros de acopio (CA) y las plantas de producción (PP). Los valores oscilan entre 7 y 684 COP\$/L, evidenciando una marcada variabilidad asociada a la ubicación geográfica y a la distancia entre los nodos. En particular, CA4 y CA7 presentan los costos más bajos debido a su proximidad a PP8, mientras que CA3 y CA2 registran los valores más altos, lo cual sugiere trayectos más extensos o condiciones logísticas menos eficientes.

Tabla 5. Costo de transporte desde PP a CD en COP\$/L

	CD10	CD11	CD12	CD13	CD14	CD15	CD16	CD17	CD18	CD19
PP8	26	229	114	91	41	145	30	112	354	203
PP9	251	1	115	140	201	248	201	337	580	46

Así mismo, en la Tabla 6 presenta los costos de transporte desde los centros de distribución (CD) hacia los clientes (CL) finales. Los valores varían significativamente, desde 1 COP\$/L hasta 583 COP\$/L, reflejando la amplia dispersión geográfica de los clientes en la red de distribución.

Se observa que los CD12, CD13, CD14, CD15 y CD16 poseen costos relativamente bajos

De manera general, los costos hacia PP8 se ubican en un rango entre 25 y 603 COP\$/L, mientras que hacia PP2 varían entre 7 y 684 COP\$/L. Esto indica que la planta PP8 se encuentra en una posición geográfica más ventajosa respecto a algunos centros, aunque también presenta rutas más costosas hacia otros puntos de acopio.

Por otra parte, en la Tabla 5 se observan los costos de transporte entre las PP y los centros de CD. Los resultados indican una tendencia de dispersión moderada, con valores que oscilan entre 1 y 580 COP\$/L. En el caso de PP1, los costos más bajos corresponden a las rutas hacia CD10 (26 COP\$/L) y CD16 (30 COP\$/L), mientras que el valor más alto se registra hacia CD18 (354 COP\$/L). Por su parte, PP9 muestra un costo mínimo hacia CD11 (1 COP\$/L), lo cual sugiere una ubicación cercana. No obstante, los costos hacia CD18 (580 COP\$/L) evidencian trayectos considerablemente más largos. En conjunto, esta tabla refleja la importancia de la localización estratégica de las plantas para minimizar los costos de transporte intermedios dentro de la red.

hacia varios clientes, lo cual sugiere que su ubicación geográfica contribuye a reducir los costos logísticos de última milla. En contraste, CD18 muestra los valores más elevados, evidenciando una mayor distancia o baja conectividad vial con la mayoría de los clientes.

Tabla 6. Costo de transporte desde CD a CL en COP\$/L.

Centros de distribución	Clientes											
	CL20	CL21	CL22	CL23	CL24	CL25	CL26	CL27	CL28	CL29	CL30	CL31
CD10	2	251	135	110	57	171	50	98	342	223	64	241
CD11	253	2	116	141	203	257	201	339	583	51	198	23
CD12	137	117	2	25	87	141	85	223	467	88	82	107
CD13	114	142	27	1	64	118	62	199	444	114	59	132
CD14	62	203	88	63	3	127	31	148	394	175	8	193
CD15	167	248	133	108	119	9	139	252	496	220	125	239
CD16	54	203	87	62	28	148	1	139	384	174	36	193
CD17	95	338	222	197	144	258	137	5	247	310	151	328
CD18	340	583	468	443	389	504	382	249	6	555	419	573
CD19	226	45	89	115	176	231	174	312	561	5	171	65

Fase 2: Formulación del modelo matemático.

Para el desarrollo efectivo del modelo es indispensable comprender los conceptos y parámetros asociados a la red de la SCM, los cuales constituyen la base para su formulación. En este contexto, el modelo se organiza de la siguiente manera:

Conjuntos.

i = Centro de acopio (CA), indexado por I

j = Plantas de producción (PP), indexado por J

k = Centro de distribución (CD), indexado por K

a = Clientes (CL), indexado por A

Conjuntos inducidos.

SS = Clientes atendidos por única fuente (single sourcing) $a \in A, SS \subseteq A$;

MS = Clientes atendidos por múltiples fuentes (multiple sourcing) $a \in A, MS \subseteq A$.

Variables de decisión

Variables binarias

$U_{(k,SS)} = 1$ si CL SS es atendido desde el CD k ; 0 de lo contrario.

$W_{(i)} = 1$ si CA i es abierto; 0 de lo contrario.

$C_{(k)} = 1$ si CD k es abierto; 0 de lo contrario.

Variables continuas

$X_{(i,j)} =$ Cantidad de leche enviada desde el CA i a la PP j ; [$L/año$].

$Y_{(j,k)} =$ Cantidad de leche enviada desde la PP j a CD k ; [$L/año$].

$Z_{(k,MS)} =$ Cantidad de leche enviada desde el CD k a clientes MS ; [$L/año$].

Parámetros

$CAP_CENTRO_ACOPIO_{(i)} =$ Capacidad instalada de los $CA, i \in I$; [$L/año$].

$CFIJO_CA_{(i)} =$ Costo fijo de apertura de CA $i \in I$, [COP \$/ $año$].

$CAP_FAB_PLANTAS_{(j)} =$ Capacidad instalada de las $PP, j \in J$; [$L/año$].

$COSTO_PDN_{(j)} =$ Costo de producción en $PP, j \in J$, [COP \$/ $año$].

$CAP_CD_{(k)}$ = Capacidad instalada de los CD ,
 $k \in K$, [L/año].

$CFIJO_CD_{(k)}$ = Costo fijo de apertura de los
 CD , $k \in K$, [COP \$/año].

$DEM_{(a)}$ = Demanda del CL , $a \in A$, [L/
año].

$FLETE1_{(i,j)}$ = Costo de envío desde el CA
 $i \in I$ a la PP $j \in J$, [COP \$/L].

$FLETE2_{(j,k)}$ = Costo de envío desde PP $j \in$
 J al CD $k \in K$, [COP \$/L].

$FLETE3_{(k,a)}$ = Costo de envío desde los CD
 $k \in K$ a la PP $a \in A$, [COP \$/L].

Función objetivo

Minimizar Costos =

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X_{ij} \times FLETE1_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} Y_{jk} \times FLETE2_{jk} + \sum_{k \in K} \left(\sum_{a \in MS} Z_{ka} \times FLETE3_{ka} + \sum_{a \in SS} U_{(k,a)} \times DEM_{(a)} \times FLETE3_{ka} \right) \quad (1)$$

$$+ \sum_{i \in I} W_i \times CFIJO_CA_i \quad (2)$$

$$+ \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X_{ij} \times COSTO_PDN_j \quad (3)$$

$$+ \sum_{k \in K} C_k \times CFIJO_CD_k \quad (4)$$

Sujeto a las siguientes restricciones

$$\sum_{j \in J} X_{ij} \leq CAP_CENTROS_ACOPIO_i \times W_i \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ij} \leq CAP_FAB_PLANTAS_j \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} Y_{jk} \leq CAP_CD_k \times C_k \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} Z_{ka} \geq DEM_a \quad \forall a \in MS \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} U_{ka} = 1 \quad \forall a \in SS \quad (9)$$

Restricciones de balance

$$\sum_{i \in I} X_{ij} = \sum_{k \in K} Y_{jk} \quad \forall j \in J \quad (10)$$

$$\sum_{j \in J} Y_{jk} = \sum_{a \in MS} Z_{ka} + \sum_{a \in SS} U_{ka} \times DEM_a \quad \forall k \in K \quad (11)$$

Restricciones de no negatividad.

$$X_{ij}, Y_{jk}, Z_{kMS} \geq 0 \quad (12)$$

$$U_{(k,a)}, C_k, W_{(i)} \in \{0,1\} \quad (13)$$

El modelo matemático formulado representa la red logística de la SCM para una empresa del sector lácteo, considerando de manera simultánea los procesos de acopio, producción, distribución y atención de la demanda final. Su estructura responde a un enfoque MILP orientado a la minimización del costo total de la red, incluyendo costos fijos de apertura, costos de producción y costos de transporte en los distintos eslabones de la red para satisfacer la demanda de los clientes.

La formulación abarca tres niveles jerárquicos: CA, PP y CD vinculados por restricciones de capacidad, balance de flujo y satisfacción de la demanda.

El modelo distingue entre clientes de fuente única (SS) y clientes de múltiples fuentes (MS), lo que permite reflejar tanto relaciones contractuales rígidas como esquemas flexibles de mercado. Las restricciones aseguran la asignación exclusiva en el primer caso y una distribución compartida en el segundo, incrementando la representatividad del sistema real.

La función objetivo combina costos fijos de apertura (2), (4) con costos variables de producción (3) y transporte (1). Este último componente se estimó a partir de distancias geográficas obtenidas con la herramienta Google Maps, seleccionando siempre la ruta terrestre más corta. De esta forma, el modelo incorpora una dimensión espacial realista y cuantificable del sistema logístico.

Las ecuaciones (5), (6) y (7) restringen la capacidad en los CA, PP y CD respectivamente. La restricción (8) determinan el cumplimiento de la demanda de los clientes y la ecuación (9) determina el cumplimiento de la demanda completa para un cliente SS.

La restricción (10) asegura que el flujo de entrada a las PP sea igual al flujo de salida hacia los CD y la restricción (11) garantiza que el flujo de entrada a los CD sea igual al flujo de salida hacia los clientes.

Las ecuaciones (12) y (13) están relacionadas con las restricciones de no negatividad de las variables consideradas en el modelo.

Fase 3: resultados computacionales y análisis del modelo

En esta fase se procede a la implementación, ejecución y análisis del modelo matemático formulado previamente. Para ello, se utilizó el software AMPL y para su resolución se utilizó el solver de optimización Cplex. Esta implementación permitió obtener los respectivos flujos y el valor de la función objetivo.

3. Resultados

En la Tabla 7 se resume los resultados obtenidos al aplicar el modelo propuesto. Dentro de los resultados se presenta el costo total esperado de la SCM de acuerdo con la función objetivo descrita anteriormente; de igual manera, se presenta el porcentaje de

satisfacción de demanda y número de CA y CD que deben permanecer abiertos para hacer posible la operación. De igual manera en la Tabla 8 se muestra el porcentaje de ocupación de cada nodo.

Tabla 7. Reporte de resultados.

Función Objetivo	COP\$ 47.016.620.696
Demanda satisfecha	100%
CA abiertos	7
CD abiertos	8

Tabla 8. Apertura de CA, CD y porcentaje de ocupación.

Nodo	Flujo recibido	% ocupación
CA1	7.630.000	100%
CA2	1.380.092	14%
CA3	8.453.140	40%
CA4	61.206.600	100%
CA5	8.989.908	100%
CA6	941.000	100%
CA7	1.989.132	100%
PP8	72.589.872	76%
PP9	18.000.000	100%
CD10	2.716.392	100%
CD11	18.770.964	100%
CD12	5.062.704	100%
CD13	5.516.304	100%
CD14	48.516.096	100%
CD15	1.418.604	22%
CD16	5.678.556	100%
CD17	2.910.252	51%
CD18	Inactivo	-
CD19	Inactivo	-

Como se evidencia en la Tabla 8, seis de los ocho CA operan al 100 % de su capacidad, destacando CA1, CA4, CA5, CA6 y CA7, mientras que CA2 y CA3 presentan niveles de uso de 14 % y 40 %, respectivamente. Esto sugiere que la ubicación y la proximidad a las plantas de producción (PP8 y PP9) son determinantes en la asignación de flujos,

priorizando el uso de aquellos nodos estratégicamente más rentables.

En cuanto a los centros de distribución (CD), se observa una alta concentración del flujo en CD14 lo que confirma su papel como nodo principal del sistema. Los CDs 10 al 13 y 16 también alcanzan ocupaciones del 100 %, evidenciando una concentración del sistema en una región geográfica específica como se evidencia en la Figura 2.

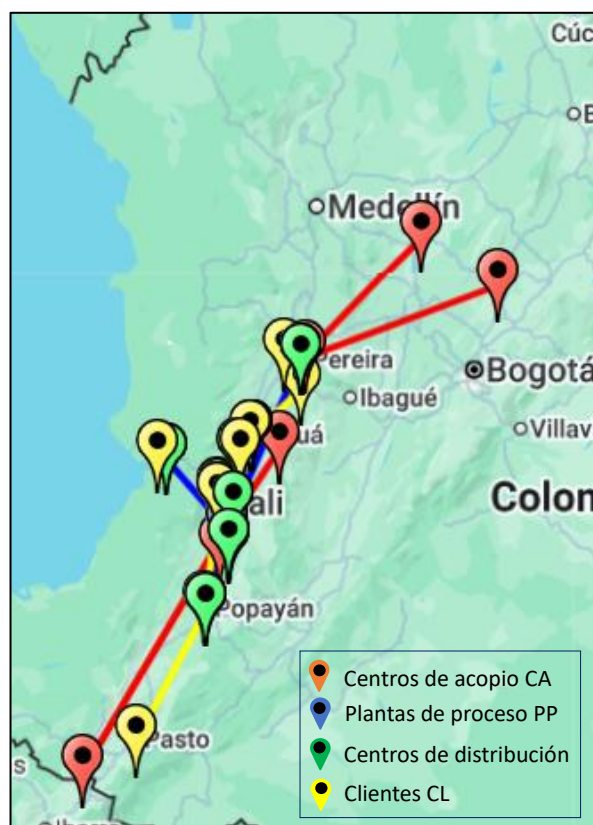


Figura 2. Distribución geoespacial de la SCM

Los CD15 (22%) y CD17 (51%) operan parcialmente y finalmente, CD18 y CD19 permanecen cerrados lo que implica que su apertura no resulta económicamente viable bajo las condiciones establecidas.

Respecto a las PP, se evidencia que la PP9 alcanza un 100 % de utilización, lo que indica que opera en su máxima capacidad, por el contrario, la PP8 opera al 76 % de su capacidad, procesando más de 72,5 millones de litros al año.

Por otra parte, en la Tabla 9 se presenta el cumplimiento de la demanda de los clientes desde el CD y finalmente en la Tabla 10 se encuentra el flujo que recibe cada CL desde cada CD.

Tabla 9. Porcentaje de cumplimiento de la demanda de los clientes.

Cliente	Demanda	Flujo recibido	% cumplimiento
CL20	2.021.772	2.021.772	100%
CL21	4.774.752	4.774.752	100%
CL22	1.122.816	1.122.816	100%
CL23	1.227.540	1.227.540	100%
CL24	12.260.508	12.260.508	100%
CL25	1.418.604	1.418.604	100%
CL26	1.302.684	1.302.684	100%
CL27	1.322.280	1.322.280	100%
CL28	1.311.156	1.311.156	100%
CL29	1.315.452	1.315.452	100%
CL30	48.516.096	48.516.096	100%
CL31	13.996.212	13.996.212	100%

Aquí se observa que el modelo satisface completamente la demanda de todos los clientes (SS y MS).

Para los clientes SS (CL20, CL21, CL30, CL31) el resultado muestra única asignación, es decir, cada uno recibe su demanda íntegra desde un único distribuidor cumpliendo a cabalidad con la restricción planteada. De igual manera, cada cliente MS está completamente satisfecho recibiendo su demanda desde uno o varios CD. Lo anterior da como resultado un diseño de SCM viable para la satisfacción del 100% de la demanda, en la Figura 3 se observa cuáles son las rutas establecidas por el modelo.

4. Discusión

Los resultados obtenidos en el estudio revelan la efectividad del modelo propuesto para optimizar la red de suministro del sector lácteo, permitiendo identificar una configuración que minimiza los costos

operativos sin comprometer el cumplimiento de la demanda.

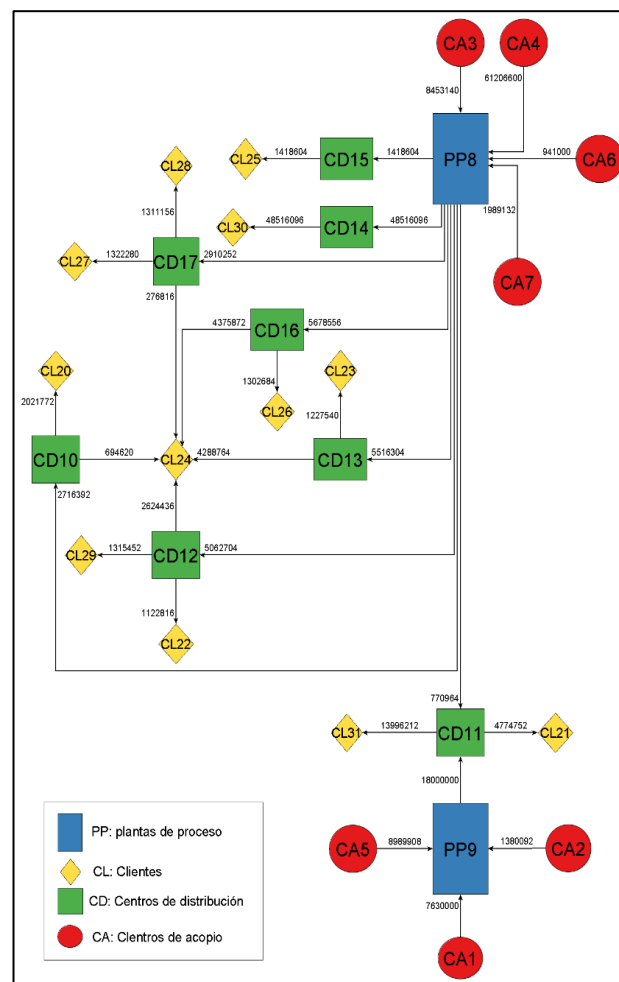


Figura 3. Ruta establecida por el modelo.

Los resultados mostraron que la activación todos los CA y 8 CD constituye la alternativa más eficiente, con un costo total mínimo de la red de \$ 47.016.620.696, lo que evidencia un uso racional de los recursos y una adecuada asignación de flujos entre los diferentes eslabones de la cadena. Este comportamiento refleja que la ubicación estratégica y la capacidad instalada de estos nodos contribuyen significativamente a reducir los costos de transporte y almacenamiento.

Además, el modelo permitió evidenciar que el equilibrio entre capacidad, distancia y costos fijos es determinante para mejorar la eficiencia global del sistema.

Tabla 10. Flujo enviado desde CD a cada tipo de cliente.

CD	Cliente	Tipo de cliente	Flujo enviado
CD10	CL24	MS	694.620
CD12	CL22	MS	1.122.816
CD12	CL24	MS	2.624.436
CD12	CL29	MS	1.315.452
CD13	CL23	MS	1.227.540
CD13	CL24	MS	4.288.764
CD15	CL25	MS	1.418.604
CD16	CL24	MS	4.375.872
CD16	CL26	MS	1.302.684
CD17	CL24	MS	276.816
CD17	CL27	MS	1.322.280
CD17	CL28	MS	1.311.156
CD10	CL20	SS	2.021.772
CD11	CL21	SS	4.774.752
CD11	CL31	SS	13.996.212
CD14	CL30	SS	48.516.96

Por otra parte, a pesar de que la PP9 se encuentra operando al 100% de su capacidad, cualquier incremento de demanda o falla técnica obligaría a redireccionar flujos hacia PP8 impactando en los costos, pero demostrando la resiliencia del modelo.

Sin embargo, cabe destacar que la concentración de volumen en CL30 (48.5 millones de litros) con la condición de cliente SS cumple con la restricción de ser abastecido únicamente por CD14, lo que mejora la eficiencia económica pero también se convierte en un punto de vulnerabilidad ya que concentra el 54% de toda la operación, adicionalmente, el CD14 se encuentra operando al 100% de su capacidad por lo cual no podría absorber un incremento de la demanda del este cliente. En este sentido, la factibilidad depende especialmente de la capacidad de CDs que atienden la demanda de los clientes de tipo SS.

En conjunto, los resultados destacan la importancia de la optimización matemática en

la gestión de SCM del sector lácteo, promoviendo la eficiencia económica, la sostenibilidad operativa y la competitividad empresarial.

En términos metodológicos, la herramienta MILP demostró ser un instrumento robusto para la toma de decisiones logísticas basadas en datos cuantitativos, ofreciendo una visión integral del comportamiento de la red ante restricciones reales.

Finalmente, Los resultados obtenidos confirman que la formulación propuesta es adecuada, estable y consistente tanto desde la perspectiva matemática como de logística. La red es capaz de atender la demanda de manera óptima y eficiente bajo las condiciones actuales. Sin embargo, la completa dependencia de un solo centro para algunos clientes SS y la ausencia de análisis robustos ante escenarios dinámicos sugieren que existen oportunidades de mejora y estudios futuros.

Conclusiones.

El modelo es factible siempre que la capacidad total disponible en los centros de acopio, plantas y centros de distribución sea suficiente para satisfacer la demanda agregada de los clientes.

El modelo logra una configuración altamente eficiente en términos de costos y cumplimiento de la demanda, pero lo hace mediante concentración de flujos en un subconjunto de nodos, generando eficiencia económica.

Las decisiones de apertura, ocupación y enrutamiento están completamente alineadas con los costos de transporte y capacidades, lo que valida la calidad del modelamiento y la coherencia de los datos.

Referencias.

- [1] A. Acosta, A. Galetto, and A. Londinsky, *Más allá de la finca lechera*. 2022. doi: 10.4060/cc2188es.
- [2] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura., "Perspectivas alimentarias," 2025.
- [3] T. P. Salamanca Gómez, R. G. García-Cáceres, and A. A. Espitia-Cubillos, "Caracterización de la cadena de abastecimiento de productos lácteos," *Cuadernos de Administración*, vol. 39, no. 77, p. e2511820, 2023, doi: 10.25100/cdea.v39i77.11820.
- [4] C. E. Goyzueta Meneses, "Propuesta De Mejora De La Cadena De Suministros De La Palta Mediante El Uso De Herramientas De Análisis De Series De Tiempo, Analytics Y Optimización Matemática," 2021.
- [5] S. J. Williams, *Improving Quality and Supply Chain Management*, vol. 2912. 2025.
- [6] R. B. Handfield and E. L. Nichols., *Transforming Supply Chains into Integrated Value Systems*. 2002.
- [7] H. Chokri, I. Nouaouri, H. Allaoui, and F. B. R. Lasram, "Agri-food supply chain network design: A comprehensive review and future research directions," *Comput Ind Eng*, vol. 207, no. July 2024, 2025, doi: 10.1016/j.cie.2025.111203.
- [8] S. R. Dhavale, G. C. Lomte, and O. S. Jadhav, "INTEGRATED COST OPTIMIZATION IN SUPPLY CHAINS: A MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING APPROACH," *Journal of Dynamics and Control*, vol. 9, no. 4, pp. 54–70, 2025, doi: 10.71058/jodac.v9i4005.
- [9] J. Jouzdani, S. J. Sadjadi, and M. Fathian, "Dynamic dairy facility location and supply chain planning under traffic congestion and demand uncertainty: A case study of Tehran," *Appl Math Model*, vol. 37, no. 18–19, pp. 8467–8483, 2013, doi: 10.1016/j.apm.2013.03.059.
- [10] R. Mitchell, "El transporte puede ser complicado para los procesadores de lácteos | 12/05/2021 | Productos lácteos." Accessed: Oct. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.dairyfoods.com/articles/95019-transportation-can-be-tricky-for-dairy-processors>
- [11] E. Guzmán, R. Poler, and B. Andrés, "Un análisis de revisiones de modelos y algoritmos para la optimización de planes de aprovisionamiento, producción y distribución de la cadena de suministro," *Dirección y Organización*, vol. 70, no. 70, pp. 28–52, 2020, doi: 10.37610/DYO.V0I70.567.
- [12] I. Ribas Vila and R. Companys Pascual, "Estado del arte de la planificación colaborativa en la cadena de suministro: contexto determinista e incierto," *Intangible Capital*, no. 3, pp. 91–121, 2007.
- [13] J. Ruiz-Meza, I. Montes, A. Pérez, and M. Ramos-Márquez, "VRP model with time window, multiproduct and multidepot," *Journal of Applied Science and Engineering*, vol. 23, no. 2, pp. 239–247, 2020, doi: 10.6180/jase.202006_23(2).0008.
- [14] Eskil. Afzal, Benjamin. Brecke Dalhei, "Optimal offshore installation of floating wind turbines, using Mixed-Integer Linear Programming with AMPL," Norwegian Busines School, 2022.
- [15] D. A. Ruvalcaba-Sandoval, E. Olivares-Benitez, O. Rojas, and G. Sosa-Gómez, "Matheuristics for the design of a multi-step, multi-product supply chain with multimodal transport," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 21, 2021, doi: 10.3390/app112110251.
- [16] J. J. Pantoja Diaz, S. A. Colonias Murillas, and F. Y. Henao Ordoñez, "Diseño de una

Red Multi-Eslabón, Multi-Producto y
Multi-Cliente de una Empresa Fabricadora
y Comercializadora de Leche," *Revista EIA*,
vol. 22, no. 43, 2025, doi:
10.24050/reia.v22i43.1782.