

INTEGRACIÓN DE EFICIENCIA Y SUSTENTABILIDAD EN LA OPTIMIZACIÓN DE LA LOGÍSTICA DE RECOLECCIÓN DE LECHE

INTEGRATING EFFICIENCY AND SUSTAINABILITY IN OPTIMIZING MILK COLLECTION LOGISTICS

Carlos A. Bonetti, Gabriel D. Puccini, Jezabel D. Bianchotti, Sergio E. Bertone y Melina Denardi

*Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Universidad Tecnológica Nacional,
Facultad Regional Rafaela, Acuña 49, 2300 Rafaela, Argentina, gabriel.puccini@frra.utn.edu.ar*

Palabras clave: Logística sustentable, Problema de enrutamiento de vehículos, Metaheurísticas, Emisiones de dióxido de carbono.

Resumen. La recolección de leche en la industria láctea argentina se gestiona mayormente de forma manual, pese a los avances tecnológicos. Este trabajo propone un modelo de optimización basado en el problema de enrutamiento de vehículos (VRP) con flota heterogénea, que incorpora no solo la distancia recorrida sino también la carga transportada, permitiendo estimar de manera más precisa las emisiones de dióxido de carbono. Mediante una variante del algoritmo de recocido simulado se generan recorridos eficientes bajo restricciones de capacidad y demandas variables. Se comparan las soluciones óptimas obtenidas al minimizar la distancia total con aquellas que minimizan las emisiones de dióxido de carbono. Los resultados muestran que minimizar la distancia no garantiza reducir las emisiones, lo que resalta la necesidad de soluciones que equilibren eficiencia logística e impacto ambiental, especialmente en la región pampeana, donde las distancias entre tambos y plantas procesadoras son extensas. La metodología propuesta constituye un avance respecto de estudios previos al integrar simultáneamente distancia, carga y emisiones, con un enfoque aplicable a la planificación diaria de industrias lácteas en Argentina.

Keywords: Sustainable logistics, Vehicle routing problem, Metaheuristics, Carbon dioxide emissions.

Abstract. Milk collection in the Argentine dairy industry is largely managed manually, despite technological advances. This work proposes an optimization model based on the vehicle routing problem (VRP) with a heterogeneous fleet. This model incorporates not only the distance traveled but also the load transported, allowing for more accurate estimates of carbon dioxide emissions. A variant of the simulated annealing algorithm generates efficient routes under capacity constraints and variable demands. The optimal solutions obtained by minimizing the total distance are compared with those that minimize carbon dioxide emissions. The results show that minimizing distance does not always imply minimizing emissions, highlighting the need for solutions that balance logistical efficiency and environmental impact, especially in the Pampas region, where the distances between dairy farms and processing plants are long. The proposed methodology represents an advance over previous studies by simultaneously integrating distance, load, and emissions, with an approach applicable to the daily planning of dairy industries in Argentina.

1. INTRODUCCIÓN

La logística se ha consolidado como un pilar esencial para la competitividad y el éxito empresarial en las cadenas de suministro, ya que garantiza eficiencia operativa y entrega de productos con la calidad requerida. En la industria láctea, este aspecto adquiere particular relevancia debido a la naturaleza perecedera de la leche cruda y a la dispersión geográfica de los centros de producción (tambos) y las plantas procesadoras (industrias). Tradicionalmente, la gestión de este proceso se ha basado en criterios manuales e intuitivos, orientados principalmente a minimizar las distancias recorridas y, con ello, los costos operativos (Paredes-Belmar et al., 2016, 2022; Bonetti et al., 2023). Sin embargo, en un contexto global marcado por la necesidad de reducir el impacto climático, este enfoque resulta insuficiente (Adom et al., 2013; Sahu et al., 2024).

En respuesta a esta preocupación, diversas empresas del sector han incorporado objetivos ambientales dentro de sus estrategias de sostenibilidad. Un ejemplo destacado es FrieslandCampina, una de las compañías lácteas más grandes del mundo, que ha fijado como meta alcanzar la neutralidad de carbono en toda su producción para 2050. Para lograrlo, estableció reducciones específicas respecto al año 2015: 63 % en producción y transporte, 33 % en las granjas y 43 % en materia prima y empaques (Hospers y Janssens, 2025).

El transporte de leche cruda desde los tambos hasta las plantas procesadoras constituye una fracción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero de la cadena láctea. En la provincia de Santa Fe, responsable de aproximadamente el 25 % de la producción nacional de leche líquida, resulta indispensable evaluar el impacto ambiental asociado a la logística cite-pInfStaFe. En concordancia, un estudio realizado en Estados Unidos sobre datos de 2007 estimó que el transporte en camiones cisterna representa alrededor del 3.5 % de las emisiones totales vinculadas al consumo de leche líquida, y puso de relieve el potencial de mitigación a través de la optimización de rutas y de la asignación eficiente de tambos a plantas procesadoras (Ulrich et al., 2013).

Los avances tecnológicos y la disponibilidad de información en tiempo real han transformado la logística del transporte, abriendo nuevas posibilidades para mejorar la planificación y la gestión operativa. Si bien metodologías clásicas, como la resolución del Problema de Enrutamiento de Vehículos (VRP), han permitido incrementar la eficiencia en la utilización de flotas (Aguirre-Villegas et al., 2022; Sahu et al., 2024), los desafíos actuales demandan modelos que integren criterios de sustentabilidad. En este sentido, un enfoque logístico verdaderamente óptimo debe equilibrar tanto la eficiencia económica como la reducción de la huella de carbono (López-Castro et al., 2023; International Dairy Federation, 2022).

Desde el punto de vista matemático, el VRP constituye un problema de optimización combinatoria con múltiples restricciones, cuya resolución exacta resulta viable únicamente en instancias de pequeña escala, debido al crecimiento exponencial del tiempo de cómputo (Yeun et al., 2008; Marinakis y Migdalas, 2007). En la práctica, este tipo de problemas se aborda mediante estrategias aproximadas, entre las cuales los algoritmos metaheurísticos han demostrado una notable eficacia (Thakur et al., 2024). Paralelamente, el estudio de problemas de ruteo dependientes del tiempo ha impulsado el desarrollo de técnicas como la predicción de tiempos de viaje, la reoptimización dinámica en grafos viales, la exploración eficiente de soluciones vecinas, la discretización adaptativa y la aplicación de métodos de aprendizaje automático, lo que amplía las posibilidades de encontrar rutas óptimas en entornos cambiantes (Adamo et al., 2024).

En este marco, el presente trabajo desarrolla una metodología integral para la recolección

y transporte de leche considerando un escenario con 100 tambos que abastecen a tres plantas procesadoras mediante una flota heterogénea de 15 camiones. El modelo se fundamenta en una formulación adaptada del VRP y emplea una variante del algoritmo de recocido simulado, con el objetivo de obtener soluciones de alta calidad en tiempos de cómputo razonables y aplicables a la planificación diaria de rutas. Asimismo, se propone un cambio de paradigma mediante la comparación de dos enfoques de optimización: el primero busca minimizar la distancia total recorrida, mientras que el segundo se orienta a reducir las emisiones de CO_2 , incorporando la carga transportada como variable determinante del consumo de combustible.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la necesidad de adoptar un enfoque multiobjetivo en la logística láctea, en el que la eficiencia operativa se combine con la sostenibilidad ambiental, favoreciendo el desarrollo de sistemas de transporte más eficientes y respetuosos con el medioambiente.

2. METODOLOGÍA

2.1. Caso de estudio

Para desarrollar este trabajo se planteó un problema con una complejidad tal que permite reflejar la operatoria habitual en los procesos logísticos de recolección de leche en las industrias lácteas de la región pampeana. La configuración propuesta consta de 100 tambos distribuidos de manera aleatoria (ver Fig. 1). Los mismos tienen producciones diversas con un mínimo de 500 litros, un máximo de 10000 litros y una producción promedio de 3000 litros. Esta leche debe ser transportada a 3 plantas procesadoras distribuidas en distintas ubicaciones. Cada planta tiene distintas capacidades máximas y mínimas de procesamiento que deben ser respetadas para poder operar con normalidad. Estas capacidades se exponen en la Tabla 1

Planta	Mínimo (L)	Máximo (L)
1	40.000	60.000
2	90.000	110.000
3	130.000	170.000

Tabla 1: Rango de litros entregados por planta.

Para la recolección y transporte de leche, se dispone de una flota de camiones cuya distribución de capacidades se detalla en la Tabla 2.

Capacidad (L)	Cant. de camiones
10.000	2
15.000	4
30.000	4
45.000	5
Total	15

Tabla 2: Distribución de la flota de camiones por capacidad en litros.

Empleando los 15 camiones para recolectar toda la leche producida en los 100 tambos, la utilización promedio de los camiones es del 70 % de su capacidad, similar a los casos relevados en industrias lácteas de la región pampeana. Cada camión comenzará y finalizará su recorrido en la planta que le es asignada para descargar la leche.

2.2. Formulación del problema

Se debe determinar la asignación óptima de tambos a cada camión, su orden de recolección y su respectiva planta de descarga para que la logística en la industria láctea sea sustentable. Con este propósito se plantean dos escenarios con optimizaciones diferentes.

En el primer escenario se minimiza la distancia total recorrida por los camiones. La función objetivo F_D se define en la Ec. 1 como la suma total de las distancias euclidianas (en unidades arbitrarias) d_{ij} que recorren los m camiones en sus respectivos trayectos para visitar a los tambos que le han sido asignados, esta asignación se detalla en el vector r_k correspondiente a cada camión.

$$F_D = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} d_{ij} \quad (1)$$

donde d_{ij} es la distancia entre el nodo i y j , y x_{ijk} es una variable binaria que adopta el valor 1 cuando el camión k recorre el trayecto entre i y j , de lo contrario, adopta el valor 0.

En el segundo escenario se minimizó las emisiones de CO_2 . Primero se determinó el coeficiente a_k dado por la Ec. 2 para cada camión según su capacidad, donde E_k^f son las emisiones de dióxido de carbono por unidad de distancia cuando el camión viaja lleno, E_k^0 son las emisiones de dióxido de carbono por unidad de distancia cuando el camión viaja vacío, y Q_k es la capacidad total del camión (López-Castro et al., 2023):

$$a_k = \frac{E_k^f - E_k^0}{Q_k} \quad (2)$$

Utilizando a_k se puede calcular las emisiones de CO_2 en cada trayecto del recorrido considerando la carga del camión en dicho tramo. Luego se minimizan las emisiones totales de CO_2 que se calculan mediante la función objetivo F_E definida en la Ec. 3. Se tienen en cuenta todos los trayectos recorridos del nodo i al j por cada camión k y la carga correspondiente a cada tramo. En cada trayecto se considera lo que contamina el camión vacío E_k^0 más lo que contamina por la carga transportada y_{ijk} en la distancia recorrida d_{ij} .

$$F_E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m (E_k^0 + a_k y_{ijk}) x_{ijk} d_{ij} \quad (3)$$

En ambos escenarios se consideraron dos restricciones: una para no superar la capacidad de los camiones y otra para cumplir con los límites de litros entregados a las plantas productoras.

1. Restricciones de capacidad de los tanques de los camiones:

$$\sum_{t \in r_k} L(t) \leq \text{Cap}(k) \quad \forall k = 1, 2, \dots, m$$

2. Restricciones de cantidad de leche a entregar en cada planta manufacturera:

$$L_{\max}(p_i) \geq \sum_{k=1}^m \sum_{t \in r_k} L(t) \cdot X(k, p_i) \geq L_{\min}(p_i) \quad \forall p_i \in P$$

donde $L(t)$ denota la cantidad de litros de leche producida por el tambo t , r_k es el recorrido que contiene los índices de los tambos en el orden de recolección y de la planta p_i para el camión k , $\text{Cap}(k)$ es la capacidad máxima del camión k , $L_{\max}(p)$ y $L_{\min}(p_i)$ son las capacidades máxima y mínima, respectivamente, de litros que puede recibir la planta p_i , $X(k, p_i)$ es una variable binaria que indica si el camión k entrega leche en la planta p_i .

Para modelar el problema se definen quince vectores r_k , que constituyen las variables de decisión. Cada vector representa un recorrido específico, indicando el orden en que los tambos deben ser visitados por cada camión y la planta de descarga correspondiente. En cada iteración, dicho orden se modifica de manera aleatoria para generar una nueva solución, la cual es evaluada según la Ec. 1 o la Ec. 3, dependiendo del escenario, siempre que no se exceda la capacidad de los tanques de los camiones. De igual modo, la cantidad de leche entregada en cada planta manufacturera debe ajustarse a los límites establecidos en la Tabla 1, garantizando tanto el cumplimiento del mínimo requerido como la no superación de la capacidad máxima, a la vez que se asegura la recolección total de los litros disponibles.

El problema de enrutamiento de vehículos con restricciones de capacidad aplicado a la recolección de leche cruda representa un desafío complejo que requiere el uso de algoritmos metaheurísticos para aproximarse a soluciones cercanas al óptimo global. En este trabajo se implementa el algoritmo estocástico conocido como recocido simulado (Kirkpatrick et al., 1983). Este método parte de una solución inicial y la mejora progresivamente mediante la exploración de soluciones vecinas con valores mejores de la función objetivo. Además, el recocido simulado puede aceptar, bajo ciertas condiciones probabilísticas, soluciones con un valor peor de la función objetivo, lo que le permite escapar de óptimos locales. El proceso está controlado por un parámetro denominado temperatura, que decrece gradualmente a lo largo de las iteraciones, guiando la búsqueda hacia soluciones cada vez mejores. Al inicio, la temperatura es alta, lo cual favorece la aceptación de soluciones menos ventajosas; a medida que avanza el proceso y la temperatura desciende, el criterio de aceptación se vuelve más restrictivo. Este enfoque se fundamenta en la probabilidad de Boltzmann, utilizada para decidir cuándo aceptar una solución subóptima, lo que brinda al algoritmo la capacidad de explorar diversas configuraciones en la búsqueda de rutas más eficientes. Para esta exploración, los métodos de perturbación alteran aleatoriamente tanto el orden como la asignación de tambos a cada camión, así como la planta de descarga correspondiente.

3. RESULTADOS

En el primer escenario, la aplicación del modelo de optimización propuesto estuvo orientado a minimizar la distancia total recorrida. Se obtuvo la asignación de rutas que se presenta en la Figura 1A. En dicha figura, las plantas procesadoras se identifican con tres puntos negros. Los tambos asignados a la Planta 1 se muestran con puntos rojos, y las rutas de los camiones que los abastecen para descargar en dicha planta se representan con líneas del mismo color. De manera análoga, los tambos y las rutas correspondientes a la Planta 2 se ilustran en color verde, mientras que aquellos asignados a la Planta 3 se visualizan en azul.

En el segundo escenario, el modelo propuesto se aplicó con el objetivo de minimizar las emisiones de CO_2 . Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 1B, manteniendo la misma correspondencia de colores y asignación por planta que en la figura anterior. En la solución obtenida para minimizar distancia, los camiones recorren en total 10,06 u.a. de distancia, las emisiones totales de dióxido de carbono son de 13,33 kg. De los 15 camiones disponibles se utilizan 9 unidades: 1 de 10.000 L, ninguno de 15.000 L, 3 de 30.000 L y los 5 de 45.000 L. La utilización promedio de los camiones (capacidad empleada/capacidad disponible) asciende

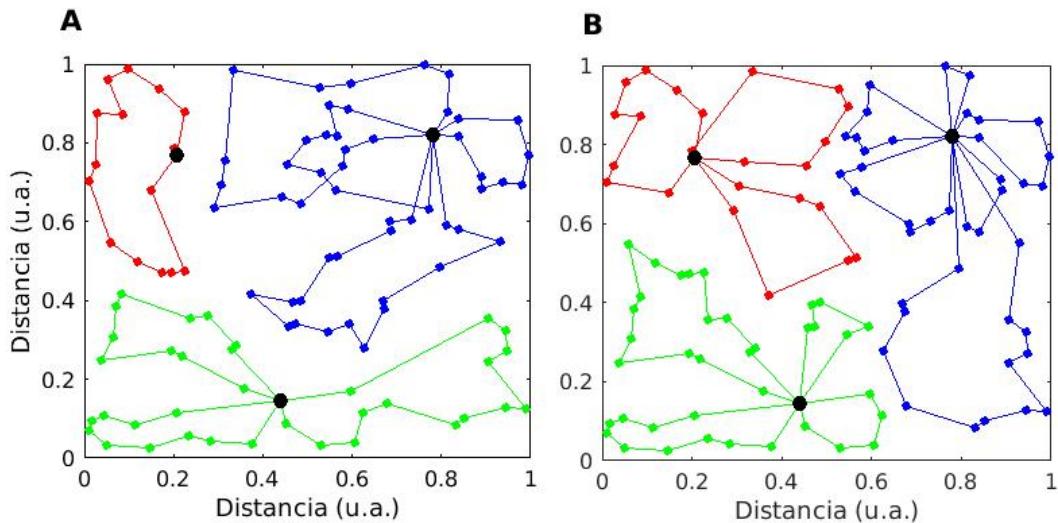


Figura 1: **A.** Recorridos optimizados para minimizar la distancia total recorrida. **B.** Recorridos optimizados para minimizar las emisiones de CO_2 (Planta 1 en rojo, planta 2 en verde, planta 3 en azul).

a 94 %, y la relación entre la distancia recorrida por cada camión es 1,12. Para el segundo escenario donde se minimizan emisiones de CO_2 , los camiones recorren en total 11,40 u.a. de distancia, las emisiones totales de dióxido de carbono en este caso son de 11,99 kg. De los 15 camiones disponibles se utilizan 13 unidades: los 2 de 10.000 L, los 4 de 15.000 L, 3 de 30.000 L y 4 de 45.000 L. La utilización promedio de los camiones (capacidad empleada/capacidad disponible) en este caso es de 86 %, y la relación entre la distancia recorrida por cada camión es 0,88. En la Tabla 3 se comparan los resultados para los dos escenarios propuestos.

	Distancia	Emisión CO_2
Distancia (u.a.)	10,06	11,40
CO_2 (kg/km · u.a.)	13,33	11.99
Camiones usados/camiones disponibles	0,60	0,87
Utilización de camiones	0,94	0,86
Distancia/Camión	1,12	0,88

Tabla 3: Comparación de los escenarios de optimización: Minimización de distancia vs. Minimización de emisiones de CO_2

4. CONCLUSIONES

Los resultados indican que la minimización de la distancia recorrida y la reducción de emisiones de CO_2 constituyen objetivos contrapuestos que requieren estrategias logísticas diferentes. La optimización de la distancia total conduce a una estrategia basada en una flota reducida de camiones de gran capacidad que recorren largas distancias individuales. Por el contrario, la minimización de emisiones se logra mediante una flota más numerosa de camiones de menor capacidad, asignados a recorridos más cortos. Este resultado subraya la inherente disyuntiva entre la eficiencia operativa tradicional (distancia) y los objetivos de sostenibilidad (emisiones).

Otro resultado importante es que, si bien la utilización de la flota no fue un criterio explícito de optimización, ambas estrategias propuestas (94 % y 87 %) superan significativamente el nivel de utilización del 70 % observado en el escenario actual de la industria. Esta mejora en la eficiencia se logra mediante una asignación óptima de las rutas y la carga, lo que permite una utilización más intensiva de los activos disponibles.

El análisis comparativo cuantifica esta disyuntiva: la solución óptima para emisiones genera un incremento del 13,32 % en la distancia total recorrida, pero alcanza una reducción del 10,05 % en las emisiones de CO_2 en comparación con la solución óptima para distancia. Esta diferencia confirma que en problemas logísticos multivariables y complejos, como el de la recolección lechera es necesario adoptar enfoques de optimización multiobjetivo.

En este sentido, la metodología desarrollada no solo aporta evidencia cuantitativa sobre la relación entre las variables de decisión logística y su impacto ambiental, sino que también surge como una herramienta flexible para la toma de decisiones. Su implementación práctica, potencialmente integrable en sistemas de gestión de flotas, permitiría diseñar planes de recolección que equilibren de manera ponderada los costos operativos y los compromisos ambientales. Así, este trabajo permite desarrollar cadenas de suministro lácteas más competitivas, resilientes y sostenibles.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional por financiar esta investigación en el marco del proyecto con Código ASECRA0008637.

REFERENCIAS

- Adamo T., Gendreau M., Ghiani G., y Guerriero E. A review of recent advances in time-dependent vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 319(1):1–15, 2024. ISSN 0377-2217. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.06.016>.
- Adom F., Workman C., Thoma G., y Shonnard D. Carbon footprint analysis of dairy feed from a mill in michigan, usa. *International Dairy Journal*, 31:S21–S28, 2013. ISSN 0958-6946. <http://doi.org/10.1016/j.idairyj.2012.09.008>. Carbon and Water Footprint of U.S. Milk, From Farm to Table.
- Aguirre-Villegas H.A., Larson R.A., y Reinemann D.J. Decreasing environmental footprints of dairy production systems: Strategies for emission reduction. *Journal of Environmental Management*, 306:114470, 2022. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114470>. Discusses transportation as a significant emission source and reviews optimization methods in dairy logistics.
- Bonetti C., Puccini G., Bertone S., Bianchotti J., y Denardi M. Optimización de la logística en el transporte de leche mediante recocido simulado: un enfoque eficiente para la distribución láctea. *Mecánica Computacional.*, 40:1087–1096, 2023.
- Hospers J. y Janssens I. Greenhouse gas emissions from raw milk and dairy products supplied to frieslandcampina: Methodology and results. Informe Técnico, FrieslandCampina B.V., Wageningen, The Netherlands, 2025. Report version 1.3. Describes annual carbon footprint monitoring and reduction targets towards 2030 and 2050, validated by SBTi.
- International Dairy Federation. The idf global carbon footprint standard for the dairy sector. 2022. Defines life cycle assessment and carbon footprint standards for dairy sector emissions reporting and reduction.
- Kirkpatrick S., Gelatt J., y Vecchi M. Optimization by simulated annealing. *Science.*, 220:671–

- 680, 1983.
- López-Castro L., Solano-Charris E., y Pagés-Bernaus A. Environmental approach for the design of raw milk collection routes with a heterogeneous fleet. *Computers and Electronics in Agriculture*, 211:107995, 2023.
- Marinakis Y. y Migdalas A. Annotated bibliography in vehicle routing. *Operational Research*, 7:27–46, 2007.
- Paredes-Belmar G., Marianov V., Bronfman A., Obreque C., y Lüer-Villagra A. A milk collection problem with blending. *Transportation Research*, 94:26–43, 2016.
- Paredes-Belmar G., Montero E., y Leonardini O. A milk transportation problem with milk collection centers and vehicle routing. *ISA Transactions*, 122:294–311, 2022.
- Sahu A. et al. Examining the carbon emissions from dairy supply chains: Mitigation strategies and stakeholder roles. *Biochemical Journal*, 8(4S):194–209, 2024. <http://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i4Sg.1068>. Review on carbon emissions in dairy supply chains with emphasis on sustainable logistics optimization.
- Thakur G., Pal A., Mittal N., Yajid M.S.A., y Gared F. A significant exploration on meta-heuristic based approaches for optimization in the waste management route problems. *Scientific Reports*, 14(1):14853, 2024. ISSN 2045-2322. <http://doi.org/10.1038/s41598-024-64133-1>.
- Ulrich R., Thoma G., Nutter D., y Wilson J. Tailpipe greenhouse gas emissions from tank trucks transporting raw milk from farms to processing plants. *International Dairy Journal*, 31:S50–S56, 2013. ISSN 0958-6946. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2012.09.009>. Carbon and Water Footprint of U.S. Milk, From Farm to Table.
- Yeun L., Ismail W., Omar K., y Zirour M. Vehicle routing problem: Models and solutions. *Journal of Quality Measurement and Analysis*, 4:205–218, 2008.