

Optimizing of Compost Distribution to Green Areas in Viña del Mar, Chile

Alvaro Vásquez¹, Carola Blazquez^{2,3}, and Gabriel Gutierrez-Jarpa⁴

¹Universidad Andrés Bello, Santiago, Chile, a.vasquezballon@uandresbello.edu

²Universidad Andrés Bello, Viña del Mar, Chile, cblazquez@unab.cl

³Center for Advanced Transportation, Logistics, and Economic Competitiveness, ANID/CIN250061, Santiago, Chile

⁴Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile, gabriel.gutierrez@pucv.cl

Abstract—The generation of organic waste (OW) represents one of the major environmental challenges worldwide, mainly due to its contribution to pollution and greenhouse gas emissions. Several countries have promoted strategies for the valorization of OW through processes such as composting, aiming to reduce its final disposal in landfills. This article proposes the design of a logistics system for distributing compost produced from OW generated at fresh food markets with the objective of minimizing transportation and operational costs. A Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model is formulated, integrating multiperiod routing decisions, demand allocation, and operational constraints such as vehicle capacity, service times, and working-hour restrictions. The model is applied to a case study in Viña del Mar, Chile, considering the distribution of compost to municipal parks and green areas over a planning horizon. Computational experiments are conducted to analyze the behavior of the logistics system as a function of vehicle capacity and key parameters (minimum and maximum demand). Results indicate that it is possible to satisfy the total compost demand required by the considered green areas within the planning horizon when using a single vehicle with capacities greater than 8 tons. These findings highlight the potential of mathematical modeling as a decision-support tool for sustainable OW management at the municipal level, providing insights for policymakers and practitioners seeking efficient and environmentally responsible solutions.

Keywords—Organic Waste, Sustainable Logistics, Mixed-Integer Linear Programming, Composting, Fresh Food Markets.

Optimización de la Distribución de Compost hacia Áreas Verdes en Viña del Mar, Chile

Alvaro Vásquez¹, Carola Blazquez^{2,3}, and Gabriel Gutiérrez-Jarpa⁴

¹Universidad Andrés Bello, Santiago, Chile, a.vasquezballon@uandresbello.edu

²Universidad Andrés Bello, Viña del Mar, Chile, cbblazquez@unab.cl

³Center for Advanced Transportation, Logistics, and Economic Competitiveness, ANID/CIN250061, Santiago, Chile

⁴Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile, gabriel.gutierrez@pucv.cl

Resumen— La generación de residuos orgánicos (RO) representa uno de los principales desafíos ambientales a nivel mundial, debido a su contribución a la contaminación y a las emisiones de gases de efecto invernadero. Diversos países han impulsado estrategias de valorización de RO mediante procesos como el compostaje, con el fin de disminuir su disposición final en vertederos y rellenos sanitarios. Este artículo propone el diseño de un sistema logístico para la distribución de compost a partir de RO generados en ferias libres con el objetivo de minimizar costos de transporte y operación. Para ello, se formula un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) que integra decisiones de ruteo multiperíodo, asignación de demanda y restricciones operativas, tales como capacidad vehicular, tiempos de servicio y limitaciones de horario laboral. El modelo se aplica a un caso de estudio en la comuna de Viña del Mar, Chile, considerando la distribución de compost hacia áreas verdes durante un horizonte de planificación. Además, se realizan experimentos computacionales que permiten analizar el comportamiento del sistema logístico en función de la capacidad del vehículo y parámetros como demanda mínima y máxima. Los resultados indican que es posible satisfacer la demanda total de compost requerida por las áreas verdes dentro del horizonte de planificación para vehículos con capacidad superior a 8 toneladas. Estos hallazgos evidencian el potencial de la modelación matemática como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en la gestión sostenible de RO a nivel municipal, aportando soluciones eficientes y ambientalmente responsables.

Palabras clave: Residuos Orgánicos, Logística sostenible, Programación lineal entera mixta, Compostaje, Ferias libres.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la generación de residuos sólidos urbanos ha experimentado un crecimiento sostenido durante las últimas décadas. En el año 2023, se estimó una generación global cercana a los 2.100 millones de toneladas de estos residuos, proyectándose un aumento hasta aproximadamente 3.800 millones de toneladas para el año 2050. En América Latina y el Caribe, la generación anual alcanza los 230 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos, mientras que en Chile se reportaron cerca de 8.7 millones de toneladas en el año 2022 [1].

De acuerdo con la Organización de Naciones Unidas, aproximadamente el 50 % de los residuos sólidos urbanos corresponde a RO, los cuales presentan un alto potencial de valorización [2]. Sin embargo, cuando estos residuos son dis-

puestos en vertederos sin tratamiento alguno, generan impactos negativos ambientales, tales como la generación de lixiviados, la proliferación de vectores sanitarios y la emisión de gases de efecto invernadero, principalmente el metano [3].

En Viña del Mar, las ferias libres representan una fuente relevante de generación de RO. Según antecedentes municipales, anualmente se recolectan cerca de 630 toneladas de RO provenientes de dos ferias principales (Estero Marga y Caupolicán), de las cuales aproximadamente solo 160 toneladas son transformadas en tierra orgánica [4]. No obstante, estimaciones recientes indican que el conjunto de ferias libres en esta comuna generó en el año 2024 más de 1600 toneladas de RO entre comestibles y no comestibles [5].

Esta comuna, cuenta con una extensa red de hasta 298 áreas verdes urbanas, compuesta por 278 plazas y 20 parques, estas abarcan una superficie total superior a 1.4 millones de metros cuadrados [6]. Las áreas verdes representan un destino natural para la aplicación del compost generado, permitiendo cerrar el ciclo de valorización de los RO a nivel local. En este contexto, la presente investigación propone un modelo de optimización logística para la distribución de compost desde una planta municipal hacia las áreas verdes, integrando restricciones operativas reales y un horizonte de planificación estacional. El objetivo es contribuir al diseño de sistemas logísticos más eficientes y sostenibles para la gestión de RO a nivel municipal. Desde una perspectiva económica, el modelo minimiza costos de distribución del compost considerando transporte y operación. No obstante, esta optimización también genera beneficios ambientales, reduciendo la disposición en vertederos y las emisiones de metano.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

De acuerdo a la literatura existente, se han desarrollado diversas metodologías para abordar los problemas de gestión de residuos desde una perspectiva logística y de optimización. Una parte importante de la literatura modela los residuos como una carga homogénea, enfocándose principalmente en la minimización de los costos de recolección y disposición final [7]. Estos enfoques permitieron mejorar la eficiencia operativa de los sistemas de recolección, aunque generalmente

no consideran procesos posteriores de valorización ni decisión de distribución de subproductos. En este ámbito, se encuentran las formulaciones basadas en el Problema de Ruteo Vehicular con Restricciones de Capacidad (CVRP por sus siglas en inglés). La referencia [8] propone un enfoque de ruteo que permite optimizar las rutas de una flota limitada de vehículos encargados de atender un conjunto de nodos de demanda espacialmente distribuidos, minimizando los costos operativos asociados tanto a la distancia recorrida como al uso de los vehículos. Este tipo de modelo resulta especialmente adecuado para representar sistemas urbanos con restricciones de capacidad y tiempos de operación.

Por otra parte, otros estudios han extendido los modelos de ruteo incorporando decisiones adicionales relacionadas con la planificación temporal y el inventario. La referencia [9] desarrolla un modelo MILP para el diseño de sistemas de recolección de residuos domiciliarios en islas rurales, integrando simultáneamente la localización de sitios de recolección, la frecuencia de visitas y la secuencia de rutas diarias. La formulación combina elementos del problema periódico de rutas de vehículos y problema de rutas con inventario, diferenciándose de los enfoques tradicionales al optimizar de manera conjunta decisiones estratégicas y operativas. Asimismo, el estudio compara distintas estrategias operativas, como el uso de compactación a bordo frente al transporte de contenedores completos. En otro estudio desarrollado por [10], se presenta un modelo de optimización basado en MILP que integra la selección de puntos de acopio y tratamiento, el diseño de rutas de recolección y distribución, modeladas como variantes del Problema de Ruteo Vehicular, y el balance de flujos entre centros de acopio, plantas de tratamiento y puntos de distribución de compost. El modelo considera restricciones de capacidad, ventanas de tiempo y la naturaleza perecedera de los RO, además es validado mediante un caso de estudio en la comuna Quilpué, mostrando reducciones significativas en las distancias recorridas.

En general, la literatura evidencia que los modelos de ruteo con restricciones de capacidad constituyen una herramienta ampliamente utilizada para la optimización de sistemas logísticos asociados a la gestión de residuos. No obstante, la mayoría de los estudios se concentra en la etapa de recolección, mientras que existe un número limitado de trabajos que abordan de manera integrada la distribución multiperíodo de productos derivados del tratamiento de RO en contextos urbanos y bajo restricciones operativas reales.

III. MODELO

El modelo de optimización propuesto corresponde a un MILP, cuyo objetivo es minimizar los costos de transporte y operación asociados a la distribución de compost. Para lograr este objetivo, se considera la operación de una planta de compostaje que recolecta RO y los transforma en compost. Existe una demanda estable del producto y esta se utiliza para la fertilización de áreas verdes de una comuna.

Para abordar estas restricciones, cada área verde define una cantidad mínima y máxima de compost que puede recibir por

visita de vehículo con una cierta capacidad, siempre que su demanda total sea satisfecha dentro del horizonte de planificación. Paralelamente, la planta de compostaje debe coordinar una flota de vehículos durante la temporada, asegurando que cada vehículo visite un conjunto de áreas verdes respetando las restricciones de capacidad y los límites máximos de tiempo de operación.

El modelo se construye bajo los siguientes supuestos:

- Se dispone de una cantidad suficiente de compost producido en la planta de compostaje para satisfacer la demanda total de las áreas verdes durante todo el horizonte de planificación.
- No se considera inventario de compost en la planta de compostaje y el material producido se distribuye directamente a las áreas verdes.
- La demanda de cada área verde no puede ser atendida en una única visita, por lo que se requiere distribuir las entregas en múltiples períodos.
- La demanda de compost de cada área verde es conocida, determinística y proporcional a su superficie.
- Cada área verde define una cantidad mínima y máxima de compost que puede recibir por visita de vehículo dependiente de su capacidad.

Conjuntos

- T : horizonte de planificación para el ruteo de la flota de vehículos.
- N : conjunto de áreas verdes a visitar; el nodo 0 representa la planta de compostaje.

Parámetros

- D_i : demanda total de compost del área verde $i \in N$.
- d_i^- : cantidad mínima de compost entregable al área verde i por visita.
- d_i^+ : cantidad máxima de compost entregable al área verde i por visita.
- Q : capacidad del vehículo.
- c_{ij} : costo de transporte entre los nodos i y j , con $i \neq j$.
- s_{ij} : tiempo de viaje entre los nodos i y j , con $i \neq j$.
- r_i : tiempo de servicio requerido en el área verde i cuando es visitado.
- R : duración máxima permitida de la ruta de un vehículo.
- P_{Max} : duración máxima permitida por período T .

Variables de Decisión

$$y_{i,t} = \begin{cases} 1, & \text{si el área verde } i \in N \text{ es visitado en el período } t \in T, \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

$$x_{ij}^t = \begin{cases} 1, & \text{si el área verde } j \in N \text{ es visitado inmediatamente después del área verde } i \in N \text{ durante el período } t \in T, \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases} \quad x_{ij}^t \in \{0, 1\}, \quad \forall t \in T, i, j \in N, i \neq j \quad (12)$$

$$w_i^t \geq 0: \text{ cantidad de compost entregada al área verde } i \in N \text{ durante el período } t \in T. \quad y_i^t \in \{0, 1\}, \quad \forall t \in T, i \in N \quad (13)$$

$$u_i^t \geq 0: \text{ cantidad de compost acumulada en el vehículo después de visitar el área verde } i \in N \text{ durante el período } t \in T. \quad w_i^t \geq 0, \quad \forall t \in T, i \in N \quad (14)$$

$$p_i^t \geq 0: \text{ tiempo acumulado de viaje y servicio al finalizar la atención del área verde } i \in N \text{ durante el período } t \in T. \quad p_i^t \geq 0, \quad \forall t \in T, i \in N \quad (15)$$

Función Objetivo

$$\min f(x) = \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ i \neq j}} c_{ij} x_{ij}^t \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} x_{ij}^t = y_j^t, \quad \forall j \in N \setminus \{0\}, t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} x_{ij}^t = \sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} x_{ji}^t, \quad \forall j \in N, t \in T \quad (3)$$

$$u_j^t \geq u_i^t + w_j^t - Q(1 - x_{ij}^t), \quad \forall t \in T, i, j \in N, i \neq j, j \neq 0 \quad (4)$$

$$u_0^t = 0, \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$d_i^- y_i^t \leq w_i^t \leq d_i^+ y_i^t, \quad \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{t \in T} w_i^t \geq D_i, \quad \forall i \in N \setminus \{0\} \quad (7)$$

$$p_j^t \geq p_i^t + s_{ij} + r_j - R(1 - x_{ij}^t), \quad \forall t \in T, i, j \in N, i \neq j \quad (8)$$

$$p_0^t = 0, \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$p_i^t \leq R y_i^t, \quad \forall i \in N \setminus \{0\} \quad (10)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ i \neq j, j \neq 0}} (s_{ij} + r_j) x_{ij}^t \leq P_{\text{Max}}, \quad \forall t \in T \quad (11)$$

La función objetivo (1) minimiza el costo total de distribución del compost desde la planta de compostaje hacia las áreas verdes. Dado que estos costos son proporcionales al consumo de combustible, su minimización contribuye indirectamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Las restricciones (2) aseguran que si un área verde es seleccionado para ser atendido, éste debe ser visitado por un vehículo. Se asegura una distribución equitativa del compost entre todas las áreas verdes. Las restricciones (3) garantizan la conservación del flujo vehicular, mientras que en la planta de compostaje el número de vehículos que salen debe ser igual al número de vehículos que regresan.

Las restricciones (4) y (5) evitan superar la capacidad del vehículo al contabilizar la cantidad de compost entregada a las áreas verdes. Estas restricciones siguen la formulación clásica de Miller–Tucker–Zemlin (MTZ) y representan conceptualmente a los vehículos que salen de la planta vacíos y acumulan carga a medida que visitan los nodos correspondientes. Bajo esta formulación, la secuencia de visitas para la entrega de compost es equivalente a una ruta de recolección, a pesar de la diferente interpretación operativa.

Las restricciones (6) definen la cantidad mínima y máxima de compost que un área verde puede recibir cuando es visitado en un período determinado, contribuyendo una asignación balanceada del compost. En conjunto con la restricciones (7) esto permite asegurar que todas las áreas verdes reciban el compost necesario para su mantenimiento, reforzando el rol social del modelo. La demanda total de compost de cada área verde será completamente satisfecha dentro del horizonte de planificación..

Las restricciones (8) y (9) modelan el tiempo acumulado de viaje y servicio de un vehículo después de atender un área verde en un período dado. Las restricciones (10) limitan el tiempo total de operación del vehículo durante la visita a un área verde, condicionado a que dicha área verde sea efectivamente atendido en el período correspondiente. Las restricciones (11) imponen un límite superior al tiempo total de operación del vehículo en cada período $t \in T$. En particular, esta restricción controla que la suma de los tiempos de viaje s_{ij} y de servicio r_j asociados a cada arco recorrido durante el período no exceda el tiempo máximo disponible P_{Max} . De este modo, se garantiza la factibilidad temporal de las rutas y se respeta la duración máxima permitida de la jornada operativa,

lo que también se asocia a condiciones laborales adecuadas para personal de planta.

En general, las variables de decisión asociadas a las rutas, cantidades transportadas y tiempos de operación permiten no solo optimizar el desempeño económico del sistema, sino también contribuir a la valorización de RO mediante la distribución eficiente de compost, apoyando principios de economía circular y sostenibilidad ambiental a nivel municipal.

IV. CASO ESTUDIO

Viña del Mar está ubicada en la región de Valparaíso y se considera como una de las más densamente pobladas de la región con 3.055 habitantes/km² [11], [12]. En este estudio, se utilizan 13 ferias de verduras y frutas con un total de 1.688 puestos activos [13]. La información proveniente de estas ferias es utilizada como variable relevante para estimar la generación de RO en la comuna. La referencia [14] afirma que la planta de compostaje ubicada en el parque Sausalito de Viña del Mar es una de las plantas más grandes de América Latina. Esta planta de tratamiento de RO se considera como nodo origen del sistema de distribución de compost.

La información espacial de las áreas verdes de Viña del Mar fue obtenida a partir de registros oficiales del Instituto Nacional de Estadística del año 2020 [6]. Estos archivos fueron procesados en el software QGIS mediante procedimientos de depuración, normalización de geometrías y extracción de atributos espaciales relevantes con el fin de generar un conjunto de datos consistentes y adecuados para crear diferentes instancias. En total, se consideran 298 áreas verdes localizadas dentro del límite urbano (ver Fig. 1).

Dado el alto número de entidades y con el objetivo de reducir la complejidad computacional del modelo de optimización, se aplica un procedimiento de agrupamiento espacial usando el algoritmo de *K-means*. En una etapa inicial, se generaron 20 clusters, asegurando una distribución espacial equilibrada dentro del área de estudio. Adicionalmente, cinco parques de gran extensión superficial fueron subdivididos en 18 clusters adicionales con el fin de evitar concentraciones excesivas de demanda en un solo nodo, así poder garantizar una asignación equitativa del compost. Finalmente, la instancia consiste en un total de 38 nodos de demanda, como se muestra en la Fig. 2.

Para el cálculo de distancias y tiempos de viaje entre la planta de compostaje y los nodos de demanda definidos por los clusters de áreas verdes, se utilizó el motor Open Source Routing Machine (OSRM), el cual permite estimar rutas óptimas sobre redes viales reales basadas en datos de Open Street Map (OSM). Este procedimiento fue automatizado mediante scripts desarrollados en Python.

La demanda de compost asociada a cada cluster se estimó en función a la superficie total de las áreas verdes que lo componen. La referencia [15] considera un requerimiento promedio de compost de 2 kg/m² para labores de mantenimiento y mejoramiento del suelo. Sup_i corresponde a la superficie total en m² de áreas verdes asociadas al cluster i . En consecuencia, la demanda total de compost en toneladas del nodo i , denotada por D_i , se calcula tal como se muestra en (16).

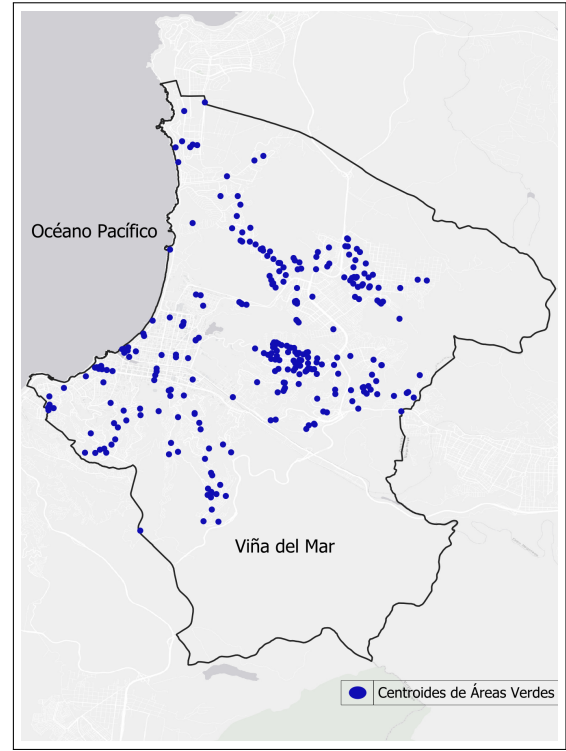


Fig. 1: Centroides de Áreas Verdes.

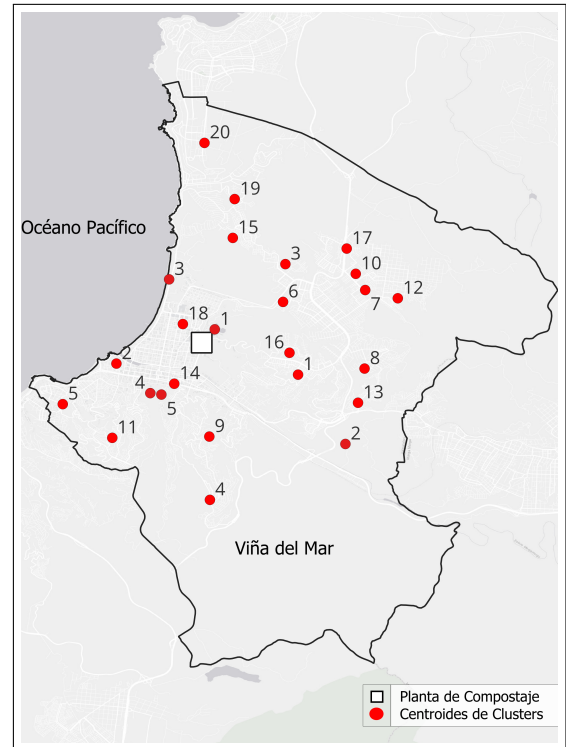


Fig. 2: Planta de Compostaje y Clusters.

$$D_i = \frac{2 * \text{Sup}_i}{1000} \quad (16)$$

Según [16] y [17], determinadas épocas del año resultan más adecuadas para la aplicación de compost en áreas verdes, ya que las condiciones de temperatura y humedad favorecen la actividad de los microorganismos del suelo y mejoran la eficiencia agronómica del material aplicado. Dentro del caso de estudio, [10] sugiere un horizonte de planificación de 20 semanas, las cuales se enmarcan dentro de dichas épocas.

El tiempo requerido para atender cada nodo de demanda i se modela mediante el tiempo de servicio r_i , el cual representa la duración total de intervención de un vehículo en dicho nodo. De acuerdo con las referencias [18] y [19], este tiempo se compone de los siguientes elementos principales:

1. **Tiempo de preparación**, que incluye actividades administrativas y de coordinación, tales como el aviso al encargado del área verde, la firma de recepción y las instrucciones previas a la descarga.
2. **Tiempo de carga**, se requiere 2 minutos por tonelada para cargar el RO a un vehículo [20].
3. **Tiempo de detención**, asociado a las maniobras de estacionamiento, acceso a áreas verdes y posicionamiento del vehículo.
4. **Tiempo de descarga**, corresponde a la descarga efectiva del compost.

La suma de estos valores define el valor de r_i , el cual se considera constante para cada nodo dentro del horizonte de planificación, según se muestra en (17).

$$r_i = t_{i,p} + t_{i,c} + t_{i,d} + t_{i,des} \quad (17)$$

El costo de transporte entre los nodos i y j se modela como una combinación de costos dependientes de la distancia recorrida y del tiempo de viaje. La distancia entre los nodos i y j se representa mediante el parámetro d_{ij} , mientras que s_{ij} corresponde al tiempo de viaje asociado. Bajo estas definiciones, el costo de transporte se calcula mediante (18).

$$c_{ij} = \alpha \cdot d_{ij} + \beta \cdot s_{ij} \quad (18)$$

El parámetro α representa el costo unitario por kilómetro recorrido y se define como la suma del costo de combustible C_{comb} y el costo de operación del vehículo C_{veh} , según se muestra en (19).

$$\alpha = C_{comb} + C_{veh} \quad (19)$$

El parámetro β corresponde al costo unitario por hora de operación y considera tanto el costo del conductor C_{cond} como el costo horario del vehículo C_{veh_hr} , de acuerdo con estimaciones del Observatorio Logístico [21], tal como se expresa en (20).

$$\beta = C_{cond} + C_{veh_hr} \quad (20)$$

El costo de combustible C_{comb} se calcula usando la expresión (21) a partir del precio unitario del combustible p_f y del rendimiento promedio del vehículo k , conforme a antecedentes oficiales del sector transporte [22]. Además, se estima los costos C_{veh} como unitarios por kilómetro, asociados a la depreciación, mantenimiento, y cambio de neumáticos para camiones de carga y distribución [23].

$$C_{comb} = \frac{p_f}{k} \quad (21)$$

En particular, $p_f = \$1050$ CLP/litro corresponde al precio del combustible y $k = 3,5$ km/litro al rendimiento promedio del vehículo. Asimismo, $C_{cond} = \$7000$ CLP/h representa el costo del conductor y $C_{veh_hr} = \$3000$ CLP/h el costo horario del vehículo. Nótese que al 28 de enero del 2026 el tipo de cambio oficial es de $\$1 \text{ USD} = \861 CLP [24], para referencias internacionales.

Con el fin de representar condiciones operativas realistas, para cada capacidad vehicular sensibilizada, las cotas mínimas y máximas de demanda (d_i^-, d_i^+) distribuidas por período fueron definidas como un 50 % y un 100 % de la capacidad del vehículo, respectivamente. Este criterio evita soluciones logísticamente ineficientes asociadas al uso de vehículos con niveles de carga muy bajos, los cuales implicarían mayores costos de transporte.

V. RESULTADOS

Los experimentos computacionales fueron ejecutados en un PC con un procesador Intel(R) Core (TM) i5-12500H de 12^a generación. El modelo MILP fue implementado en lenguaje AMPL y resuelto mediante el software Gurobi Optimizer version 12.0.1 estableciendo un límite de ejecución de 3600 segundos.

Las Tablas I, II, III y IV resumen el desempeño del sistema para distintas capacidades vehiculares. En ellas, **T** identifica el período del horizonte de planificación, **Turno** corresponde al turno operativo (mañana “Turno 1” y tarde “Turno 2”) definido por **R**, **CAP** indica la capacidad del vehículo, **CT** representa el costo total semanal de ruteo, **CTA** es el costo acumulado por período, **KT** es la distancia total recorrida por período, **TO** y **TOA** representan el tiempo operativo semanal y acumulado, respectivamente, **CC** corresponde a la cantidad de clusters atendidos, **SC** es el conjunto de clusters visitados en un período, **DC** es la demanda total distribuida y **GAP** es la brecha de integralidad.

Tabla I
Resultados computacionales utilizando un vehículo con capacidad máxima de 7 toneladas

T (semana)	Turno	CT (\$ CLP)	CTA (\$ CLP)	KT (km)	TO (min)	TOA (min)	CC	SC	DC (t)	GAP (%)
1	1	136.137	136.137	136	1.440	1.440	13	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 17, 18, 19, 20	63	29,03
2	1	139.438	275.575	139	1.484	2.923	14	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15, 17, 18, 20	67	29,03
3	1	136.282	411.857	136	1.435	4.358	13	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15, 17, 18, 20	60	29,03
4	1	131.489	543.347	131	1.377	5.736	12	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15, 17, 20	60	29,03
5	1	171.725	715.071	172	1.869	7.605	20	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	73	29,03
6	1	132.727	847.799	133	1.533	9.138	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20	67	29,03
7	1	177.629	1.025.428	178	1.876	11.015	20	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	80	29,03
8	1	132.727	1.158.155	133	1.533	12.548	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20	67	29,03
9	1	138.656	1.296.811	139	1.539	14.086	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20	72	29,03
10	1	127.587	1.424.398	128	1.366	15.452	12	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 17, 20	60	29,03
11	1	132.727	1.557.126	133	1.533	16.985	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20	60	29,03
12	1	132.727	1.689.853	133	1.533	18.519	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20	63	29,03
13	1	131.344	1.821.197	131	1.382	19.901	12	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 17, 19, 20	45	29,03
14	1	131.344	1.952.541	131	1.382	21.283	12	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 17, 19, 20	55	29,03
15	1	138.656	2.091.197	139	1.539	22.821	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20	70	29,03
16	1	174.047	2.265.244	174	1.872	24.693	20	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	77	29,03
17	1	174.047	2.439.290	174	1.872	26.564	20	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	77	29,03
18	1	167.925	2.607.215	168	1.866	28.430	20	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	77	29,03
19	1	133.037	2.740.252	133	1.428	29.857	13	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 17, 18, 20	63	29,03
20	1	140.595	2.880.847	141	1.594	31.451	15	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 20	67	29,03
2	2	179.754	179.754	180	2.272	2.272	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	94	0,95
3	2	175.852	355.607	176	2.266	4.538	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	86	0,95
4	2	181.951	537.558	182	2.274	6.812	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	98	0,95
5	2	175.892	713.449	176	2.267	9.079	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	88	0,95
6	2	179.754	893.204	180	2.272	11.351	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	95	0,95
7	2	179.000	1.072.203	179	2.270	13.621	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	95	0,95
8	2	182.902	1.255.105	183	2.276	15.896	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	100	0,95
9	2	179.754	1.434.859	180	2.272	18.168	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	95	0,95
10	2	179.039	1.613.898	179	2.271	20.439	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	89	0,95
11	2	193.020	1.806.918	193	2.286	22.725	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	106	0,95
12	2	179.754	1.986.672	180	2.272	24.997	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	98	0,95
13	2	189.911	2.176.583	190	2.284	27.281	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	111	0,95
14	2	179.000	2.355.583	179	2.270	29.551	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	98	0,95
15	2	186.010	2.541.593	186	2.278	31.829	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	99	0,95
16	2	175.892	2.717.484	176	2.267	34.096	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	86	0,95
17	2	175.892	2.893.376	176	2.267	36.364	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	98	0,95
19	2	193.059	3.086.435	193	2.288	38.651	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	107	0,95

En los escenarios de vehículos con capacidades 7 y 8 toneladas, los resultados evidencian una mayor fragmentación de la cobertura de la demanda y un incremento sostenido del costo total acumulado. Los valores relativamente altos de la brecha de optimalidad, especialmente en el Turno 1, indican una mayor dificultad para alcanzar soluciones de buena calidad bajo restricciones de capacidad más estrictas. Para los escenarios de 9 y 10 toneladas, presentan un mejor equilibrio entre eficiencia operativa y calidad de solución. Estas configuraciones logran una mayor consolidación de rutas y una cobertura de demanda más estable, junto con una reducción relevante de la optimalidad, particularmente en el Turno 2, lo que refleja un mejor desempeño del solver dentro del tiempo límite establecido.

La Figura 3 muestra diferencias que ilustran y comparan soluciones de ruteo para capacidades vehiculares de 7, 8, 9 y 10 toneladas en diferentes períodos. La Figura 4 presenta una clara obligatoriedad de visita a los clusters con superficies considerables, esto para satisfacer la cantidad de compost necesaria por cada nodo en este turno.

En términos económicos, el costo total de transporte disminuye desde 5.967.282 a 4.219.430 CLP, al subir la capacidad máxima del vehículo de 7 a 10 toneladas, lo que representa una reducción acumulada del 29,3 %. Este resultado evidencia

que el uso de vehículos de mayor capacidad permite una operación más eficiente, con menores recorridos y tiempos, sin comprometer el volumen total distribuido. Cabe destacar que el análisis considera exclusivamente costos operacionales de transporte, sin incorporar costos asociados a la adquisición de los vehículos. Por otro lado, se observa una reducción significativa en el número de clusters atendidos, que disminuye de 606 a 424, equivalente a una caída del 30,0 %, lo cual refleja una mayor consolidación de la carga a medida que aumenta la capacidad del vehículo.

En conjunto, los resultados confirman que el aumento de la capacidad vehicular genera mejoras sustanciales en eficiencia operativa y reducción de costos, manteniendo niveles similares de servicio, lo que refuerza la conveniencia de considerar vehículos de mayor capacidad en el diseño del sistema logístico analizado.

VI. CONCLUSIONES

Este artículo presentó un modelo de optimización multi-periódica para el diseño y operación de un sistema de distribución de compost, formulado como un problema MILP, considerando restricciones operativas reales asociadas a capacidades vehiculares, tiempos de operación y cobertura de la demanda. El enfoque propuesto fue aplicado a un caso

Tabla II
Resultados computacionales utilizando un vehículo con capacidad máxima de 8 toneladas

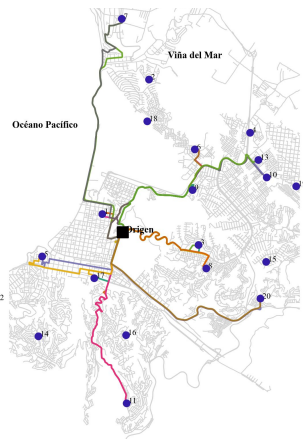
T (semana)	Turno	CT (\$ CLP)	CTA (\$ CLP)	KT (km)	TO (min)	TOA (min)	CC	SC	DC (t)	GAP (%)
1	1	12.455	12.455	12	66	66	1	12	7	34,34
4	1	145.021	157.476	145	1.530	1.596	15	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 17, 18, 20	77	34,34
5	1	142.378	299.854	142	1.490	3.086	14	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 17, 18, 19, 20	76	34,34
6	1	138.656	438.510	139	1.539	4.625	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20	79	34,34
7	1	161.233	599.743	161	1.612	6.237	16	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 17, 18, 19, 20	88	34,34
8	1	136.137	735.880	136	1.440	7.677	13	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 17, 18, 19, 20	74	34,34
9	1	138.656	874.536	139	1.539	9.215	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20	80	34,34
10	1	140.595	1.015.131	141	1.594	10.809	15	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 20	76	34,34
11	1	137.959	1.153.090	138	1.450	12.259	13	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 17, 19, 20	60	34,34
12	1	132.380	1.285.471	132	1.424	13.683	13	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 17, 18, 20	72	34,34
13	1	148.672	1.434.142	149	1.552	15.235	15	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 17, 18, 20	76	34,34
14	1	151.111	1.585.253	151	1.605	16.840	15	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 20	88	34,34
15	1	148.778	1.734.032	149	1.546	18.386	15	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15, 17, 18, 19, 20	72	34,34
16	1	177.629	1.911.661	178	1.876	20.262	20	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	92	34,34
17	1	138.656	2.050.317	139	1.539	21.801	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20	80	34,34
18	1	146.843	2.197.160	147	1.540	23.341	15	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 17, 20	80	34,34
19	1	143.590	2.340.750	144	1.486	24.827	14	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 17, 19, 20	76	34,34
20	1	138.656	2.479.405	139	1.539	26.366	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20	84	34,34
2	2	182.902	182.902	183	2.276	2.276	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	119	0,67
3	2	179.000	361.901	179	2.270	4.546	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	92	0,67
4	2	179.000	540.901	179	2.270	6.816	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	96	0,67
5	2	182.902	723.803	183	2.276	9.091	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	113	0,67
6	2	182.902	906.704	183	2.276	11.367	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	120	0,67
7	2	179.754	1.086.458	180	2.272	13.638	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	108	0,67
8	2	193.059	1.279.517	193	2.288	15.926	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	134	0,67
9	2	179.000	1.458.517	179	2.270	18.196	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	112	0,67
10	2	172.744	1.631.261	173	2.263	20.459	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	100	0,67
11	2	193.059	1.824.320	193	2.288	22.747	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	135	0,67
12	2	179.754	2.004.074	180	2.272	25.018	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	108	0,67
13	2	175.892	2.179.966	176	2.267	27.286	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	101	0,67
14	2	175.852	2.355.818	176	2.266	29.552	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	99	0,67
16	2	175.892	2.531.710	176	2.267	31.819	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	100	0,67
20	2	182.862	2.714.572	183	2.274	34.093	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	112	0,67

Tabla III
Resultados computacionales utilizando un vehículo con capacidad máxima de 9 toneladas

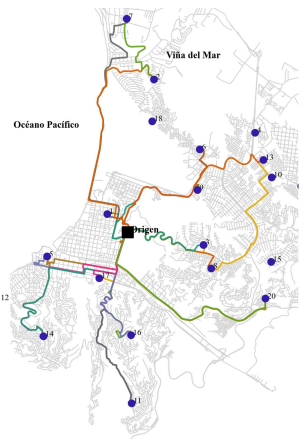
T (semana)	Turno	CT (\$ CLP)	CTA (\$ CLP)	KT (km)	TO (min)	TOA (min)	CC	SC	DC (t)	GAP (%)
2	1	12.455	12.455	12	66	66	1	12	9	31,70
5	1	145.182	157.637	145	1.600	1.666	15	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 20	90	31,70
6	1	137.745	295.382	138	1.438	3.104	13	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 20	77	31,70
7	1	138.656	434.038	139	1.539	4.643	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20	95	31,70
8	1	138.781	572.819	139	1.480	6.122	14	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 17, 18, 20	88	31,70
9	1	138.656	711.475	139	1.539	7.661	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20	72	31,70
10	1	177.629	889.104	178	1.876	9.537	20	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	105	31,70
11	1	177.629	1.066.733	178	1.876	11.414	20	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	104	31,70
12	1	138.656	1.205.389	139	1.539	12.952	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20	93	31,70
13	1	140.595	1.345.985	141	1.594	14.546	15	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 20	95	31,70
14	1	132.727	1.478.712	133	1.533	16.079	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20	79	31,70
15	1	133.055	1.611.767	133	1.427	17.507	13	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 17, 18, 20	81	31,70
17	1	148.778	1.760.545	149	1.546	19.053	15	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15, 17, 18, 19, 20	90	31,70
18	1	138.621	1.899.166	139	1.474	20.527	14	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 17, 18, 20	88	31,70
19	1	148.778	2.047.944	149	1.546	22.072	15	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15, 17, 18, 19, 20	79	31,70
20	1	134.202	2.182.146	134	1.434	23.506	13	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 17, 20	63	31,70
1	2	182.902	182.902	183	2.276	2.276	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	133	2,14
2	2	175.852	358.754	176	2.266	4.542	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	117	2,14
3	2	172.744	531.498	173	2.263	6.805	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	111	2,14
4	2	182.902	714.400	183	2.276	9.081	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	129	2,14
5	2	182.147	896.547	182	2.274	11.355	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	128	2,14
6	2	193.059	1.089.606	193	2.288	13.642	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	137	2,14
7	2	189.911	1.279.517	190	2.284	15.926	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	132	2,14
8	2	179.754	1.459.271	180	2.272	18.197	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	123	2,14
9	2	189.157	1.648.428	189	2.282	20.479	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	142	2,14
10	2	175.892	1.824.320	176	2.267	22.747	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	111	2,14
11	2	186.010	2.010.330	186	2.278	25.025	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	129	2,14
12	2	179.754	2.190.084	180	2.272	27.297	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	126	2,14
13	2	182.902	2.372.985	183	2.276	29.572	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	131	2,14

Tabla IV
Resultados computacionales utilizando un vehículo con capacidad máxima de 10 toneladas

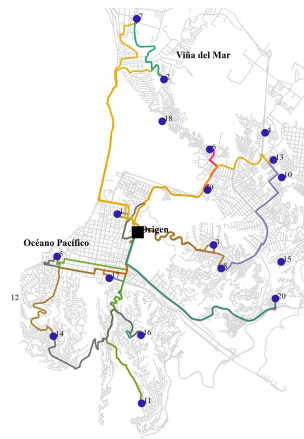
T (semana)	Turno	CT (\$ CLP)	CTA (\$ CLP)	KT (km)	TO (min)	TOA (min)	CC	SC	DC (t)	GAP (%)
3	1	139.438	139.438	139	1.484	1.484	14	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15, 17, 18, 20	81	34,68
5	1	182.825	322.262	183	1.883	3.367	20	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	108	34,68
6	1	143.128	465.390	143	1.489	4.856	14	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 17, 18, 19, 20	95	34,68
7	1	174.977	640.367	175	1.832	6.688	19	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	106	34,68
8	1	138.656	779.023	139	1.539	8.226	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20	98	34,68
9	1	138.675	917.698	139	1.539	9.765	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20	95	34,68
10	1	138.656	1.056.354	139	1.539	11.304	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20	110	34,68
11	1	132.727	1.189.082	133	1.533	12.837	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20	95	34,68
12	1	144.835	1.333.917	145	1.490	14.327	14	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 17, 18, 20	82	34,68
13	1	136.155	1.470.072	136	1.439	15.766	13	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 17, 18, 19, 20	90	34,68
15	1	12.455	1.482.527	12	66	15.833	1	12	10	34,68
17	1	140.595	1.623.122	141	1.594	17.426	15	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 20	100	34,68
18	1	133.994	1.757.116	134	1.422	18.848	13	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 17, 20	85	34,68
19	1	148.794	1.905.911	149	1.546	20.394	15	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15, 17, 18, 19, 20	100	34,68
20	1	140.603	2.046.513	141	1.490	21.884	14	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 17, 20	95	34,68
1	2	182.902	182.902	183	2.276	2.276	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	150	0,57
2	2	179.000	361.901	179	2.270	4.546	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	140	0,57
3	2	186.049	547.950	186	2.280	6.825	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	151	0,57
4	2	175.852	723.803	176	2.266	9.091	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	129	0,57
5	2	182.902	906.704	183	2.276	11.367	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	150	0,57
6	2	186.049	1.092.753	186	2.280	13.646	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	155	0,57
7	2	186.764	1.279.517	187	2.280	15.926	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	144	0,57
8	2	175.892	1.455.409	176	2.267	18.193	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	129	0,57
9	2	175.852	1.631.261	176	2.266	20.459	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	125	0,57
10	2	186.049	1.817.310	186	2.280	22.739	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	149	0,57
11	2	182.862	2.000.172	183	2.274	25.013	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	134	0,57
12	2	172.744	2.172.917	173	2.263	27.276	18	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	124	0,57



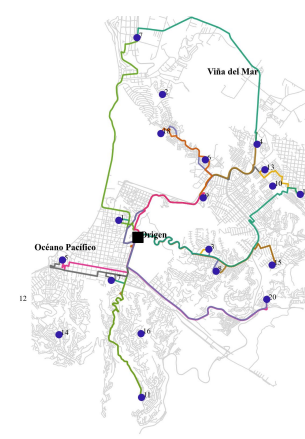
CAP = 7 toneladas



CAP = 8 toneladas



CAP = 9 toneladas

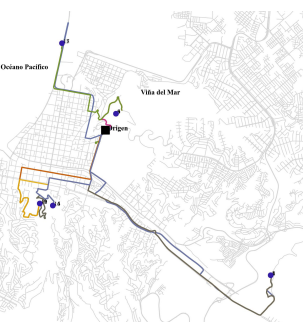


CAP = 10 toneladas

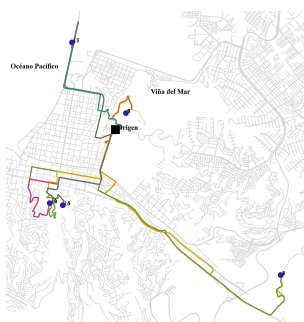
Fig. 3: Rutas de distribución para el Turno 1



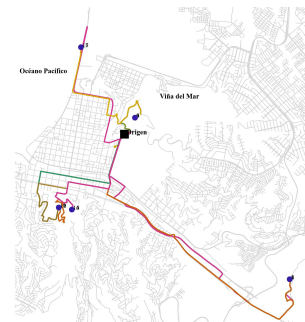
CAP = 7 toneladas



CAP = 8 toneladas



CAP = 9 toneladas



CAP = 10 toneladas

Fig. 4: Rutas de distribución para el Turno 2

de estudio representativo, permitiendo evaluar el impacto de distintas configuraciones de capacidad sobre el desempeño del sistema.

Los resultados obtenidos evidencian que el aumento de la capacidad vehicular tiene un efecto significativo sobre la eficiencia operativa y económica del sistema de distribución. En particular, el uso de vehículos de mayor capacidad permite una mayor consolidación de rutas, reduciendo el número de clusters atendidos, los tiempos totales de operación y los costos de transporte, sin afectar de manera relevante el volumen total de compost distribuido. Esto confirma que es posible mejorar el desempeño logístico manteniendo niveles similares de servicio.

Asimismo, el análisis computacional mostró que escenarios con capacidades más altas presentan una mejor calidad de solución, reflejada en menores brechas de optimalidad dentro del tiempo límite de resolución. Este comportamiento sugiere que configuraciones con mayor capacidad no solo son operativamente más eficientes, sino también más favorables desde el punto de vista de la resolución del modelo, facilitando la obtención de soluciones de buena calidad en horizontes de planificación multiperiodicos.

Como líneas de trabajo futuro, se propone extender el modelo para incorporar elementos de mayor realismo operacional, tales como flotas heterogéneas, emisiones asociadas al transporte y condiciones dinámicas de tráfico. Asimismo, la integración del modelo con enfoques heurísticos o metaheurísticos podría permitir abordar instancias de mayor escala, ampliando su aplicabilidad en contextos urbanos complejos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), a través del proyecto FONDECYT Regular N° 1241471 y Center for Advanced Transportation, Logistics, and Economic Competitiveness ANID/CIN250061.

REFERENCIAS

- [1] Hub de Residuos Sólidos y Economía Circular, "Generación de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe," 2025. [Online]. Available: <https://hubresiduoscirculares.org/home/>
- [2] United Nations Environment Programme, "Global waste management outlook 2024," 2024. [Online]. Available: <https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>
- [3] Ministerio del Medio Ambiente, "Estrategia nacional de residuos orgánicos 2040," 2022. [Online]. Available: <https://economiacircular.mma.gob.cl/residuos-organicos/>
- [4] La Opinión, "Viña del Mar achieves organic soil self-sufficiency through its municipal composting plant," 2019. [Online]. Available: <https://www.laopiniononline.cl/vina-del-mar-se-autoabastece-de-tierra-organica-gracias-a-planta-de-compostaje-municipal-mas-grande-de-chile/>
- [5] Subsecretaría de Desarrollo Regional, "Estudio de caracterización de residuos sólidos domiciliarios y asimilables generados a nivel municipal en Chile," 2024. [Online]. Available: <https://proactiva.subdere.gov.cl/handle/123456789/649/>
- [6] Instituto Nacional de Estadísticas, "Indicadores de calidad de plazas y parques urbanos en Chile," 2020. [Online]. Available: <https://storymaps.arcgis.com/stories/391dac6ee0c3438fbf186aed3ea1cffi>
- [7] C. Blazquez and G. Paredes-Belmar, "Network design of a household waste collection system: A case study of the commune of Renca in Santiago, Chile," *Waste Manag.*, 2020.

- [8] S. Das and B. K. Bhattacharyya, "Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes," *Waste Manag.*, 2015.
- [9] P. A. Miranda, C. A. Blazquez, R. Vergara, and S. Weitzler, "A novel methodology for designing a household waste collection system for insular zones," *Transp. Res. E Logist. Transp. Rev.*, 2015.
- [10] R. Sáez, G. Canessa, A. Pineda, C. Blazquez, G. Gutiérrez-Jarpa, and G. Paredes-Belmar, "A logistics design for treating, collecting, and distributing household organic waste: A case study in the commune of quilpué, Chile," *J. Cleaner Prod.*, 2025.
- [11] Instituto Nacional de Estadística, "Pirámide poblacional," Viña del Mar, Chile, 2024. [Online]. Available: <https://censo2024.ine.gob.cl/resultados/>
- [12] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, "Reportes estadísticos 2023 de Viña del Mar," Viña del Mar, Chile, 2023. [Online]. Available: https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2024&idcom=5109
- [13] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, "Reporte de ferias libres en Chile," 2024. [Online]. Available: <https://www.odepa.gob.cl/precios/consolidador/localizador-ferias-libres>
- [14] El Observador, "Municipal composting plant in Viña del Mar becomes the largest in Latin America," 2020. [Online]. Available: <https://www.observador.cl/ministra-destaco-planta-de-compostaje-municipal-de-vina-del-mar-como-la-mas-grande-america-latina/>
- [15] Ministerio del Medio Ambiente, "Guía de compostaje domiciliario," Santiago, Chile, 2017. [Online]. Available: <https://reciclorganicos.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/10/Guia-de-compostaje-domiciliario-comprimido.pdf>
- [16] I. Blanco, "Épocas adecuadas para el compostaje," Nov 11 2023. [Online]. Available: <https://www.deraizchile.cl/blogs/noticias/como-aplicar-el-compost-en-tu-jardin>
- [17] P. Verde, "Usos y aplicaciones del compost en el jardín," Jun 4 2022. [Online]. Available: <https://partidoverde.com.ar/aplicacion-de-compost-aje/>
- [18] P. Toth and D. Vigo, Eds., *Vehicle routing: Problems, methods, and applications*, 2nd ed. Philadelphia, PA, USA: SIAM, 2014.
- [19] L. A. Guerrero, G. Maas, and W. Hogland, "Solid waste management challenges for cities in developing countries," *Waste Manag.*, 2013.
- [20] C. A. Rotz, "Reference manual: Agricultural machinery, work requirements, and material handling operations," 2022.
- [21] Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, "Observatorio logístico del ministerio de transportes y telecomunicaciones," Santiago, Chile, 2015. [Online]. Available: <https://www.observatoriologistico.cl>
- [22] Subsecretaría de Transportes, "Estudio y planificación del sistema de transporte en Chile," Santiago, Chile, 2013. [Online]. Available: <https://www.mtt.gob.cl>
- [23] CYTIES Investigación & Desarrollo, "Estimación de costos unitarios de operación de camiones, Región de Antofagasta," 2019. [Online]. Available: <https://investantofagasta.cl/wp-content/uploads/2023/01/Estudios-de-evaluacion-de-costos-logisticos-para-el-comercio-exterior-en-la-Region-de-Antofagasta.pdf>
- [24] Banco Central de Chile, "Indicadores Diarios," Jan 28 2026. [Online]. Available: https://si3.bcentral.cl/Bdemovil/BDE/Series/MOV_SC_TC1/