

Bin Location for the Recyclable Household Waste Collection

Carola Blazquez, PhD¹, Pablo Miranda, PhD²

¹Universidad Andres Bello, Santiago, Chile, cblazquez@unab.cl

²Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile, pablo.miranda@ucn.cl

Abstract- The significant increase in waste generation coupled with the existence of public policies and regulatory frameworks generate the need to develop strategies and tools for the design of efficient waste management systems. In particular, this paper explores some formulations to solve the problem of locating bins for the collection of recyclable household waste in the municipality of Renca in Santiago, Chile. This study considers a consolidated management of such waste, where criteria related to economic efficiency and social aspects are taken into account. As a result of the sensitivity analysis, it is concluded that as the maximum number of bins per site and candidate locations increase, distances traveled by users are reduced and the total cost increases since a larger number of bins are located. These results may contribute in the decision-making process of authorities regarding the location of recyclable waste bins. As future work, a multiple waste collection strategy will be considered, where different bins are used for each type of recyclable waste.

Keywords— Bin location model, recyclable household waste, sustainable collection systems

Localización de Contenedores para la Recolección de Residuos Domiciliarios Reciclables

Carola Blazquez, PhD¹, Pablo Miranda, PhD²

¹Universidad Andres Bello, Santiago, Chile, cblazquez@unab.cl

²Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile, pablo.miranda@ucn.cl

Resumen— El incremento significativo en la generación de residuos sumado a la existencia de políticas públicas y marcos regulatorios generan la necesidad de desarrollar estrategias y herramientas para el diseño de sistemas eficientes para la gestión de residuos. En particular, en este trabajo, se exploran algunas formulaciones para resolver el problema de localización de contenedores para la recolección de residuos domiciliarios reciclables en la comuna de Renca en Santiago, Chile. Este estudio considera una gestión consolidada de dichos residuos, donde se contemplan criterios de eficiencia económica y aspectos sociales. Como resultado del análisis de sensibilidad, se concluye que a medida que aumenta el número máximo de contenedores y de ubicaciones candidatas, se obtienen menores distancias recorridas de los usuarios y mayor costo total por localizar un mayor número de contenedores. Estos resultados pueden aportar en la toma de decisiones de las autoridades sobre la locación de contenedores de residuos reciclables. Como futuro trabajo, se considerará una estrategia múltiple de recolección de residuos, donde se utilizan diferentes contenedores para cada tipo de residuo reciclable.

Palabras clave— Modelo de Localización de contenedores; Residuos domiciliarios reciclables; Sistemas de recolección sostenibles

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, se generan 2 mil millones de toneladas de residuos sólidos cada año y se estima que esta generación aumente en 70% para el año 2050 debido al aumento en la población, el consumismo, y la industrialización. Este aumento en la generación de residuos sólidos está acompañado de un sistema de recolección ineficiente, de una separación limitada por tipo de residuos y del alto aumento de vertederos ilegales [1]. Como resultado, se producen más emisiones de metano que contribuyen al cambio climático y a la contaminación ambiental y pone en riesgo la salud de la población [2].

En Chile, la generación de residuos sólidos ha crecido significativamente en las últimas décadas. Por ejemplo, la generación per cápita aumentó de 294 kg/año a 437 kg/año entre los años 2000 y 2018, lo que resulta en una producción total de más de 7,9 millones de toneladas de residuos domésticos anuales aproximadamente [3]. Por lo tanto, se debe buscar la promoción de la gestión sostenible de residuos y la protección ambiental, a través de un marco legal para la reducción de la generación de residuos y el fomento del reciclaje.

Chile se comprometió a alinear sus políticas públicas a los objetivos de desarrollo sostenible propuestos por la ONU, aplicando legislaciones claves tales como la Ley Marco sobre la Gestión de Residuos, Responsabilidad Extendida del Productor (REP) y Fomento al Reciclaje (Ley 20.920) y la Ley sobre las Bases Generales del Medio Ambiente (Ley 19.300).

A pesar de estas normativas, en Chile, se recicla en promedio el 10% de los residuos sólidos totales [4]. En particular, la comuna de Renca ubicada en Santiago, Chile recicla aproximadamente el 1% del total de los residuos generados en dicha comuna [5]. Por lo tanto, se requieren prácticas de reciclaje de tal manera que se separen los residuos reciclables en el origen y se logre una gestión eficiente de los residuos sólidos domiciliarios.

Este estudio propone un modelo de optimización para la identificación de puntos estratégicos para localizar contenedores de residuos reciclables (plástico, vidrio, metal y cartón) en la comuna de Renca en Santiago, Chile. El objetivo es asegurar que estos contenedores sean fácilmente accesibles a los usuarios, incentivando así la participación en prácticas de reciclaje y contribuyendo a la formación de conciencia ambiental. Al mismo tiempo, el modelo tiene como objetivo minimizar los costos de estos contenedores que deben incurrir las municipalidades. Los resultados de este estudio aportarán en la mitigación de la contaminación y la gestión sostenible de residuos en la comuna de Renca, y así contribuir con un modelo que sea replicable en otras ciudades y regiones del país.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Existen diferentes estudios que se han enfocado en la localización de contenedores para la recolección de residuos domiciliarios reciclables. La Tabla I muestra una lista de los estudios más relevantes que se han efectuado en Latinoamérica sobre dicho tema [6-9]. Cabe destacar que se existen varios estudios sobre residuos reciclables en Chile, sin embargo, sólo se encontró un estudio mencionado en la Tabla I que utiliza un modelo matemático para ubicar y asignar contenedores para acopiar estos residuos. En la Tabla II, se describen brevemente distintos estudios que se han realizado a nivel mundial [10-17].

TABLA I
ESTUDIOS SOBRE LOCALIZACIÓN DE CONTENEDORES PARA
RECOLECCIÓN DE RESIDUOS RECICLABLES EN LATINOAMÉRICA

Autores y Año	Lugar	Objetivo del estudio
Gilardino et al., 2017 [6]	Lima, Perú	Proponer modelo de optimización para localizar sitios de recolección y número de contenedores en cada sitio considerando residuos generales y reciclables. Además, resolver el problema de ruteo vehicular usando heurísticas.
Cavallin et al., 2020 [7]	Bahía Blanca, Argentina	Implementar un modelo para resolver el problema de ubicación de contenedores de residuos sólidos reciclables que minimiza los costos dada el área máxima disponible y la capacidad de los contenedores.
Letelier et al., 2021 [8]	Santiago, Chile	Utilizar modelos de optimización y SIG para resolver el problema de ubicación-asignación de contenedores para residuos domiciliarios y reciclados.
Rossit y Bard, 2024 [9]	Bahía Blanca, Argentina	Proponer un modelo de optimización bi-objetivo para el diseño de red de puntos de recolección de residuos reciclables y mixtos, minimizando costos y frecuencia de recolección necesaria.

TABLA II
ESTUDIOS SOBRE LOCALIZACIÓN DE CONTENEDORES PARA
RECOLECCIÓN DE RESIDUOS RECICLABLES A NIVEL MUNDIAL

Autores y Año	Lugar	Objetivo del estudio
Tralhão et al., 2010 [10]	Coimbra, Portugal	Proponer un modelo multi-objetivo (minimiza costos y distancia promedio) para localizar contenedores con multi-compartimentos para residuos reciclables.
Ratković et al., 2014 [11]	Belgrado, Serbia	Presentar un modelo para el diseño de red logística reciclable definiendo ubicaciones óptimas de recolección y itinerarios óptimos de los vehículos de recolección de residuos reciclables.
Harijani et al., 2017 [12]	Terán, Irán	Proponer un modelo MILP para asignar las ubicaciones de los contenedores, el transporte de los residuos y la distribución de los materiales reciclados.
Hemmelmayr et al., 2017 [13]	No se menciona	Proponer un modelo matemático y una heurística para resolver el problema de ubicación y ruteo de residuos de cartón.
Aka y Akyüz, 2018 [14]	Antalya, Turquía	Construir un modelo de localización y ruteo basado en programación de metas difusas para seleccionar sitios óptimos de recolección de residuos reciclables
Nevrlý et al., 2021 [15]	República Checa	Proponer modelos multi-objetivos para localizar contenedores de residuos plásticos que minimizan costos y distancias considerando la frecuencia de recolección.
Jamiro et al., 2021 [16]	Johor Bahru, Malasia	Determinar la ubicación y asignación de contenedores de residuos reciclables usando un modelo matemático.

Hashemi-Amiri et al., 2023 [17]	No se menciona	Formular un modelo MILP para mejorar el sistema de recolección de residuos sólidos reciclables considerando la ubicación de contenedores, jornadas de trabajo y decisiones de ruteo vehicular.
---------------------------------	----------------	--

II. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema específico que se aborda en este estudio consiste en la localización de contenedores en un área de interés, para la recepción o acopio de los residuos reciclables generados en dicha zona. En este caso, se considera que todos los residuos reciclables generados serán depositados por los usuarios involucrados en forma consolidada o mezclada en dichos contenedores, para su posterior recolección. En este caso, dicha recolección de residuos no es abordada, donde su integración es considerada una línea de investigación futura.

Por otro lado, se asume que existe un conjunto de zonas generadoras de residuos reciclables, representadas por un conjunto de centroides (ver Fig. 2a). Además, existe un conjunto de sitios potenciales o candidatos para la localización de contenedores (ver Fig. 2b). Así, se deben seleccionar algunas de las ubicaciones existentes y determinar la cantidad de contenedores a instalar en cada una de las ubicaciones seleccionadas. Además, se debe asignar cada uno de los centroides o zonas generadoras a alguno de los sitios seleccionados. En esta investigación, se considera este esquema de asignación como aproximación para predecir o determinar el comportamiento de los usuarios en cuanto a su selección del sitio para depositar sus residuos reciclables.

De este modo, estas decisiones de localización de contenedores y asignación de centroides deben ser abordadas sobre la base de un modelamiento bi-objetivo, donde por una parte se debe minimizar la distancia total entre los centroides y las ubicaciones a las cuales son asignadas, y por otra parte, se busca minimizar el costo o inversión total asociada a los contenedores instalados.

III. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Dadas las decisiones principales que se deben abordar en el problema estudiado (localización de contenedores y asignación de zonas generadoras) y observando los trabajos existentes en la literatura (Ver Tablas I y II), la estructura de los modelos de localización de instalaciones (Facility Location Problem, FLP) surgen como una estructura natural de modelamiento para este tipo de problemas. De este modo, la formulación desarrollada para abordar el problema descrito se basa en la siguiente notación:

- N : Conjunto de sitios candidatos para localizar o instalar contenedores.
- M : Conjunto de centroides o zonas generadoras de residuos.
- X_i : Variable binaria que indica se la ubicación i es seleccionada para instalar contenedores.

- Z_i : Variable entera que indica la cantidad de contenedores ubicados en el sitio i .
- Y_{ij} : Variable binaria que indica si el centroide o zona j es asignada a la ubicación de contenedores i .
- Cap : Capacidad de acopio de un contenedor (kg).
- W_j : Residuos reciclables generados en el centroide j (kg).
- CI : Costo unitario de instalación de contenedores.
- D_{ij} : Distancia existente entre el centroide j y el sitio i .
- q_i : Número mínimo de contenedores a instalar en el sitio i .
- Q_i : Número máximo de contenedores a instalar en el sitio i .
- $DMax$: Distancia máxima aceptable entre los centroides y los respectivos sitios asignados.

De este modo, el modelo es formulado de la siguiente manera:

$$\text{Min } f_1 = \sum_{i \in N} CI \cdot Z_i \quad (1)$$

$$\text{Min } f_2 = \sum_{i \in N} \sum_{j \in M} D_{ij} \cdot Y_{ij} \quad (2)$$

$$\text{s.a : } \sum_{i \in N} Y_{ij} = 1 \quad \forall j \in M \quad (3)$$

$$Z_i \leq Q_i \cdot X_i \quad \forall i \in N \quad (4)$$

$$Z_i \geq q_i \cdot X_i \quad \forall i \in N \quad (5)$$

$$\sum_{j \in M} W_j \cdot Y_{ij} \leq Cap \cdot Z_i \quad \forall i \in N \quad (6)$$

$$Y_{ij} \cdot D_{ij} \leq DMax \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (7)$$

$$X_i, Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (8)$$

$$W_j \in Z^+ \quad \forall j \in M \quad (9)$$

La expresión (1) representa el costo total asociado a la compra e instalación de los contenedores. La expresión (2) representa la distancia total entre todos los centroides y los sitios asignados a cada uno de ellos. La restricción (3) asegura que cada uno de los centroides sea asignado exactamente a un sitio candidato de contenedores. La restricción (4) asegura instalar contenedores únicamente en sitios seleccionados para tales efectos, donde además se asegura no instalar más contenedores que el máximo posible en cada uno de los sitios. Similarmente, la restricción (5) asegura instalar el mínimo de contenedores requeridos en cada ubicación, en caso de que esta haya sido seleccionada. La restricción (6) establece la cantidad mínima de contenedores requeridos en cada sitio i , de modo de disponer de la capacidad necesaria para acopiar los residuos generados por todos los centroides asignados a dicho sitio. La restricción (7) asegura que ningún centroide sea asignado a un sitio ubicado a una distancia mayor a la distancia máxima aceptable, $Dmax$. Finalmente, (8) y (9) representan las restricciones de dominio de las variables de decisión del modelo.

De este modo, el modelo propuesto, siendo de naturaleza bi-objetivo, busca encontrar soluciones que minimicen ambas medidas de desempeño (f_1 y f_2), las cuales presentan una naturaleza conflictiva entre sí. En otras palabras, minimizar exclusivamente el costo de instalación de contenedores puede llevar un número reducido de ubicaciones, lo cual generará una distancia recorrida por los usuarios muy elevada, en contraste con una solución que minimiza la distancia total, la cual, a su vez, generará un elevado costo de instalación de contenedores.

IV. CASO DE ESTUDIO

En este estudio, se realiza una aplicación en la comuna de Renca en Santiago, Chile. Esta comuna con una población 147.151 habitantes y una superficie total de 24 km² genera diariamente un promedio de 1,3 kg de residuos domiciliarios por persona [18]. En particular, esta comuna tiene la meta de alcanzar un nivel de reciclaje de 45% al año 2034 del total de residuos sólidos domiciliarios [5]. Este escenario genera la necesidad de implementar soluciones innovadoras y accesibles que faciliten a los ciudadanos la disposición adecuada de sus desechos domésticos.

En este estudio, se seleccionaron tres de las unidades vecinales en Renca (“040”, “041” y “042”), con una población de 10.474 habitantes [19], representando un 7,5% de la población total. La Fig. 1 muestra las unidades vecinales seleccionadas para aplicar la metodología propuesta. Mediante la herramienta QGIS y los datos sobre la red vial de la comuna de Santiago, se identificaron las intersecciones que pertenecen a las unidades vecinales mencionadas, arrojando un total de 134 puntos (ver Fig. 2b), los cuales son considerados sitios potenciales para localizar contenedores. Adicionalmente, se definieron 75 microzonas de generadoras de residuos, para cada una de las cuales, se determinó un centroide representativo (ver Figura 2a).

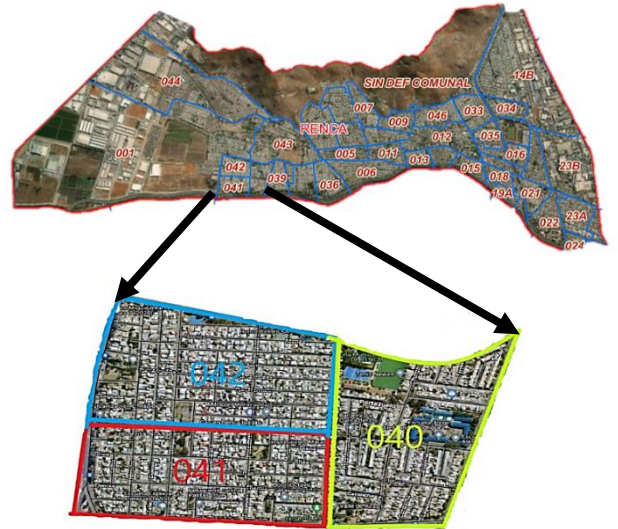


Fig. 1 Unidades vecinales utilizadas para el estudio

Posteriormente, se calculó la matriz de distancias D_{ij} entre los centroides j y las intersecciones candidatas i . La generación de residuos en cada centroide se calculó a partir de la población estimada para cada microzona y la tasa de generación de 1,3 kg/hab-día. Nótese que la población censal asociada a cada microzona se obtuvo del Censo 2017 [19]. A partir del estudio realizado por la Municipalidad de Renca [5], se observa que la tasa de generación de residuos reciclables corresponde al 29%, la cual se compone de papel y cartón (6%), plástico (16%), vidrio (4%) y metales (3%). Para efectos del modelo, se asume que todos residuos reciclables serán depositados en los contenedores. Cabe destacar que se consideró como supuesto una frecuencia de recolección de residuos dos veces por semana. Además, se asumió que cada contenedor tiene una capacidad de 1100 litros y un costo de \$233.980 pesos chilenos (USD \$235,9). Basados en la densidad específica de cada tipo de residuo, se calculó la capacidad en kilogramos de cada contenedor. El número mínimo y máximo de contenedores por ubicación potencial es 2 y 5, respectivamente. El número mínimo se establece para evitar que los usuarios depositen sus residuos fuera de los contenedores en el suelo cuando un contenedor esté lleno, mientras que el número máximo se relaciona con el espacio físico disponible en cada ubicación.

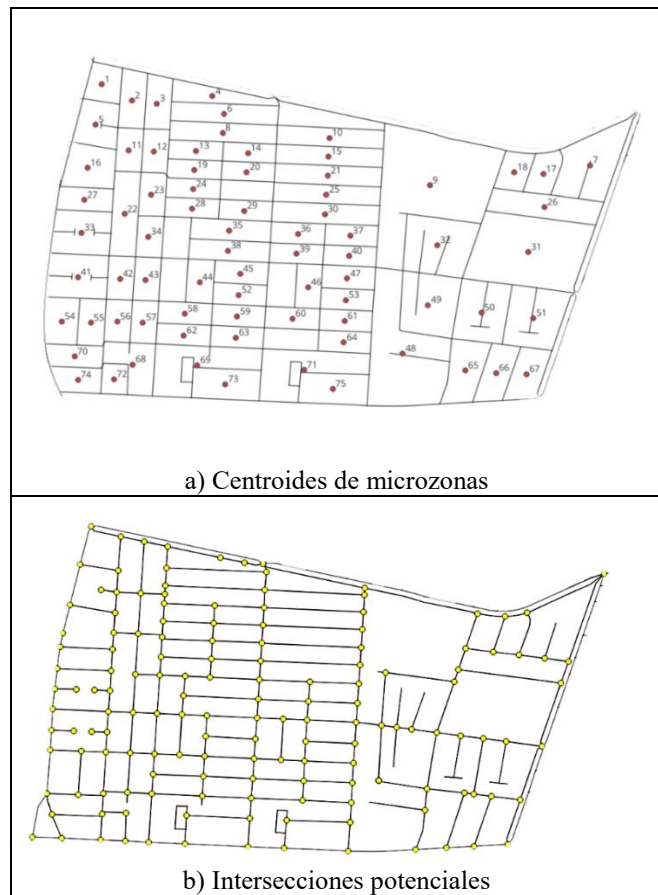


Fig. 2 Intersecciones y centroides dentro de las unidades vecinales estudiadas.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El modelo propuesto fue resuelto con el software Python-Gurobi considerado el caso descrito en la sección anterior, y considerando el conjunto de parámetros mostrados en la Tabla III. El modelo fue resuelto para cada combinación de los cinco valores de los tres parámetros indicados en la tabla, generándose 125 instancias en total.

TABLA III
NIVEL DE SENSIBILIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS UTILIZADOS POR EL MODELO

Parámetro	Nivel de sensibilización				
	1	2	3	4	5
Cantidad máxima de ubicaciones - Tmax	20	40	55	70	90
Cantidad máxima de contenedores - Kmax	45	95	145	195	245
Distancia máxima recorrida por los usuarios (m)	90	125	150	175	200

De las 125 soluciones obtenidas, se seleccionaron tres: i) la solución de mínima distancia total, ii) la solución de mínimo costo total y iii) una solución intermedia o balanceada entre i) y ii). Estas soluciones se resumen en la Tabla IV. Esta tabla indica que a medida que el número máximo de contenedores y el número máximo ubicaciones aumenta, se obtiene una menor distancia recorrida por los usuarios y, naturalmente, el costo total aumenta. No obstante, para una distancia recorrida levemente superior a la solución i), la solución iii) requiere un costo total significativamente menor que dicha solución (aproximadamente 30% menor). Estos resultados muestran que la solución es más balanceada que las soluciones i) y ii). Cabe mencionar que a futuro se requiere un análisis más profundo que incorpore técnica multi-objetivo y multi-criterio para poder seleccionar la solución a implementar por las autoridades.

Tabla IV
RESUMEN DE RESULTADOS PARA INSTANCIAS SELECCIONADAS

	Soluciones		
	i	ii	iii
Parámetros			
Número máximo ubicaciones	70	55	70
Número máximo contenedores	145	45	95
Distancia máxima a recorrer	200	150	175
Resultados			
Distancia total	2848	4044	2880
Distancia promedio	37,97	53,92	38,4
Costo total	\$29.949.440	\$10.529.100	\$21.994.120
Cantidad contenedores	128	45	94
cantidad ubicaciones	63	21	46



Fig. 3 Distribución espacial de contenedores para cada solución.

La Fig. 3 muestra la distribución espacial de las ubicaciones seleccionadas para cada una de las soluciones mencionadas en la Tabla IV. Claramente, se observa que la solución i) en la Fig. 3a) presenta la mayor cantidad de ubicaciones seleccionadas minimizando la distancia recorrida, mientras que la solución ii) en la Fig. 3b) presenta un número reducido de ubicaciones seleccionadas con un número costo total y mayor distancia recorrida. Finalmente, la solución iii) en la Fig. 3c) muestra que cantidad balanceada de ubicaciones seleccionadas con una baja distancia recorrida y un costo total intermedio entre las soluciones i) y ii).

VI. CONCLUSIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA

En esta investigación, se desarrolla un modelo de Programación Lineal Entera Mixta bi-objetivo enfocado en el diseño de un sistema de contenedores para recibir o acopiar los residuos reciclables generados en un área de estudio determinada. El modelo propuesto permite optimizar decisiones de selección de sitios para localizar contenedores, la cantidad de contenedores a instalar en cada una de las ubicaciones seleccionadas, y las zonas de demanda que serán atendidas por cada ubicación. Particularmente, las zonas de demanda son modeladas a través de un conjunto de centroides representativos. El modelo optimiza las decisiones descritas buscando minimizar los costos asociados a la compra e instalación de contenedores, y a su vez la distancia existente entre las zonas de demanda y las ubicaciones de contenedores asignadas a cada zona. Naturalmente, estos objetivos son de naturaleza conflictiva entre sí.

El modelo es aplicado preliminarmente a un área perteneciente a la comuna de Renca que abarca una población aproximada de 10,474 habitantes [19], donde se identificaron 75 centroides y 134 ubicaciones potenciales, y se consideraron distancias de tipo euclidiana. La aplicación permitió la obtención de un conjunto de soluciones Pareto eficientes, dada la naturaleza bi-objetivo del modelo. En particular, se seleccionaron tres soluciones: una que minimiza la distancia recorrida con un elevado número de contenedores; una que minimiza la inversión de contenedores con una elevada distancia entre zonas y ubicaciones de contenedores; y otra solución balanceada que presenta un razonable equilibrio entre la inversión en contenedores y la distancia recorrida por los usuarios.

Cabe destacar la relevancia de contar con un modelo como el desarrollado en esta investigación, debido a la posibilidad de obtener diferentes soluciones Pareto eficientes. Este conjunto de soluciones otorga al planificador la capacidad de controlar el nivel de servicio otorgado a la comunidad, medido a través de la distancia potencial recorrida por los usuarios, involucrando diferentes niveles de inversión asociados a la compra de contenedores.

A modo de investigación futura, se destaca la posibilidad de extender el modelo propuesto integrando o abordando otros aspectos de relevancia, tales como: i) la integración del proceso de ruteo para recolectar los residuos acopiados en los contenedores; ii) el análisis de la zonificación o el nivel de agregación de la demanda; iii) el enfoque de asignación de centroides a los diferentes ubicaciones; y iv) la posibilidad de desagregar los residuos previo a su acopio a través de la utilización de contenedores diferenciados por tipo de residuo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. Lama, "The world has a waste problem: Here's how to fix it," International Finance Corporation 2024 [Online] <https://www.ifc.org/en/blogs/2024/the-world-has-a-waste-problem>.
- [2] International Energy Agency, IEA, "Methane and climate change," 2022 [Online] <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022/methane-and-climate-change>.
- [3] R. Sala-Garrido, M. Mocholi-Arce, A. Maziotis, and M. Molinos-Senante, "Eco-efficiency approach in sustainable waste management: An uncertainty analysis for Chile," *Environ. Sci. Policy*, vol. 160, no. 103859, p. 103859, 2024.
- [4] International Trade Administration, "Chile Environmental Technologies," 2024 [Online] <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/chile-environmental-technologies>
- [5] Ilustre Municipalidad de Renca, "Estrategia comunal de gestión integral de residuos sólidos y economía circular al 2034," [Online] <https://lafabricaderenca.cl/wp-content/uploads/2024/03/Renca-Estrategia-Comunal-de-residuos-2034.pdf>
- [6] A. Gilardino, J. Rojas, H. Mattos, G. Larrea-Gallegos, and I. Vázquez-Rowe, "Combining operational research and Life Cycle Assessment to optimize municipal solid waste collection in a district in Lima (Peru)," *J. Clean. Prod.*, vol. 156, pp. 589–603, 2017.
- [7] A. Cavallin, D. G. Rossit, V. Herrán Symonds, D. A. Rossit, and M. Frutos, "Application of a methodology to design a municipal waste pre-collection network in real scenarios," *Waste Manag. Res.*, vol. 38, no. 1_suppl, pp. 117–129, 2020.
- [8] C. Letelier, C. Blazquez, and G. Paredes-Belmar, "Solving the bin location-allocation problem for household and recycle waste generated in the commune of Renca in Santiago, Chile," *Waste Manag. Res.*, vol. 40, no. 2, pp. 154–164, 2022.
- [9] D. Rossit and J. Bard, "Solving the waste bin location problem with uncertain waste generation rate: A bi-objective robust optimization approach," *Waste Manag. Res.*, 2024.
- [10] L. Tralhão, J. Coutinho-Rodrigues, and L. Alçada-Almeida, "A multiobjective modeling approach to locate multi-compartment containers for urban-sorted waste," *Waste Manag.*, vol. 30, no. 12, pp. 2418–2429, 2010.
- [11] B. Ratković, D. Popovic, G. Radivojevic, and N. Bjelic, "Planning logistics network for recyclables collection," *Yugosl. J. Oper. Res.*, vol. 24, no. 3, pp. 371–381, 2014.
- [12] A. Mirdar Harijani, S. Mansour, B. Karimi, and C.-G. Lee, "Multi-period sustainable and integrated recycling network for municipal solid waste – A case study in Tehran," *J. Clean. Prod.*, vol. 151, pp. 96–108, 2017.
- [13] V. Hemmelmayr, K. Smilowitz, and L. de la Torre, "A periodic location routing problem for collaborative recycling," *IIE Trans.*, vol. 49, no. 4, pp. 414–428, 2017.
- [14] S. Aka and G. Akyüz, "Fuzzy goal programming approach on location-routing model for waste containers," *Int. J. Ind. Syst. Eng.*, vol. 29, no. 4, p. 413, 2018.
- [15] V. Nevrlý, R. Šomplák, V. Smejkalová, T. Lipovský, and J. Jadrný, "Location of municipal waste containers: Trade-off between criteria," *J. Clean. Prod.*, vol. 278, no. 123445, p. 123445, 2021.
- [16] N. F. H. Jamiron, N. A. S. Sarif, N. S. A. Rahman, and Z. A. Zaharudin, "Establishing recycling bins location and allocation for sustainable urban municipalities of Johor Bahru in Malaysia," *Int. J. Acad. Res. Econ. Manag. Sci.*, vol. 10, no. 3, 2021.
- [17] O. Hashemi-Amiri, R. Ji, and K. Tian, "An integrated location-scheduling-routing framework for a smart municipal solid waste system," *Sustainability*, vol. 15, no. 10, p. 7774, 2023.
- [18] L. Scurto y M. J. Silva. De cuidado, "Comuna de Renca: Mapeo y recomendaciones para la implementación de soluciones de cuidado," Cepal.org. [Online]. Available: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/fc5f6057-08bb-4fb6-8460-3fc2789508a3>. [Accessed: 23-Jan-2025].
- [19] Instituto Nacional de Estadística, "Censo de Población y Vivienda," 2017. [Online]. Available: <https://www.inec.cl/estadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda>