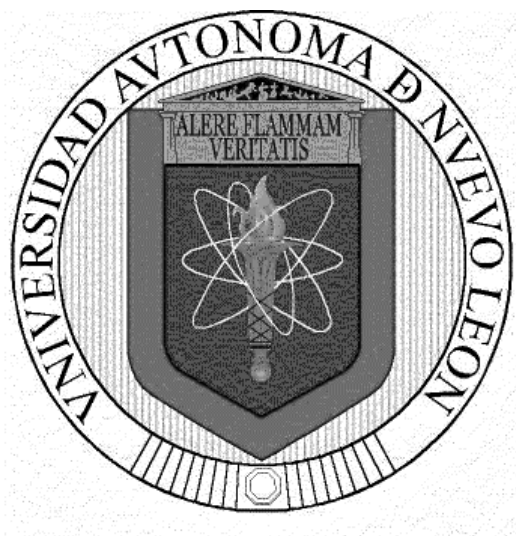


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



**Optimización global del sistema de recolección de residuos
sólidos urbanos para el trazado de rutas robustas en el Área
Metropolitana de Monterrey**

Por

Reyes Benitez Bravo

Como requisito parcial para obtener el Grado de DOCTOR EN
CIENCIAS con orientación en procesos sustentables

Monterrey, Nuevo León, 2021

RESUMEN

Reyes Benitez Bravo

Fecha de graduación Agosto, 2021

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ciencias Químicas

Título del Estudio: **Optimización global del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos para el trazado de rutas robustas en el Área Metropolitana de Monterrey**

Número de páginas: 92

Propósito y método de estudio: Este trabajo propone una estrategia para diseñar macro rutas y micro rutas de recolección de RSU eficientes, reduciendo costos e impactos ambientales. El trazado de macro rutas implemento el algoritmo de agrupamiento SKATER considerando el nivel de marginación y número de población para estimar la generación de RSU. Se desarrolló un modelo de optimización multicriterio para las micro rutas minimizando tres costos: mantenimiento, consumo de combustible y seguridad laboral. Los datos de tráfico, distancia, altitud, sentido vial, población y nivel de marginación fueron obtenidos de sistemas de información geográficos (SIG). El modelo de micro ruteo se resolvió a través de algoritmos genéticos, tomando como base una ruta del Área Metropolitana de Monterrey (AMM) en diferentes periodos del día considerando tres horarios: matutino, vespertino y nocturno. Los resultados del modelo de micro ruteo fueron analizados a través del análisis de ciclo de vida (ACV) y utilizados dentro del proceso de jerarquización analítica para seleccionar el mejor horario de recolección. Para evaluar el trazado de macro rutas se implementó un análisis económico considerando el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR).

Contribución y conclusiones: La ruta matutina mostró el mejor desempeño económico reduciendo 15 % de los costos, mientras que la ruta nocturna es la mejor opción ambiental al reducir 12 % los gases de efecto invernadero. La ruta matutina demostró que aun siendo la ruta con menor distancia no presentó el menor impacto ambiental. Mostrando al tráfico como un factor decisivo para el diseño de rutas de recolección. Los resultados del VPN y TIR indican que aún con una inversión privada mínima, un proyecto de recolección puede ser viable. Los resultados que aporta este estudio pueden ser utilizados como base para crear nuevos fondos de financiamiento por parte del gobierno mexicano para fomentar la participación de inversionistas privados dentro de la recolección de RSU.

FIRMA DEL ASESOR



Dr. Ricardo Gómez González

AGRADECIMIENTOS

El obtener mi grado de doctorado es algo que no podría haber sido posible sin la ayuda de mucha gente que estuvo a mi lado impulsándome y que me gustaría agradecerle por su apoyo.

Gracias a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León y a CONACyT por los apoyos otorgados, indispensables para construir este logro.

Gracias a mi asesor de tesis, el Dr. Ricardo Gómez González y a mi co-asesor de tesis el Dr. Pasiano Rivas García por su apoyo incondicional y grandes enseñanzas. Gracias por su paciencia y por confiar en mí.

También quiero agradecer a los miembros del comité, Dra. Azucena M. García León, Dr. José Enrique Botello Álvarez y Dr. José Rosario Guadalupe Sánchez López por su apoyo y sus consejos que me ayudaron a mejorar como estudiante y persona.

A mi familia, el Lic. Andrés Benitez, Sra. Ana Luis Bravo y a la Dra. Lenny Michelle Benitez que siempre han sido el motor de todos mis logros y que nunca dejarán de estar en mi mente. Gracias por su cariño y aliento, Papa, Mama y Hermana los amo.

A todos mis compañeros y amigos que estuvieron y están cerca de mi apoyándome en este increíble viaje y que me enseñaron que la amistad no distingue fronteras y a Red Ambiental que sin su apoyo esto no sería posible.

En especial a Dios, gracias por tantas bendiciones.

A todos los que estuvieron junto a mí, muchas gracias

Tabla de contenido

1	Introducción	7
1.1	Recolección y su importancia en la gestión de residuos sólidos urbanos.	7
1.2	Diseño de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos.....	8
1.3	Optimización de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos	9
1.4	Evaluación económica y ambiental de las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos.....	12
2	Hipótesis.....	15
3	Objetivo general	16
3.1	Objetivos específicos.....	16
4	Área de oportunidad y aportación científica.....	17
5	Metodología.....	18
5.1	Análisis estadístico del sistema actual de recolección.	18
5.1.1	Eficiencias del sistema de recolección	20
5.2	Modelación y optimización de rutas de recolección de residuos.	21
5.2.1	Generación de macro rutas.....	24
5.2.2	Trazado de micro rutas.....	27
5.3	Evaluación y selección de rutas de recolección de residuos.....	31
5.3.1	Análisis de ciclo de vida.....	32
5.3.2	Proceso de jerarquización analítica	37
5.3.3	Análisis económico	41
6	Resultados	45
6.1	Análisis estadístico del sistema de recolección de residuos sólidos actuales..	45
6.2	Generación de micro rutas y macro rutas de recolección de residuos	48
6.2.1	Optimización de micro rutas de recolección	48
6.2.2	Generación de macro rutas de recolección	57
6.3	Evaluación de micro rutas y macro rutas optimizadas	64
6.3.1	Evaluación ambiental de micro rutas	64
6.3.2	Proceso de Jerarquización analítica.....	69
6.3.3	Análisis económico	74
7	Conclusiones	83
8	Referencias	84

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema general de la metodología.	18
Figura 2. Ubicación geográfica del Área Metropolitana de Monterrey, relleno sanitario (triángulo rojo) y estación de transferencia (triángulo negro).....	20
Figura 3. Desarrollo del método SKATER para trazar el número de zonas de recolección..	26
Figura 4. Diagrama de flujo de un algoritmo genérico y diagrama de fronteras para la cuantificación de impactos ambientales.....	31
Figura 5. Límites del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos en el Área Metropolitana de Monterrey.	33
Figura 6. Matriz de ponderación para comparación por pares.....	40
Figura 7. Análisis estadístico de los municipios que conforman el Área Metropolitana de Monterrey con respecto a (A) la eficiencia por distancia, IDe, (B) eficiencia por tiempo, ITe, y (C) eficiencia por consumo de diésel, IFe.	46
Figura 8. Micro ruta de recolección de San Pedro seleccionada y matrices de información para optimización	50
Figura 9. Resultados de optimización para costo, distancia y tiempo para diferentes turnos de recolección.....	53
Figura 10. Comportamiento de la velocidad y el consumo de combustible en diferentes momentos del día.....	55
Figura 11. Capas geoestadísticas del municipio de San Pedro Garza García por manzana indicando grado de marginación (A) y número de habitantes (B).	59
Figura 12. Generación de residuos sólidos urbanos por manzana (A) y división de macro rutas para el municipio de San Pedro (B).	62
Figura 13. Número de macro ruta necesarios en el municipio de San Pedro.....	63
Figura 14. Análisis de impacto ambiental para la micro ruta actual y las micro rutas optimizadas.	65
Figura 15. Resultados del proceso de jerarquización analítica para los tres escenarios	71
Figura 16. Relación entre población, tasa de pobreza y generación de CO2 per cápita para países latinoamericanos durante el 2017.	73
Figura 17. Recuperación de inversión dentro del tiempo de vida del proyecto.....	76
Figura 18. Crecimiento de micro rutas para los municipios de San Pedro y Santa Catarina.	77

Figura 19. Relación entre generación de residuos sólidos urbanos, costos y cobertura por recolección para países de la región de América Latina y el Caribe.	79
Figura 20. Flujo de rendimiento para un proyecto de recolección dependiendo del porcentaje de capital.....	82

Lista de Tablas

Tabla 1. Modelado matemático para el trazado de micro rutas.....	10
Tabla 2. Notación del modelo matemático.....	22
Tabla 3. Insumos de limpieza y mantenimiento para vehículos recolectores (VR) de RSU.	34
Tabla 4. Caracterización de insumos de mantenimiento y limpieza.....	35
Tabla 5. Definición de criterios y subcriterios para el análisis jerárquico propuesto.	38
Tabla 6. Clasificación de delitos por indicador y ponderación dentro del índice de paz.	39
Tabla 7. Escala de comparación de criterios.	40
Tabla 8. Parámetros utilizados para la evaluación económica de los sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos en el 2019.....	43
Tabla 9. Datos estadísticos de los municipios del Área Metropolitana de Monterrey para cada eficiencia de recolección.....	47
Tabla 10. Estadísticas de accidentes viales y riesgo laboral para la ruta de recolección actual en SP.	51
Tabla 11. Resultados de optimización para sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos.....	56
Tabla 12. Generación de residuos sólidos urbanos per-carpita por grado de marginación para el Área Metropolitana de Monterrey.....	60
Tabla 13. Datos cuantitativos para los impactos ambientales.....	68
Tabla 14. Resultados por criterio para evaluación del Proceso de Jerarquización Analítica.....	69
Tabla 15. Análisis del valor presente neto del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos en el municipio de San Pedro.....	74
Tabla 16. Sistemas de recaudación en diferentes países para los sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos.	80

1 Introducción

En este capítulo se presenta una descripción de los sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos (RSU); su problemática y lugar dentro de la gestión de RSU; los aspectos más importantes dentro del diseño de rutas de recolección; la optimización como una alternativa para los problemas en los sistemas de ruteo; y las evaluaciones económicas y ambientales utilizadas para analizar las rutas de recolección de RSU.

1.1 Recolección y su importancia en la gestión de residuos sólidos urbanos.

Las ciudades son responsables de la gestión de sus RSU, incluyendo recolección, transporte, procesamiento y disposición final (Lethbridge, 2017). En 2018, se estimó una generación anual de 2.1 millones t en el mundo (Banco Mundial, 2018). Debido al incremento de la población, el auge de la economía, la rápida urbanización y el aumento del nivel de vida, se espera una generación de RSU de 3.4 millones t para el 2050 (Banco Mundial, 2018).

Para países en desarrollo, la recolección de RSU requiere de una gran cantidad de capital, representando entre el 70% y el 90% del costo total de la gestión (Imam *et al.*, 2008; Sharholy and Ahmad, 2008; Di Maria y Micalè, 2015). Los altos costos de recolección se atribuyen a aspectos como: gastos por mantenimiento a equipos, mano de obra y consumo de combustible (Jacobsen *et al.*, 2013). Las ciudades tienen el desafío de proporcionar un servicio eficiente para sus habitantes, evaluando la relación costo-eficiencia. No obstante, las ciudades enfrentan

problemas para superar este desafío, principalmente por la falta de organización y recursos financieros (Burnley, 2007; Sujauddin, 2008).

Latinoamérica ha seguido un proceso de urbanización continua que la ha llevado a tener 80% de su población viviendo en zonas urbanas (ONU, 2015), generando 440,000 t de RSU al día (CEPAL, 2018). Sólo 10% de sus residuos se reciclan y cerca del 11 % de su población carece de servicio de recolección (Banco Mundial, 2018). Las restricciones económicas limitan la efectividad del servicio de recolección, convirtiéndolo en una tarea complicada (ONU-Habitat, 2012). Adicionalmente, la sustentabilidad a largo plazo en el manejo de RSU dependerá de modelos de gestión que migren hacia reducir, reutilizar y reciclar; requiriendo de sistemas de recolección más complejos que requieran un mayor grado de recursos técnicos y económicos (Peinado-Vara, 2016; Lethbridge, 2017).

1.2 Diseño de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos

La Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL, 1997) define los métodos de recolección, como el conjunto de procedimientos y actividades que se llevan a cabo para recoger o transferir los RSU generados en una fuente particular a un sitio de disposición final. Los métodos de recolección se pueden clasificar de la siguiente manera:

- De esquina o paradas fijas: Los Vehículos Recolectores (VR) realizarán paradas en puntos de recolección específicos (normalmente las esquinas de las cuadras), para que en estos puntos los usuarios acudan a entregar sus residuos.

- De recolección de acera: El usuario deja sus residuos en la acera de su casa convirtiéndolo en un punto de recolección para los VR. El recorrido es lento, para que el personal de recolección tenga tiempo de recoger los residuos y descargarlos en el VR.
- De recolección de contenedores: Similar al método de esquina, los VR realizaran paradas en puntos de recolección específicos donde se instalan contenedores metálicos de gran capacidad volumétrica, a fin de que los habitantes depositen sus residuos dentro de ellas. Este método es utilizado en centros de mayor generación de RSU, como edificios multifamiliares, comercios y escuelas.

La selección de uno de estos métodos determinará el diseño de las rutas de recolección. Un diseño eficiente debe tener en cuenta las condiciones de las calles, la densidad del tráfico, las características del VR (mantenimiento, capacidad y consumo de combustible) y las distancias de transporte (Imam *et al.*, 2008). Todos los diseños se dividen en dos etapas, macro ruteo y micro ruteo. El macro ruteo es la asignación de VR a áreas de la ciudad para realizar la recolección, y el micro ruteo es el recorrido específico que deben cumplir un VR dentro de las áreas donde han sido asignados. La complejidad del diseño de rutas radica en la variabilidad del sistema debido a los problemas de urbanización antes mencionados.

1.3 Optimización de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos

En la literatura se encuentran diferentes estrategias para modelar y optimizar las micro rutas de los sistemas de recolección. El objetivo de la optimización es determinar la mejor secuencia de

recorrido para el VR, dividiendo la zona de recolección en segmentos utilizando los puntos de recolección para minimizar distancia, tiempo, costo o consumo de combustible (Polimeni y Vitetta, 2012). La Tabla 1 muestra las opciones de modelado matemático más utilizadas en los sistemas de recolección de RSU.

Tabla 1. Modelado matemático para el trazado de micro rutas

Función objetivo	Problema	Referencia
Distancia	<i>Travelling salesman (TSP)</i>	Arias (2011)
	<i>Chinese postman (CPP)</i>	Arias (2011)
	<i>Vehicle routing (VRP)</i>	Robuste y Galvan (2006)
Costo con ventanas de tiempo	<i>Time dependent shortest path (TDSPP)</i>	Polimeni y Vitetta (2012)
	<i>Time dependent vehicle routing (TDVRP)</i>	(2012)
Consumo de combustible	<i>Capacitated vehicle routing (CVRP)</i>	Xiao <i>et al.</i> (2011)
	<i>Fuel consumption vehicle routing (FCVRP)</i>	

Das y Bhattacharyya (2015) en India utilizaron el modelo TSP para reducir 30 % la distancia recorrida en las rutas. En Jordania, Alshraideh y Abu (2016) utilizaron modelos CPP, logrando ahorros de 102 km por semana. Son *et al.* (2016 y 2018) utilizaron modelos VRP en el sistema de recolección de Vietnam logrando reducir las distancias de sus rutas en 17% y 30 %, respectivamente. Estos modelos son los más utilizados dentro de literatura para buscar la ruta más corta sin afectar los puntos de recolección. Aunque se han utilizado diferentes modelos,

todos incluyeron las capacidades de carga de los VR, considerando este como un factor esencial para lograr reducir las distancias de recolección.

Bing *et al.* (2015) en Holanda y Laureri *et al.* (2016) en Italia incluyeron la frecuencia y velocidad de recolección como factor de tiempo dentro de modelos TDSPP, logrando reducir los costos de recolección en un 7 % y 40 %, respectivamente. La reducción del consumo de combustible es otra estrategia para lograr reducir los costos de recolección. En el 2017, Akhtar *et al.*, redujeron hasta un 50 % los costos para la recolección de contenedores considerando como uno de sus factores el consumo de combustible, no obstante, reducir el combustible requiere de modelos que consideren diferentes aspectos. Xiao *et al.* (2011) en China utilizaron un modelo FCVRP para reducir 5% el consumo de combustible, identificando como factor principal la pendiente de las calles. En España, Comendador *et al.*, (2012) establecieron un indicador de eficiencia de consumo de combustible utilizando la relación entre el tiempo de conducción en las rutas y el tráfico de la ciudad.

Por otra parte, en el diseño de las macro rutas, Márquez Pérez (2008) mencionó algunos aspectos para su diseño. Requiere formar áreas lo más homogéneas posibles considerando la generación de RSU y las condiciones geográficas o urbanas. Además, cada área debe asegurar la mayor eficiencia de carga cubriendo la mayor cantidad de domicilios. Es importante mencionar que no existe un algoritmo específico de macro ruteo que divida la ciudad en un número determinado de áreas iguales considerando la cantidad de RSU necesarios para llenar un VR.

Dentro de la gestión de RSU, Arribas *et al.* (2010) utilizaron la metodología cluster tomando como atributo la generación de RSU de la ciudad de Santiago en Chile e identificaron las áreas con mayor generación de RSU para instalar nuevas estaciones de transferencia, reduciendo los costos del sistema hasta un 50 %. En el 2011, Passarini *et al.* analizaron municipios del norte de Italia para identificar áreas con mayor potencial para recolección selectiva, obteniendo mapas de generación de RSU mediante el análisis cluster, considerando la población y su generación de residuos.

La literatura en Latinoamérica para optimizar macro rutas y micro rutas es limitada. Gilardino *et al.* (2017) utilizaron la metodología cluster para reducir el número de contenedores de una ciudad peruana, calculando la generación de RSU en una determinada zona e implementaron un modelo VRP para el trazado de micro rutas, reduciendo 40% sus distancias. No obstante, este método de recolección no refleja la realidad latina, siendo el método por acera el más utilizado (Banco Mundial, 2018). Los modelos para describir la recolección por acera requieren información detallada de las calles para obtener resultados fiables (Sulemana *et al.*, 2018). Dugdhe *et al.* (2016) afirmaron que los sistemas de información geográfica (SIG) son una herramienta que puede ayudar a recopilar datos reales de las vialidades de una ciudad. Además, esta tecnología ampliaría la recopilación de datos a nivel municipal ayudando a respaldar futuros planes de gestión sostenible, en especial para Latinoamérica donde una de sus características es la falta de datos técnicos, económicos y ambientales (Lethbridge, 2017, BID-Mapping, 2020).

1.4 Evaluación económica y ambiental de las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos

Las cargas ambientales asociadas a la producción y uso de combustibles fósiles están relacionadas con la distancia de la ruta y el tiempo de recolección (Larsen *et al.*, 2010). Una herramienta para evaluar los impactos ambientales del sistema de recolección de RSU es el análisis de ciclo de vida (ACV).

Iriarte *et al.* (2009) en España, utilizaron el ACV para evaluar dos métodos de recolección, el método por acera y una recolección neumática que utiliza tubos de succión para transportar los residuos hasta un contenedor. La recolección neumática aumentó los impactos ambientales en un 40% en comparación con el método de acera debido a la demanda de electricidad. No obstante, Laso *et al.* (2019) demostraron que, incluso con el consumo de electricidad de la recolección neumática, los impactos ambientales podrían reducirse, si se considera un sistema de reciclaje. Taskin y Demir (2020) analizaron el uso de estaciones de transferencia para una ciudad de Turquía, reduciendo 45% de los gases de efecto invernadero (GEI) en sus rutas al instalar nuevas estaciones de transferencia.

El ACV requiere un inventario del ciclo de vida (ICV) con datos realistas y específicos de las entradas, como el consumo de combustible, el mantenimiento y los suministros de limpieza, y las salidas como las emisiones de la carga ambiental (Haya, 2016). Generar un ICV de los sistemas de recolección es una tarea compleja, ya que los datos son limitados o no están disponibles. En la literatura, varios estudios utilizan datos de inventario que no son necesariamente realistas. Di Maria y Micale (2014 y 2015) utilizaron inventarios de VR alemanes para desarrollar una evaluación ambiental de una ciudad italiana. Erses Yay (2015) utilizó inventarios de transporte de RSU suizos para evaluar un sistema de recolección turco. En Europa, las nuevas

investigaciones buscan migrar hacia el uso de inventarios realistas. Laso *et al.* (2019) en España y Taskin y Demir (2020) en Turquía utilizaron datos reales de sistemas locales de recolección de RSU para evaluar sus impactos ambientales.

América Latina carece de información actualizada, lo que limita una evaluación realista de los impactos ambientales de los sistemas de recolección de RSU. Gilardino *et al.* (2017) utilizaron inventarios suizos para evaluar el mantenimiento de los VR en una ciudad de Perú. Aldana-Espitia *et al.* (2017) y Botello-Álvarez *et al.* (2018) utilizaron inventarios genéricos para calcular los impactos ambientales de la operación de VR para ciudades mexicanas.

Por otra parte, el desempeño económico de los sistemas de recolección en literatura es limitado y puede dividirse en dos enfoques. El primero muestra los costos por recolección en diferentes escenarios considerando el número de población a la cual se da servicio (Emery *et al.*, 2007; Boskovic *et al.*, 2016; Rigamonti *et al.*, 2016). El segundo enfoque compara los costos por recolección entre servicios públicos y privados, en todos los casos los servicios privados son menos costosos, esto se debe a la inversión de mejores equipos de recolección y trazado de rutas (Aragon, 2003; Bel and Mur, 2009; Jacobsen *et al.*, 2013). Dentro de las evaluaciones económicas, el análisis del valor presente neto (VPN) es uno de los indicadores económicos más utilizados como criterio de evaluación y selección de proyectos (Zúñiga-González, 2012), pese a ello, no se han encontrado evaluaciones financieras para sistemas de recolección de RSU que utilicen el VPN como indicador.

2 Hipótesis

La inclusión de factores, tales como topografía y tráfico, en la optimización del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos generará rutas robustas que satisfacen criterios técnicos, económicos y ambientales.

3 Objetivo general

Desarrollar una estrategia para el trazado de rutas que considere los factores que influyen en mayor medida al sistema de recolección de RSU en zonas con alto crecimiento urbano, tomando como caso de estudio el Área Metropolitana de Monterrey (AMM).

3.1 Objetivos específicos

- Analizar la eficiencia del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos actual.
- Desarrollar un modelo para la generación de macro rutas que considere factores, tales como nivel de marginación y generación de RSU.
- Desarrollar un modelo para el trazado de micro rutas que considere factores, tales como topografía y tráfico.
- Optimizar las macro rutas y micro rutas del sistema de recolección a partir de restricciones técnicas, económicas y ambientales.
- Evaluar los resultados de la optimización mediante evaluaciones económicas y ambientales, para seleccionar el mejor escenario de recolección utilizando criterios de jerarquización.

4 Área de oportunidad y aportación científica

En literatura no existe un estudio logístico, económico y ambiental para el trazado de rutas de recolección de RSU en México. Por consiguiente, la aportación científica de este proyecto es generar conocimiento en las condiciones de operación, mantenimiento y selección de rutas, desde una perspectiva sostenible.

La estrategia logística permitirá generar nuevas macro rutas y micro rutas que ayuden a reducir los costos e impactos ambientales, aumentando la eficiencia de recolección. El diseño logístico tomará factores sociales, técnicos y económicos, fundamentados en un estudio de los procesos de optimización para el diseño de rutas de recolección de RSU.

El estudio económico permitirá evaluar todos los flujos financieros involucrados en el proceso de recolección, aportando información que promueva la inversión pública y privada. Adicionalmente, se generará un inventario de insumos y emisiones específicos para la recolección de RSU en un escenario mexicano utilizando la metodología de ACV.

Este estudio implementará el proceso de análisis jerárquico como un sustento en la toma de decisiones utilizando criterios económicos, ambientales y sociales. Se utilizará como caso de estudio el sistema de rutas de recolección de RSU del Área Metropolitana de Monterrey (AMM), la cual es la tercera área metropolitana más grande en México y una de las más importantes en Latinoamérica. Este estudio ofrecerá una alternativa de solución integral al problema de trazado

de rutas en ciudades con rápido crecimiento, susceptible de ser replicado (bajo ciertas consideraciones) en otras ciudades latinoamericanas.

5 Metodología

En la Figura 1 se presenta gráficamente la metodología del proyecto, la cual se divide en tres secciones. La sección 5.1 describe y mide la eficiencia del sistema actual de recolección de RSU para seleccionar los casos de estudio, la sección 5.2 presenta el modelado matemático para optimizar las macro rutas y micro rutas del caso de estudio seleccionado, y la sección 5.3 evalúa los resultados de la sección anterior y selecciona la mejor opción utilizando criterios de sustentabilidad.

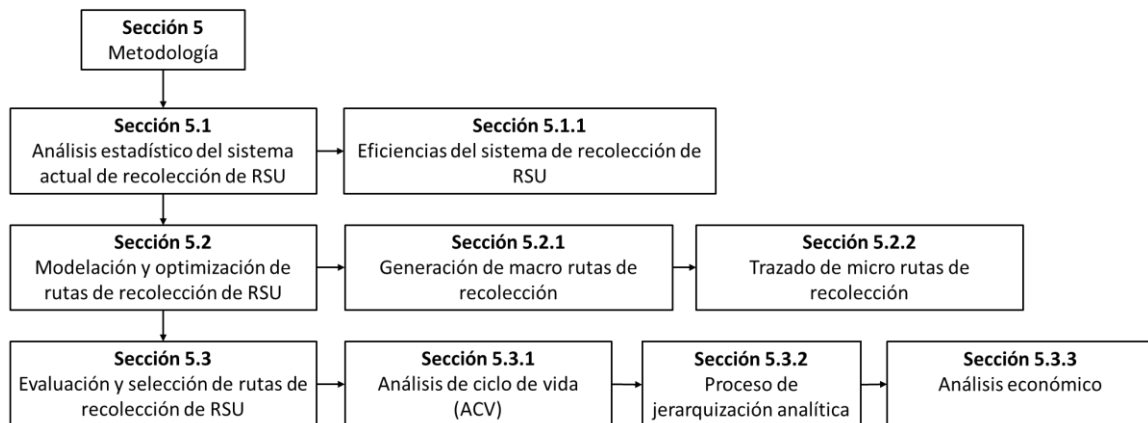


Figura 1. Esquema general de la metodología.

5.1 Análisis estadístico del sistema actual de recolección

El AMM es la capital del estado de Nuevo León, ubicado en el noreste de México (Figura 2). La ciudad tiene una generación per cápita de RSU de $1 \text{ kg hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$, una generación total de $4,700 \text{ t de RSU día}^{-1}$, y una cobertura de recolección de RSU del 95 % del área urbana (el 5 % restante corresponde a la participación de recicladores y asentamientos humanos informales (SIMEPRODE, 2015)). El AMM se conforma de nueve municipios, que se clasifican en internos y externos. Se llaman internos a los municipios que han alcanzado su máxima expansión a causa de la rápida urbanización y la geografía de la zona, como es el caso de Monterrey, San Pedro Garza García, San Nicolás y Guadalupe. Los municipios externos son Santa Catarina, Gral. Escobedo, Apodaca, Juárez y Santiago, ya que tienen un rápido crecimiento poblacional y urbano.

El gobierno municipal concesiona el servicio de recolección de RSU a empresas privadas encargadas de toda la operación (San Pedro, 2014). El método de acera se implementa tres veces por semana a través de VR de carga trasera. En el AMM, después de la recolección de los residuos, los VR pueden ir directamente al relleno sanitario (RS) o a una estación de transferencia (ET), donde transfieren los RSU a camiones con mayor capacidad de carga para transportarlos al relleno sanitario (sólo dos municipios utilizan la estación de transferencia: San Pedro Garza García y Santa Catarina). La Figura 2 muestra la ubicación del RS (triángulo rojo) y la ET (triángulo negro).

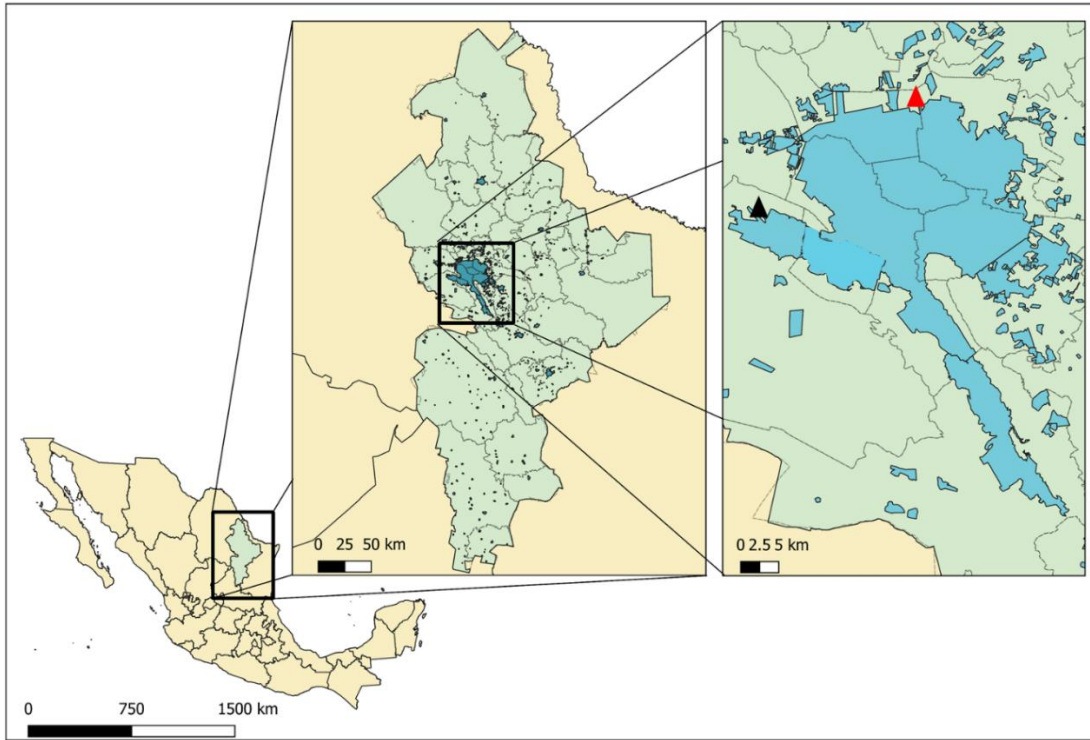


Figura 2. Ubicación geográfica del Área Metropolitana de Monterrey, relleno sanitario (triángulo rojo) y estación de transferencia (triángulo negro).

5.1.1 Eficiencias del sistema de recolección

El objetivo en esta sección es analizar los patrones estadísticos de eficiencia en los sistemas de recolección de los diferentes municipios del AMM, para identificar cual sistema presenta la menor eficiencia y seleccionarlo como caso de estudio. Teixeira *et al.* (2014) identifican tres indicadores clave: la distancia recorrida en la ruta del VR por tonelada recolectada (Ecuación 1), el tiempo requerido del VR por tonelada recolectada (Ecuación 2) y el consumo de combustible del VR por tonelada recolectada (Ecuación 3).

$$IDe = \frac{De}{MSWc} \quad (1)$$

$$ITe = \frac{Te}{MSWc} \quad (2)$$

$$IFe = \frac{Fe}{MSWc} \quad (3)$$

Donde IDe es la eficiencia por distancia, ITe es la eficiencia por tiempo, IFe es la eficiencia por consumo de combustible, De es la distancia recorrida por el VR, Te es el tiempo consumido por el VR, Fe es el consumo de combustible del VR y MSWc son las toneladas de RSU recolectadas.

Par calcular los tres indicadores de eficiencia, tomamos una muestra conformada por todas las rutas de recolección de cada municipio, recopilando datos de una semana de cada mes del año 2017. Los resultados de cada municipio fueron resumidos mediante estadística descriptiva utilizando gráficos de caja y bigote. La selección del municipio con mayor deficiencia en su sistema de recolección debe considerar dispersión en sus datos a través de sus coeficientes de variación, obtenidos a partir de la media y desviación estándar de los tres indicadores para cada municipio.

5.2 Modelación y optimización de rutas de recolección de residuos

Se utilizó un modelo matemático para micro ruteo que busca reducir los costos de operación de los VR y se propone un análisis cluster para generar macro rutas considerando las capacidades de carga de los VR. Toda la notación necesaria para describir ambos modelos matemáticos se resume en la Tabla 2.

El método de algoritmo genético (AG) se utilizó para solucionar el problema de micro ruteo y el método SKATER (análisis espacial Kluster por eliminación de borde de árbol) para solucionar el problema de macro ruteo. Ambos utilizaron el software Rstudio, el cual puede ser enlazado a aplicaciones SIG como Google earth, Google maps y Mapa Digital del INEGI para obtener la información de entrada como distancia, tráfico, altitud, población y grados de marginación.

Tabla 2. Notación del modelo matemático.

Tipo	Símbolo	Descripción (unidad)
Conjuntos		
	j	Grados de marginación de la población de acuerdo con su nivel de carencias (educación, vivienda e ingresos) donde, 1: muy bajo; 2: bajo; 3: medio; 4: alto y 5: muy alto.
	i	Manzana de una ciudad
	n	Total de manzanas de una ciudad
Variables		
<i>Trazado de micro rutas</i>		
	FC	Costo del consumo de diésel en un segmento (USD km ⁻¹)

MC	Costos del mantenimiento total en un segmento (USD km ⁻¹)
RC	Costo del riesgo de trabajar en un segmento (USD km ⁻¹)
D	Distancia en un segmento (km)
mC	Costo por mantenimiento preventivo-reparación en un segmento (USD km ⁻¹)
wC	Costo por cambio de neumáticos en un segmento (USD km ⁻¹)
(Dc)	Consumo de diésel en un segmento (g km ⁻¹)
LF	Factor de ajuste por carga del vehículo
GrF	Factor de ajuste por inclinación en un segmento
Dcos	Costo promedio de diésel (USD g ⁻¹)
V	Velocidad del VR en un segmento (km h ⁻¹)
LP	Capacidad máxima de recolección promedio
x	Angulo de inclinación en un segmento
(Sc)	Salario del trabajador reportado ante el IMSS en un segmento (USD km ⁻¹)
Pr	Prima de riesgo del trabajador asociado a un segmento
l	Tasa de incapacidades totales durante un año
D	Defunciones presentadas durante un año
N	Días trabajables de todos los trabajadores del municipio durante un año

Generación de macro rutas

k _{RSUj}	Generación de RSU per cápita por grado de marginación j (kg hab ⁻¹ d ⁻¹)
-------------------	---

P_{ij}	Población que vive en una manzana i con un grado de marginación j
g_i	Generación de RSU en una manzana de la ciudad (kg)
G_T	Generación de RSU total de una ciudad (kg)
Z_{RSU}	Número de zonas de recolección
ER_{VR}	Capacidad de recolección de los vehículos (t)
F_{VR}	Frecuencia de recolección semanal
dg	Diferencia de RSU entre dos manzanas (kg)

5.2.1 Generación de macro rutas

Mapas de generación de RSU

Para establecer mapas de generación de RSU, es necesario identificar geográficamente el número de habitantes y su generación de RSU. Se utilizó una herramienta SIG llamada álgebra de mapas (Mas 2013), la cual combina diferentes tipos de datos con ubicaciones geográficas para obtener mapas alternativos de información. La ecuación 4 se utilizó para calcular la cantidad de RSU que se genera en una manzana de una ciudad utilizando dos tipos de datos, población por grado de marginación obtenida del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y generación de RSU por grado de marginación obtenida de una empresa local de recolección.

$$g = \sum_{j=1}^5 P_j \times kRSU_j \quad (4)$$

División de macro rutas

La ecuación 5 se utilizó para calcular el número de macro rutas que requiere una ciudad para brindar el servicio de recolección. Esta ecuación es una modificación de la metodología propuesta por la Secretaria de Desarrollo Social en México (SEDESOL, 1997) y utiliza la frecuencia de recolección, capacidad de carga y la generación total de RSU de una ciudad (Ecuación 6).

$$Z_{RSU} = \frac{G_T \times F_{VR}}{ER_{VR}} \quad (5)$$

$$G_T = \sum_{i=1}^n g_i \quad (6)$$

El análisis cluster parte de una lista de atributos y trata de situarlos en grupos homogéneos a partir de criterios definidos (Fuente, 2011). La información considerada similar será asignada a un mismo cluster, mientras que datos diferentes se localizaran en clusters distintos (Wu *et al.*, 2018). Para dividir geográficamente la ciudad en macro rutas, se empleó la metodología cluster propuesta por Assunção *et al.* (2006), donde se utiliza el algoritmo SKATER, este agrupa objetos geográficos en regiones contiguas homogéneas. En este trabajo los objetos geográficos son las manzanas de la ciudad con los datos de generación de RSU calculados con la Ecuación 4.

La Figura 3 muestra el desarrollo de la metodología SKATER. Cada manzana que conforma la ciudad se relaciona con las manzanas vecinas mediante líneas como se muestra en la Figura 3A,

las líneas representan la diferencia de generación RSU calculada con la Ecuación 7. Esta relación entre cuadras se conoce como gráfico de conectividad (GC) (Figura 3B). El GC se simplifica conectando a cada manzana con sólo un vecino, seleccionando la línea con el valor más pequeño (Figura 3C). Este arreglo se conoce como árbol de expansión mínima (MST).

$$d_g = (g_1 - g_2)^2 \quad (7)$$

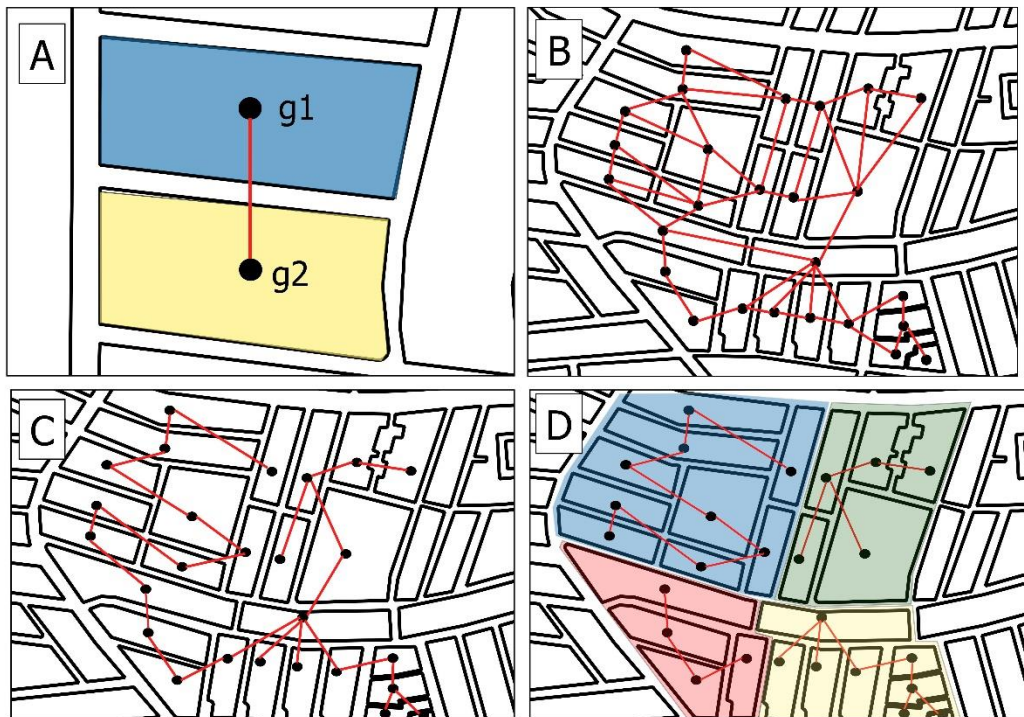


Figura 3. Desarrollo del método SKATER para trazar el número de zonas de recolección.

El MST es cortado en el número de macro rutas obtenidas de la Ecuación 5. El algoritmo SKATER realiza diferentes combinaciones de corte hasta encontrar las líneas de corte que generen macro rutas con la misma cantidad de RSU como se muestra en la Figura 3D.

5.2.2 Trazado de micro rutas

Para optimizar el trazado de micro rutas, fue utilizada la función objetivo de la Ecuación 8, la cual busca minimizar el costo de operación por recorrer todos los segmentos entre los puntos de recolección. Cada una de las variables de la función objetivo se describen a continuación.

$$\min((MC + FC + RC)(D)) \quad (8)$$

Costo por mantenimiento (MC)

El costo por mantenimiento de los vehículos recolectores fue obtenido utilizando información de Barnes and Langworthy, 2003. Los costos se estimaron en función del programa de mantenimiento recomendado por los fabricantes para 5 años de operación. La ecuación 9 divide este costo en dos partes, costo del mantenimiento preventivo-reparación por km recorrido (0.22 USD km⁻¹) y costo de neumáticos por km recorrido (0.031 USD km⁻¹).

$$MC_{kl} = mC + wC \quad (9)$$

Costo por consumo de combustible (FC)

El consumo de combustible durante la recolección de RSU fue calculado aplicando la metodología propuesta por Tavares *et al.*, 2009, los cuales utilizaron el modelo COPERT (Ntziachristos and Samaras, 2000) que calcula el esfuerzo de un motor en diferentes condiciones. En la Ecuación 10, el costo del consumo de combustible toma el consumo base de combustible dependiente de la velocidad del VR, considerando las características físicas del motor para estos

vehículos (Ecuación 11) y se corrige por el efecto de la carga del vehículo (Ecuación 12) y la pendiente de las calles (Ecuación 13). Finalmente, el consumo se transforma en costo utilizando el precio promedio del combustible.

$$FC = (Dc \times LF \times GrF) \times D_{cos} \quad (10)$$

$$Dc = 1595.1(V^{-0.4744}) \quad (11)$$

$$LF = 1 + 0.36 \times \frac{LP - 50}{100} \quad (12)$$

$$GrF = 0.41e^{0.18x} \quad (13)$$

En este trabajo se consideró un factor LF constante para cada ruta de recolección. El factor de corrección de pendiente es válido para grados de inclinación en un intervalo de -8° a $+8^\circ$.

Costo por riesgo de trabajo

En México, los trabajadores se encuentran asegurados por derecho constitucional mediante el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS). Los empleadores están obligados a pagar ante el IMSS cuotas o aportaciones por concepto de seguro por riesgo de trabajo (IMSS, 2019). El costo por riesgo de trabajo (Ecuación 14) utilizó el salario de los trabajadores reportado ante el IMSS y la prima de riesgo, que se calcula con la ecuación 15. Esta prima de riesgo fue calculada en base

a la frecuencia y gravedad de los accidentes viales presentados en un año de operación para VR, esta información se obtuvo de la base de datos del INEGI para el año 2018.

$$RC_{kl} = Sc_{kl} \times Pr \quad (14)$$

$$Pr = [(S / 365) + 28 \times (I + D)] \times (2.3 / N) + 0.005 \quad (15)$$

Optimización del modelo de recolección

Los AG utilizan estrategias inspiradas en los principios básicos de la evolución biológica. En una determinada etapa de la evolución, una población se compone de varios individuos, estos individuos contienen genes o características. Se evalúa la integridad de cada individuo y solo se reproducen los mejores, transmitiendo sus genes y características a la siguiente generación (Diabat *et al.*, 2013). En este caso, cada individuo representa una posible solución al problema de micro ruteo, estas posibles soluciones evolucionan para mejorar el resultado de la optimización. La Figura 4 muestra el diagrama de flujo del algoritmo genético utilizado en este trabajo, donde:

Paso 1. Generar una población inicial de soluciones de forma aleatoria.

Paso 2. Medir la calidad de las soluciones mediante la función objetivo del problema (Ecuación 8). En nuestro caso, al ser un problema de minimización, las soluciones con mejor calidad son las que presenten un menor valor de la función objetivo.

Paso 3. Definir un número máximo de generaciones o ciclos para terminar el algoritmo. Si terminó las generaciones predefinidas, vaya al paso 8, de lo contrario vaya al paso 4.

Paso 4. Identificar la solución con mejor calidad.

Paso 5. Cruzar las soluciones con mejor calidad para transmitir sus cualidades a la siguiente generación. El cruce de dos soluciones (padre y madre) creará dos nuevas soluciones, combinando las características de ambos padres de forma aleatoria.

Paso 6. Mejorar las nuevas soluciones mediante mutación. Se introduce una perturbación de forma aleatoria para modificar alguna de las características de las nuevas soluciones.

Paso 7. Generar una nueva población combinando las nuevas soluciones con las mejores soluciones de la generación anterior y se regresa al paso 2.

Paso 8. Mostrar el resultado.

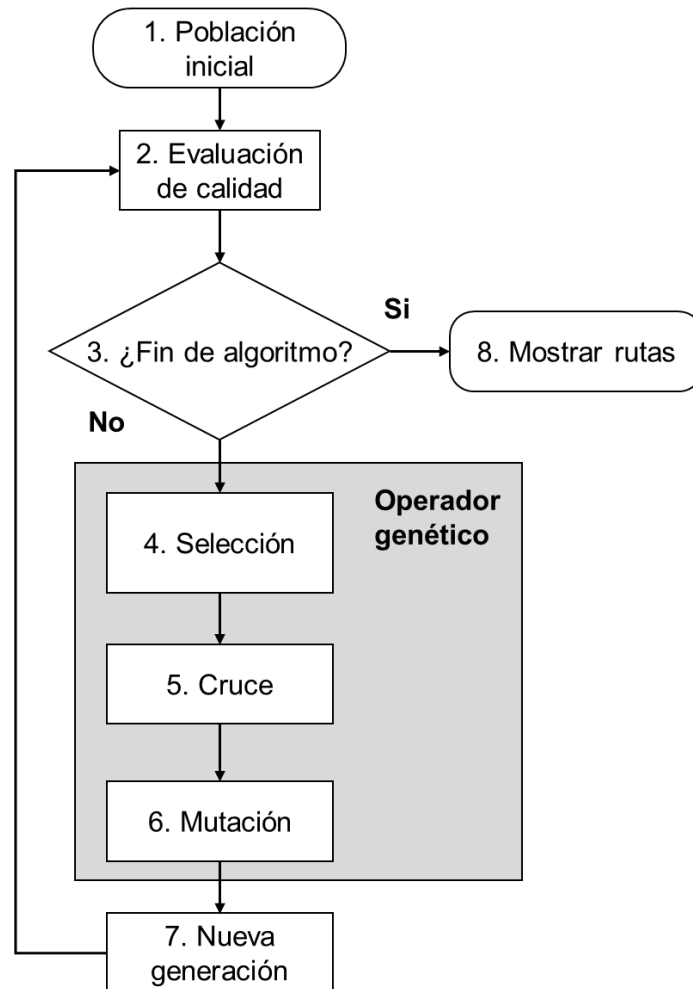


Figura 4. Diagrama de flujo de un algoritmo genérico y diagrama de fronteras para la cuantificación de impactos ambientales (adaptada de Duarte-Villaseñor, 2007).

5.3 Evaluación y selección de rutas de recolección de residuos

Para evaluar los resultados de micro ruteo y macro ruteo, se utilizó el ACV y el VPN. Los resultados económicos y ambientales establecieron criterios para ayudar a la toma de decisiones y seleccionar la mejor ruta utilizando el proceso jerárquico analítico (PJA).

5.3.1 Análisis de ciclo de vida

Definición del objetivo y del ámbito de aplicación

La Figura 5 muestra los límites del actual sistema de recolección de RSU. El sistema comprende el proceso de recolección representado por el polígono gris y el transporte al RS o ET, representado por las líneas rojas sólidas. Los límites del sistema incluyen todos los recursos necesarios para las actividades operativas y de mantenimiento como: combustible, productos de limpieza, neumáticos y suministros de mantenimiento. La construcción de infraestructuras (edificios y VR), las actividades de los talleres de mantenimiento, las operaciones en la estación de transferencia y las actividades administrativas quedan fuera de los límites del sistema, ya que no se ven afectadas por la optimización de la ruta.

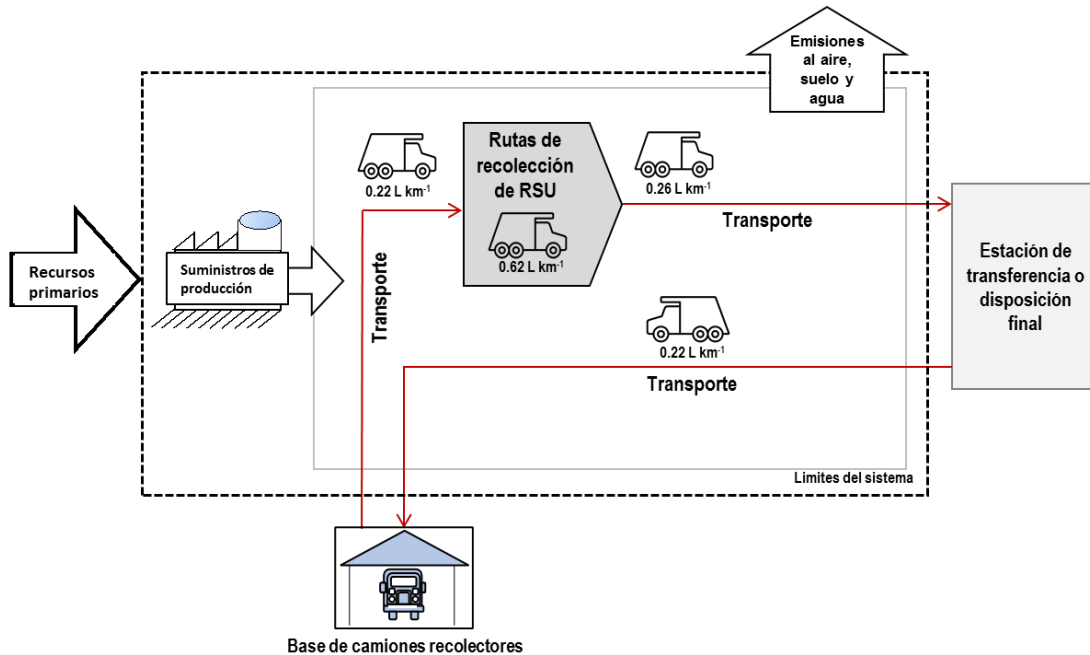


Figura 5. Límites del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos en el Área Metropolitana de Monterrey.

La unidad funcional (UF) considerada en este trabajo es la recolección y transporte de 1 t de RSU desde la fuente hasta la ET o RS. El flujo de referencia es de 1 t de RSU transportada por km recorrido.

Determinación del inventario del ciclo de vida

Los recursos necesarios para el funcionamiento del VR se evaluaron en función de la distancia recorrida y el consumo de combustible. La figura 5 muestra las eficiencias de combustible en diferentes etapas, las eficiencias de transporte (líneas rojas) para el VR vacío o lleno, y durante la recolección (polígono gris). Estas eficiencias se obtuvieron de datos reales de operación de VR de una empresa privada de recolección de RSU del AMM.

En este estudio se tomaron en cuenta el consumo de neumáticos, suministros de mantenimiento preventivo y correctivo, y productos de limpieza utilizados durante un año de funcionamiento para una flota de once VR para establecer el inventario de mantenimiento y limpieza. Todos los VR son de carga trasera, a base de diésel, y tienen una capacidad de carga de nueve toneladas. La Tabla 3 muestra los insumos de mantenimiento necesarios por VR durante 2017 para la flota analizada (esta información procede de datos reales obtenidos de una empresa de recolección de RSU). También se evaluó el consumo por kilómetro recorrido tomando las distancias totales de los VR para el mismo año. La Tabla 4 indica la masa de los insumos de mantenimiento (a través de un factor de equivalencia) y sus composiciones en base a la masa. Cada composición se obtuvo de fichas técnicas y artículos científicos; la composición de las baterías y los filtros se tomaron de Sullivan y Gaines (2010) y Gaidajis *et al.* (2011), respectivamente. Se utilizó la base de datos Ecoinvent v3.1 para considerar el ICV individual de los suministros de mantenimiento y limpieza. Las emisiones generadas por el consumo de combustible en el VR se estimaron mediante el modelo de ciclo de vida GREET (Pi *et al.*, 2015).

Tabla 3. Insumos de limpieza y mantenimiento para vehículos recolectores (VR) de RSU.

Producto	Unidad	Cantidad promedio por VR	Máximo	Mínimo	STD	Cantidad promedio por km
Aceite 15-w-40	L	70.6	105.0	34.0	26.0	1.4E-03
Aceite 75-w-90	L	3.0	4.0	2.0	1.4	5.9E-05
Aceite para transmisión	L	7.3	28.0	2.0	7.9	1.4E-04
Aceite hidráulico	L	84.0	186.0	5.0	65.7	1.6E-03
Anticongelante	Pza.	22.1	40.0	2.0	13.7	4.4E-04
Freno de disco	Pza.	5.4	8.0	2.0	1.9	1.0E-04
Rotula	Pza.	1.3	2.0	1.0	0.5	2.5E-05
Banda	Pza.	1.0	1.0	1.0	0.0	1.9E-05
Barril 60nta-10	Pza.	1.0	1.0	1.0	0.0	1.9E-05
Servofreno	Pza.	1.4	3.0	1.0	0.9	2.8E-05

Chaveta	Pza.	2.5	4.0	1.0	1.2	4.9E-05
Elemento filtrante	Pza.	2.2	3.0	1.0	0.6	4.4E-05
Filtro de aceite	Pza.	4.7	7.0	3.0	1.3	9.4E-05
Filtro de aire	Pza.	4.5	7.0	2.0	1.5	8.9E-05
Filtro de diésel	Pza.	5.0	11.0	3.0	2.4	9.9E-05
Filtro de aire del motor	Pza.	1.6	3.0	1.0	0.9	3.2E-05
Filtro hidráulico	Pza.	1.9	4.0	1.0	1.1	3.7E-05
Filtro de frenos	Pza.	5.2	8.0	2.0	1.8	1.0E-04
Filtro de secado	Pza.	1.0	1.0	1.0	0.0	1.9E-05
Conector	Pza.	2.8	5.0	1.0	1.4	5.5E-05
Conector codo 90°	Pza.	1.9	4.0	1.0	1.1	3.7E-05
Tornillo 1/4" x 1"	Pza.	8.8	24.0	4.0	6.6	1.7E-04
Retenedor	Pza.	1.5	2.0	1.0	0.6	2.9E-05
Tambor trasero	Pza.	2.8	5.0	1.0	1.1	5.6E-05
Terminal de ojo 5/16	Pza.	9.0	13.0	3.0	4.3	1.7E-04
Batería	Pza.	1.5	2	1	0.6	2.9E-05
Desengrasante	L	5.2	-	-	-	1.0E-04
Detergente	kg	2.7	-	-	-	5.3E-05
Trapos	kg	0.2	-	-	-	4.2E-06
Neumático	Pza.	2.8	-	-	-	5.4E-05
Parche	Pza.	12.2	-	-	-	2.4E-04
Pivote	Pza.	2.4	-	-	-	4.8E-05

Tabla 4. Caracterización de insumos de mantenimiento y limpieza.

Producto	Unidad	Equivalencia (kg unidad ⁻¹)	Composición	% P
Aceite 15-w-40	L			
Aceite 75-w-90	L			
Aceite para transmisión	L	0.95	Aceite lubricante	100%
Aceite hidráulico	L			
Anticongelante	L	1.14	Etilenglicol	100%
Freno de disco	Pza.	4.88		
Servofreno	Pza.	4.08		
Rótula	Pza.	0.80		
Tambor trasero	Pza.	39	Acero	100%
Tornillo 1/4" x 1"	Pza.	0.01		
Chaveta	Pza.	0.01		
Conector	Pza.	0.31		

Conector codo 90°	Pza.	0.31		
Barril 60nta-10	Pza.	5x10 ⁻³	Latón	100%
Terminal de ojo 5/16	Pza.	0.04	Cobre	100%
Banda	Pza.	0.08	Caucho	100%
Retenedor	Pza.	0.26		
Batería	Pza.	50	Plomo	25%
			Óxido de plomo	35%
			Polipropileno	10%
			Ácido sulfúrico	10%
			Agua	16%
			Vidrio	2%
			Antimonio	1%
Elemento Filtrante	Pza.	1.1		
Filtro de aceite	Pza.	0.57	Acero galvanizado	47%
Filtro de aire	Pza.	5.66	Acero sin carbón	32%
Filtro de diésel	Pza.	8.23	Acero liso al carbón	5%
Filtro de aire del motor	Pza.	0.27	Celulosa	12%
Filtro hidráulico	Pza.	0.30	Caucho de nitrilo	3%
Filtro de frenos	Pza.	0.29		
Filtro de secado	Pza.	0.28		
Desengrasante	L	1.11	Agua	80%
			2-(2-Butoxi)etanol	5%
			Ácido sulfónico	10%
			Hidróxido de potasio	5%
Detergente	kg	-	Sulfonato de alquil benceno	18%
			Tripolifosfato de sodio	50%
Trapos	kg	-	Algodón	100
Neumáticos	Pza.	56	Fibra textil	15%
			Acero	15%

			Caucho	70%
Parches	Pza.	1.1×10^{-2}	Negro de humo	10%
			Óxido de zinc	10%
			Caucho	70%
Pivotes	Pza.	1.2×10^{-2}	Caucho (EPDM)	100%

EPDM: Etileno Propileno Dieno

Evaluación del impacto del ciclo de vida

Siguiendo las recomendaciones de Larsen *et al.* (2009) y el sistema de Declaraciones Ambientales Internacionales de Producto (EPD) (un programa global de declaraciones ambientales basado en las normas ISO 14025 y EN 15804), sólo se consideraron las categorías de impacto más relevantes: Cambio climático (CC), Acidificación terrestre (AT), Formación de partículas (PMF) y Agotamiento de la capa de ozono (OD). También se incluyó la categoría de Agotamiento de Recursos Fósiles (FD) debido al alto consumo de diésel en la recogida y transporte de los RSU (Aldana Espitia *et al.*, 2017). El modelo de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) del sistema de recolección de RSU se construyó utilizando el software de ACV SimaPro 8.3.0 PhD® (PReConsultants, Amersfoort, Países Bajos). La EICV se realizó de acuerdo con el nivel de punto medio de ReCiPe 2016 (Goedkoop *et al.*, 2013).

5.3.2 Proceso de jerarquización analítica

El Proceso de Jerarquización Analítica (PJA) está diseñado para resolver problemas complejos basado en criterios múltiples (Jato-Espino *et al.*, 2014). Este proceso requiere definir el objetivo a cumplir, las alternativas que se evaluarán y los criterios que calificarán cada alternativa. Nuestro objetivo es seleccionar la mejor ruta de recolección de RSU para el AMM basada en diferentes

criterios, las alternativas a evaluar serán los resultados de la optimización (sección 5.2) y se tomarán criterios económicos, ambientales y sociales. La Tabla 5 muestra los criterios y subcriterios para calificar cada alternativa.

Tabla 5. Definición de criterios y subcriterios para el análisis jerárquico propuesto.

Criterio	Subcriterio	Definición
Económico	Costo operación y mantenimiento	Capacidad de la ruta para minimizar los costos de operación y mantenimiento
	Costo combustible	Capacidad de la ruta para minimizar los costos de combustible
Ambiental	Emisiones CR	Capacidad de la ruta para reducir las emisiones de los CR
	Ruido CR	Capacidad de la ruta para reducir el ruido en las zonas de recolección
Social	Seguridad laboral	Capacidad de la ruta para evitar poner en riesgo a los trabajadores

Los criterios económicos y el subcriterio de emisiones se obtienen de la sección 5.3.1 y 5.3.2, respectivamente. El subcriterio de ruido utiliza información de Paunovic *et al.*, 2014 calculando los decibeles percibidos por la operación de vehículos de carga pesada similares a los VR en una ciudad. El criterio de seguridad laboral fue obtenido del índice de paz en México 2020 (IMP, 2020), la cual es una escala de uno a cinco, donde uno es más seguro y cinco es menos seguro.

El índice de paz se calcula considerando cuatro indicadores: homicidios, delitos con violencia, delitos con armas de fuego, cárcel sin sentencia y delincuencia organizada. La Tabla 6 muestra la ponderación de cada indicador para el índice de paz. La ecuación 16 calcula el índice de paz, donde el *Valor bruto* es la suma de las ponderaciones de todos los delitos cometidos, *Mín* represente el valor del delito con menor ponderación y *Máx* represente el valor del delito con la mayor ponderación. La información de los delitos cometidos en el AMM se obtuvo de la Dirección de Inspección y Vigilancia del Estado de Nuevo León.

Tabla 6. Clasificación de delitos por indicador y ponderación dentro del índice de paz.

Indicador	Ponderación
Homicidio	4
Delitos con violencia	3
Delitos cometidos con armas de fuego	3
Cárcel sin sentencia	1
Delincuencia organizada	3

$$\text{índice de paz} = \left(\frac{\text{Valorbruto} - \text{mín}}{\text{máx} - \text{mín}} \right) - 1 \quad (16)$$

Para calificar cada alternativa es necesario asignar un valor a cada criterio y subcriterio con respecto a su importancia. El PJA utiliza comparaciones entre pares de criterios o subcriterios construyendo una matriz de comparación (Paunovic *et al.*, 2014). Para cuantificar esta matriz, el PJA propone una escala de comparación cuyos valores se muestran en la Tabla 7. La

comparación en pares del criterio i con el criterio j es colocado en la posición de a_{ij} de la matriz A de comparación, tal y como se ilustra en la Figura 6.

Tabla 7. Escala de comparación de criterios.

Término lingüístico (i respecto a j)	Valor numérico	
	a_{ij}	a_{ji}
Absolutamente menos importante	1/9	9
Mucho menos importante	1/7	7
Ligeramente menos importante	1/5	5
Menos importante	1/3	3
Igualmente importante	1	1
Ligeramente más importante	3	1/3
Más importante	5	1/5
Mucho más importante	7	1/7
Absolutamente más importante	9	1/9

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{ij} \\ a_{ji} & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 6. Matriz de ponderación para comparación por pares.

Los valores recíprocos de estas comparaciones son colocados en la posición a_{ji} de A , con la finalidad de preservar la consistencia del juicio. Una vez elaborada la matriz de comparación se puede calcular la prioridad de cada criterio siguiendo estos pasos:

- 1) Sumar los valores de cada columna de la matriz de comparación.
- 2) Dividir cada elemento de tal matriz entre el total de su columna; a esta nueva matriz se le denomina matriz de comparación normalizada.
- 3) Calcular el promedio de los elementos de cada renglón de la matriz normalizada, cada promedio representa la prioridad de dicho criterio.

Cuando las prioridades de cada criterio y subcriterio se tienen definidas, se obtienen las prioridades globales frente al objetivo principal y se puede dar una calificación a cada alternativa facilitando la toma de decisiones.

5.3.3 Análisis económico

La evaluación económica se realizó mediante el análisis del VPN (Ecuación 17) y la TIR (Tasa Interna de Retorno), la cual es la tasa de descuento de un proyecto que permite que el beneficio neto sea igual a la inversión, es decir VPN igual a cero (Ecuación 18), utilizando los flujos de efectivo netos esperados para un proyecto de recolección de RSU, así como la rentabilidad anual en efectivo, y los costos de inversión iniciales (Zúñiga-González, 2012).

$$VPN = -I + \sum_{t=1}^m \frac{FE_t}{(1+r)^t} \quad (17)$$

$$TIR = \sum_{t=0}^m \frac{FE_t}{(1+i)^m} = 0 \quad (18)$$

Donde I es el costo de inversión, FE es el flujo de efectivo al año t , ya sea positivo o negativo y r es la tasa de descuento, m es la vida útil del proyecto. Valores de VPN inferiores a cero indican proyectos inviables con pérdidas económicas; valores superiores a cero indican proyectos viables con ganancias económicas; y un VPN igual a cero indica proyectos sin pérdidas ni ganancias económicas. La TIR nos permite saber que tan viable es el invertir el proyecto transformando la rentabilidad de la empresa en un porcentaje, la cual se debe comparar a una Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento (TMAR) o Tasa de Rendimiento Mínimo Aceptable (TREMA) obtenida de empresas con inversiones de bajo riesgo. Si la TIR del proyecto es menor a la TMAR, no es conveniente invertir.

Se tomó como base un contrato de concesión por 15 años para el servicio de recolección de RSU en un municipio del AMM, se establece la compra de nuevos VR en el año uno, cinco y diez. El contrato de concesión establece que los VR usados serán donados al municipio que otorgó la concesión (San Pedro, 2014). Los flujos de efectivo consideran como egresos: sueldos, impuestos, combustible, mantenimiento, gastos administrativos, depreciación y pagos de intereses por préstamos bancarios, y como ingresos el pago por t de RSU recolectada. Se considera que los egresos e ingresos aumentan anualmente debido a la inflación, el salario mínimo y el aumento en la generación de RSU. La Tabla 8 muestra los datos utilizados en la evaluación económica tomando como año de referencia el 2019. El costo total de inversión

dependerá del número de VR que se requieran en un municipio y se espera un financiamiento del 50% mediante un crédito bancario con un costo anual total (CAT) de 17%.

Tabla 8. Parámetros utilizados para la evaluación económica de los sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos en el 2019.

Parámetro	Unidad	Valor	Referencia
<i>Costos de inversión</i>			
Capital propio	%	50	
Financiamiento bancario	%	50	
Costo anual total (CAT)	%	17	BBVA, 2020
N. de periodos	Años	4	
Póliza de garantía	USD	\$ 727,272.73	San Pedro, 2014
<i>Costos anuales por vehículo recolector</i>			
Sueldos de operados y Auxiliares	USD	\$ 18,396.51	
Seguro	USD	\$ 3,680.39	
Diésel	USD	\$ 12,114.06	
Mantenimiento y neumáticos	USD	\$ 5,982.09	
<i>Costos y tasas adicionales</i>			
Salario mínimo	USD	\$ 5.33	Banco de México, 2020
Incremento anual salarial	%	6	Banco de México, 2020
Inflación anual	%	4	Banco de México, 2020
Prima de riesgo	%	9	Banco de México, 2020
Precio de recolección	USD t ⁻¹	\$ 25.96	San Pedro, 2014

impuesto IVA	%	16	SAT, 2020
Depreciación	%	25	DOF, 2019
Crecimiento anual de RSU	%	3.4	SIMEPRODE, 201

6 Resultados

6.1 Análisis estadístico del sistema de recolección de residuos sólidos actuales

El análisis estadístico consideró seis municipios del AMM (Apodaca, Escobedo, Juárez, Santa Catarina, Monterrey y San Pedro), todos operados por la misma empresa de recolección. La Figura 7 muestra las características principales de cada muestra (distribución, tendencia central y dispersión) para los indicadores IDe (Figura 7A), ITe (Figura 7B) e IFe (Figura 7C). En la Figura 7 los municipios fueron divididos respecto a su ubicación dentro del AMM, los contornos en color rojo representan municipios externos y en contorno azul los municipios internos. Mientras más bajo el valor del indicador mayor es la eficiencia, representando una menor distancia recorrida, menor tiempo utilizado y menos combustible consumido en la recolección de una tonelada de RSU.

La Figura 7 muestra una tendencia similar en el comportamiento de los municipios para los tres indicadores. De forma general, el AMM presenta una media de 5.0 para IDe, 0.55 para ITe y 2.8 para IFe. Hannan *et al.* (2015) mencionaron que una mayor densidad poblacional puede ayudar a mejorar las eficiencias de los sistemas de recolección. Iriarte *et al.* (2009) reportaron valores de 2.1 en IDe y 1.2 en IFe para un sistema de recolección por acera en Barcelona, España con una densidad de 147 hab ha⁻¹, por otro lado, Texaire *et al.* (2014) reportaron un IDe de 6.0 e IFe de 3.0 para un sistema de recolección en Oporto, Portugal con una densidad de 71 hab ha⁻¹. El AMM tiene una densidad de 108 hab ha⁻¹ siendo la tercera zona más habitada de México. Las eficiencias reportadas en Barcelona y Oporto nos dan una referencia para considerar al sistema de recolección del AMM competitivo, al mantener una tendencia con respecto a lo reportado por Hannan *et al.* (2015).

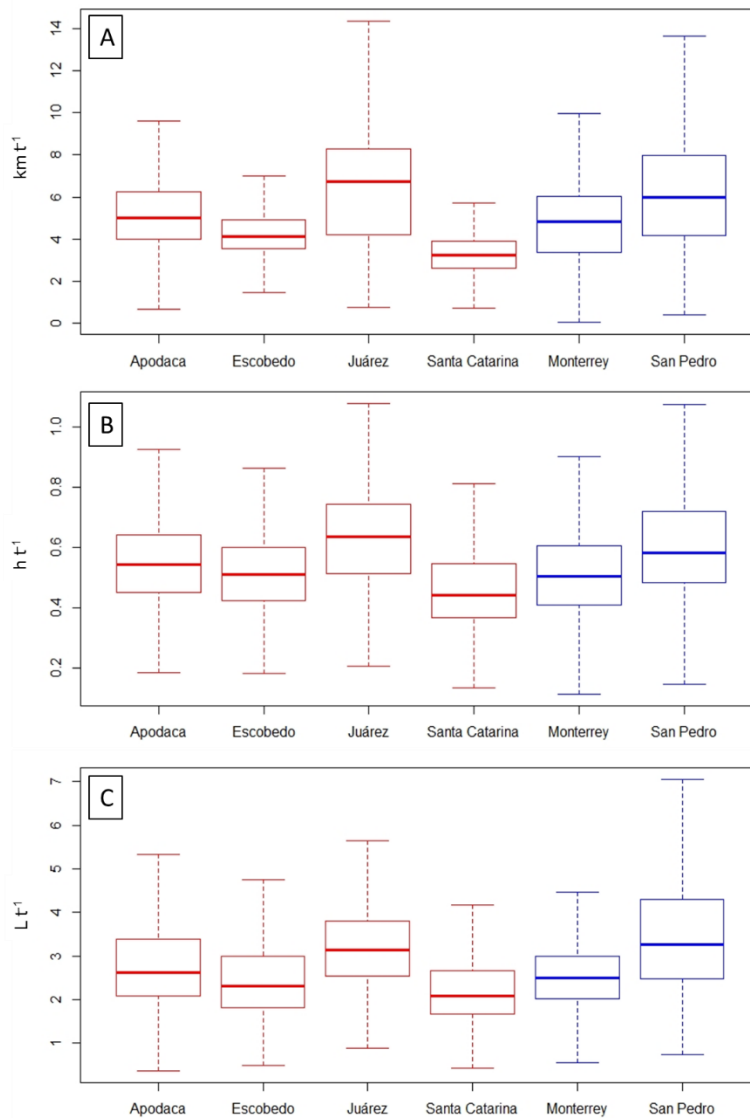


Figura 7. Análisis estadístico de los municipios que conforman el Área Metropolitana de Monterrey con respecto a (A) la eficiencia por distancia, IDE, (B) eficiencia por tiempo, ITe, y (C) eficiencia por consumo de diésel, IFe.

La selección del municipio con mayor ineficiencia consideró la dispersión en sus datos. La Tabla 9 muestra las medias, desviaciones estándar y coeficientes de variación (CV) de cada indicador. El municipio con mejor eficiencia fue Santa Catarina, presentó los mejores valores para los tres

indicadores y los menores CV para los indicadores ITe e IFe, esto se debe a su alta densidad poblacional (127 hab. ha^{-1}) y su cercanía con la ET. Apodaca, Escobedo y Monterrey mantienen valores similares en todos los indicadores y una dispersión de datos semejantes en los indicadores IDe e IFe. Sin embargo, Monterrey presentó un menor CV para el ITe (3 %) debido a la inclusión de una recolección nocturna en de la zona centro del municipio, evitando los horarios con mayor tráfico de la ciudad. Mientras que los municipios restantes del AMM sólo cuentan con una recolección matutina y vespertina.

Juárez y San Pedro son los municipios con mayor deficiencia del AMM, mostrando valores similares en los tres indicadores y los mayores porcentajes de CV. Para el municipio de San Pedro, su baja densidad población (60 hab. ha^{-1}) y sus características geográficas (es el municipio con mayor elevación dentro de su área urbana (INEGI, 2015), lo cual afecta el consumo de combustible de los VR (Xiao *et al.*, 2012)), son los factores que más afectan a la eficiencia del sistema de recolección. En contraste, Juárez presenta una densidad población de 112 hab. ha^{-1} , similar a Escobedo y Monterrey, es el municipio más alejado del RS. San Pedro tiene un crecimiento de población anual de 0.1 %, al contrario de Juárez con un crecimiento de 5.0 % (INEGI,2015). Por ello, se consideró que las dispersiones en Juárez se deben al proceso de adaptación de rutas al crecimiento del municipio, haciendo que San Pedro sea seleccionado como caso de estudio para las siguientes etapas dentro de la metodología.

Tabla 9. Datos estadísticos de los municipios del Área Metropolitana de Monterrey para cada eficiencia de recolección.

	Media	Desviación estándar	Coficiente de variación
	\bar{x}	σ	CV
<i>IDe</i>			
Apodaca	5.24	1.82	35%
Escobedo	4.23	1.22	29%
Juárez	6.46	2.94	46%
Santa Catarina	3.32	1.14	34%
Monterrey	4.63	2.15	46%
San Pedro	6.43	3.78	59%
<i>ITe</i>			
Apodaca	0.56	0.14	25%
Escobedo	0.52	0.13	25%
Juárez	0.64	0.18	29%
Santa Catarina	0.46	0.01	3%
Monterrey	0.52	0.02	3%
San Pedro	0.63	0.28	45%
<i>IFe</i>			
Apodaca	2.83	1.08	38%
Escobedo	2.56	1.11	43%
Juárez	3.35	1.35	40%
Santa Catarina	2.28	0.94	41%
Monterrey	2.58	0.82	32%
San Pedro	3.60	1.76	49%

6.2 Generación de micro rutas y macro rutas de recolección de residuos

6.2.1 Optimización de micro rutas de recolección

La Figura 8A muestra la micro ruta de recolección actual ubicada dentro del municipio de San Pedro (SP) y que fue utilizada como base para la optimización, tiene una distancia de 24.1 km y su frecuencia de recolección es lunes, miércoles y viernes en el turno matutino. Se estima una

recolección promedio de 7 t RSU y el sitio de disposición final es la ET. El recorrido que realiza el VR dentro de la micro ruta se marca con líneas discontinuas negras, los puntos de inicio y fin están identificados por círculos rojos. El rectángulo rojo dentro de la Figura 8A muestra la división de segmentos a través de puntos de recolección ubicados en las calles de la micro ruta.

La Figura 8B (distancias), 8C (pendiente de vialidades) y 8D (velocidad de tráfico) ejemplifican matrices de datos para los segmentos de los puntos de recolección de la Figura 8A. La micro ruta actual cuenta con 200 puntos de recolección que representan 40,000 segmentos a evaluar dentro de la función objetivo. Para disminuir el tiempo de cómputo, las celdas en color verde de las matrices de datos representan segmentos descartados debido a restricciones físicas, por ejemplo, el segmento entre el punto uno y cinco es imposible ya que el VR no puede atravesar la manzana. Las celdas en color azul representan los valores que se toman en cuenta para la función objetivo. En la Figura 8C los números positivos representan la declinación de las calles y los negativos la inclinación. Las celdas con Na de la Figura 8D representan un valor nulo debido a un sentido vial contrario en el segmento.

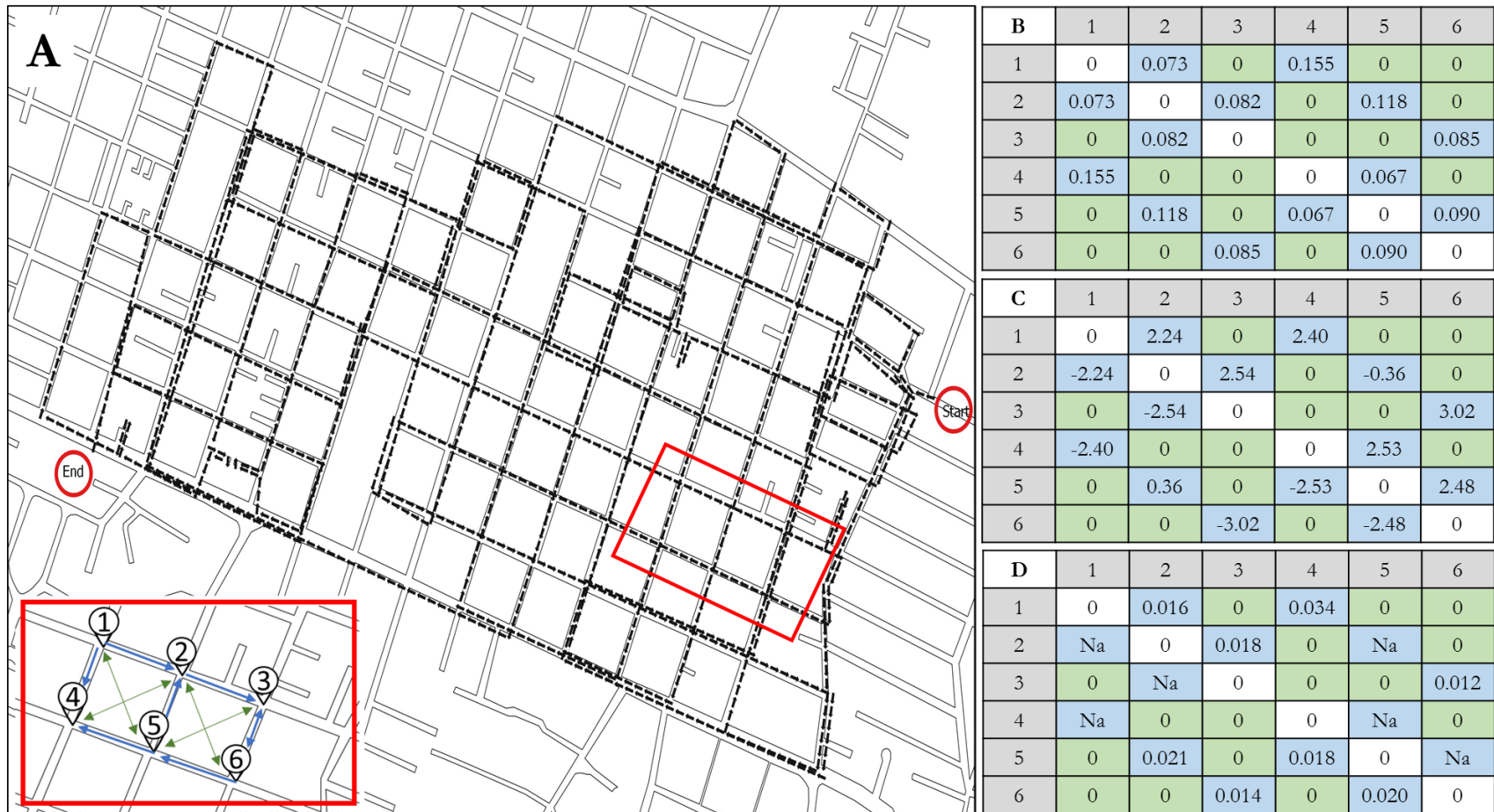


Figura 8. Micro ruta de recolección de San Pedro seleccionada y matrices de información para optimización.

La frecuencia de accidentes viales tiene una relación con el tráfico de la ciudad. El Consejo Estatal de Vialidad y Movilidad menciona que las horas con mayor tráfico dentro de AMM se presentan de 6:30 a 9:30 AM y de 6:00 a 8:00 PM a causa del desplazamiento de trabajadores (Lara-Vázquez *et al.*, 2019). La Tabla 10 presenta las estadísticas para accidentes viales dentro de SP, se estimaron 160 días perdidos por incapacidad al año a causa de accidentes, siendo el turno vespertino el que presenta una mayor prima de riesgo con un 51.3 % de probabilidad de accidentes a causa del tráfico.

Tabla 10. Estadísticas de accidentes viales y riesgo laboral para la ruta de recolección actual en SP.

Variable	Valor	Referencia	Turno	Tasa de riesgo*	Prima de riesgo
Número de Trabajadores	54	San Pedro, 2014	Mañana	30.3%	13.8%
Tasa de accidentes laborales anual	37%	Rodríguez <i>et al.</i> , 2016	Tarde	51.3%	15.0%
Días promedio de incapacidad por accidente	8	IMSS, 2019	Noche	18.3%	8.5%

* INEGI, 2015

El tráfico de la ciudad también afecta la velocidad de los VR, y en consecuencia el consumo de diésel durante el recorrido de la micro ruta. Por consiguiente, se analizó el efecto del tráfico sobre la optimización, mediante AG en diferentes momentos del día, para simular los tres turnos, matutino (7:00 a 11:00 am), vespertino (3:00 a 7:00 pm) y nocturno (10:00 pm a 2:00 am). La Figura 9 muestra los resultados de la optimización para costo, distancia y tiempo, donde cada

columna representa los resultados para un turno. Los resultados para costo muestran en cada turno la distribución de los gastos por diésel, mantenimiento y riesgo de trabajo.

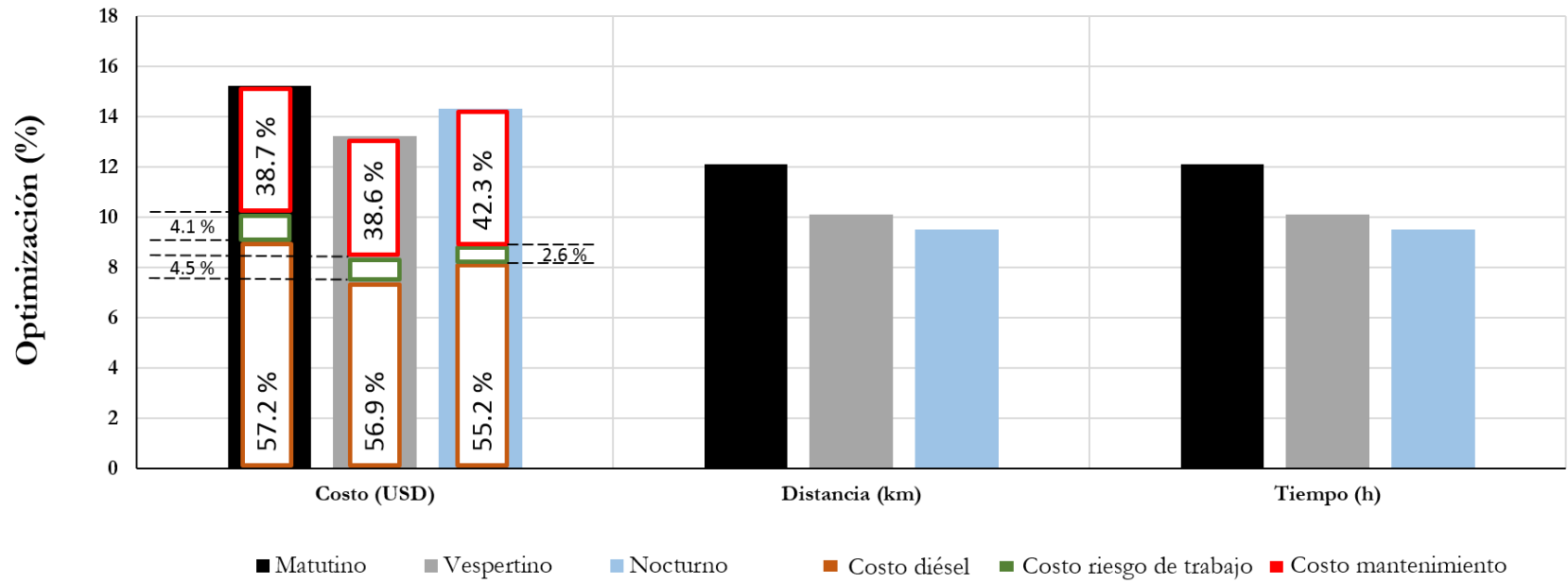


Figura 9. Resultados de optimización para costo, distancia y tiempo para diferentes turnos de recolección.

Los resultados de la optimización muestran una reducción de costos entre 13 % y 15 %, para los turnos vespertino y matutino, respectivamente. Las variables de distancia y tiempo mostraron una tendencia similar en los porcentajes de reducción (9.5 % a 12 %). La Figura 9 muestra que no existe una relación directa entre distancia y tiempo con el costo de recolección, el turno nocturno mostró la menor reducción de distancia y tiempo sin presentar la menor reducción de costos. Esta variación se debe a las condiciones sociales y geográficas de las micro rutas. Las bajas probabilidades de accidentes viales (Tabla 10) redujeron el costo de riesgo de trabajo para el turno nocturno en 40 %, en comparación a los turnos matutino y vespertino. Adicionalmente, el costo de diésel también fue menor durante el turno nocturno asociándolo a un menor consumo. Aunque todas las optimizaciones consideraron el mismo punto de inicio y fin (Figura 8A), la interacción dentro de las vialidades cambió con respecto al flujo de tráfico.

La Figura 10 muestra los resultados de velocidad del VR y el consumo de combustible durante diferentes momentos del día. Para el turno matutino se observan reducciones de velocidad al inicio y fin del horario, aumentando el consumo de diésel. Esto se debe al incremento del tráfico reportado por Lara-Vázquez *et al.* (2019). Pese a que el mayor tráfico se reporta durante la mañana y tarde, una sección de la micro ruta seleccionada se encuentra dentro del casco urbano del municipio de SP, el cual es conocido por sus cafeterías, pubs y bares de cócteles, generando un flujo de tráfico diferente durante la noche. Por lo tanto, en la Figura 9 el turno matutino recorrió menos distancia y tiempo, sacrificando consumo de combustible y velocidad, pero ahorrando costos por mantenimiento debido al tráfico laboral. En contraste, el turno nocturno muestra una mayor velocidad disminuyendo el consumo de combustible, sacrificando distancia y tiempo para evitar el tráfico generado dentro de la sección perteneciente al casco urbano.

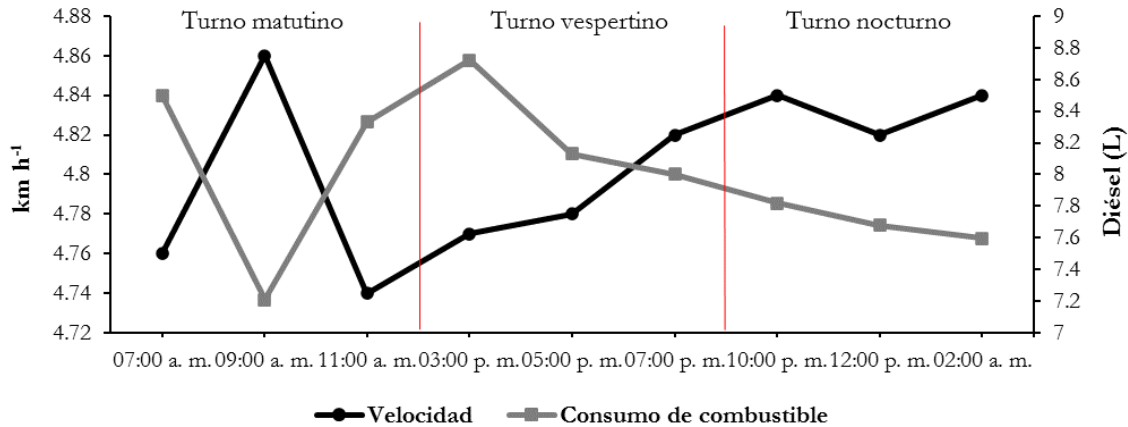


Figura 10. Comportamiento de la velocidad y el consumo de combustible en diferentes momentos del día.

La Tabla 11 muestra diferentes resultados de optimización para sistemas de recolección de RSU encontrados en literatura. Los resultados de este trabajo se muestran inferiores a los reportados, con la excepción de Tavares (2009) y Xiao *et al.* (2012), donde se supera la reducción de costo y combustible, respectivamente. En cuanto a distancias, se observa en los últimos cinco años investigaciones con reducciones arriba del 20 %. Das y Bhattacheryya (2015), Akhtar *et al.* (2017) y Erfan *et al.* (2019) redujeron las distancias de las rutas de RSU en un 30, 37 y 25 %, respectivamente. No obstante, estos trabajos se realizaron en países que consideran una combinación de los métodos de recolección de acera y contenedores, eliminando la necesidad de recorrer todas las calles de una zona seleccionada. En Latinoamérica, Gilardino *et al.* (2017) y Ferranato *et al.* (2020) mostraron reducciones del 41 % y 26 % al proponer cambiar a una recolección por contenedor. Los bajos resultados de optimización de este estudio podrían ser causados por mantener el método de acera para trazar las micro rutas de recolección, el cual es considerado como el más utilizado en América Latina según el Banco Mundial (2018).

Tabla 11. Resultados de optimización para sistemas de recolección de RSU.

Autor	País	Reducción			
		Costo	Distancia	Emisiones	Combustible
El-Hamouz, 2008	Palestina	20 %			
Tavarez, 2009	Cabo verde	8 %	29 %		16 %
Collivignarelli <i>et al.</i> , 2010	Somalia	20 %			
Xiao <i>et al.</i> , 2012	China				5 %
Malakhmad, 2013	Malasia		22 %		
Das and Bhattacherry, 2015	India		30 %		
Akhtar <i>et al.</i> , 2017	Malasia		37 %	40 %	47 %
Gilardino <i>et al.</i> , 2017	Perú		41 %	14 %	
Lan Vu <i>et al.</i> , 2018	Vietnam		14 %		
Maraqa <i>et al.</i> , 2018	EAU.		14 %	7.2 %	14 %
Erfan <i>et al.</i> , 2019	Iran		25 %		
Ferranato <i>et al.</i> , 2020	Bolivia		26 %		
En este trabajo	México				
<i>Matutino</i>		15 %	12 %		9.8 %
<i>Vespertino</i>		13 %	10 %		9.1 %
<i>Nocturno</i>		14 %	9.5 %		12 %

EAU: Emiratos Arabes Unidos; RSU: Resíduos Sólidos Urbanos.

6.2.2 Generación de macro rutas de recolección

Una vez establecido al municipio de SP como caso de estudio, se obtuvo información de población y grado de marginación utilizando datos del INEGI. En la Figura 11 se observan dos capas geoestadísticas, la primera muestra el tipo de grado de marginación que se encuentra en SP (Figura 11A) y la segunda el número de personas que lo habitan (Figura 11B), ambas capas se encuentran a nivel de manzanas. En la Figura 11A se pueden observar tres de los cinco grados de marginación presentes en México (Tabla 2), siendo el grado de marginación “muy bajo” el que se presenta en gran parte del municipio, esto se debe al crecimiento económico de SP que lo posiciona dentro del grupo de los cinco de municipios con mayor riqueza en el país (CONEVAL, 2015). La zona delimitada con líneas discontinuas de la Figura 11A muestra la interacción de los tres grados de marginación en SP, las manzanas en color verde representan a una colonia llamada “San Pedro 400”, la cual es conocida como una de las colonias con el menor ingreso económico del municipio.

La baja densidad poblacional en la Figura 11B se puede atribuir a su ubicación geográfica y calidad de vida de su población. Marcos *et al.*, (2010) mencionan que los municipios en crecimiento muestran una tendencia a incrementar su población en la periferia de las ciudades. Adicionalmente, existe una relación entre el incremento de la planificación familiar y la reducción de la pobreza (UNFPA, 2014). Para SP su ubicación geográfica detuvo el crecimiento territorial dejando zonas con mayor población en la periferia de la ciudad, por otro lado, su bajo nivel de marginación influye en su tasa de natalidad la cual no supera el 0.8 % (INEGI, 2015). La Figura 11B muestra una región delimitada con líneas discontinuas donde existen manzanas con

diferentes demografías, esta mezcla se debe a la combinación de los diferentes niveles de marginación (Figura 11A) y a la tendencia de crecimiento mencionada por Marcos *et al.* 2010.

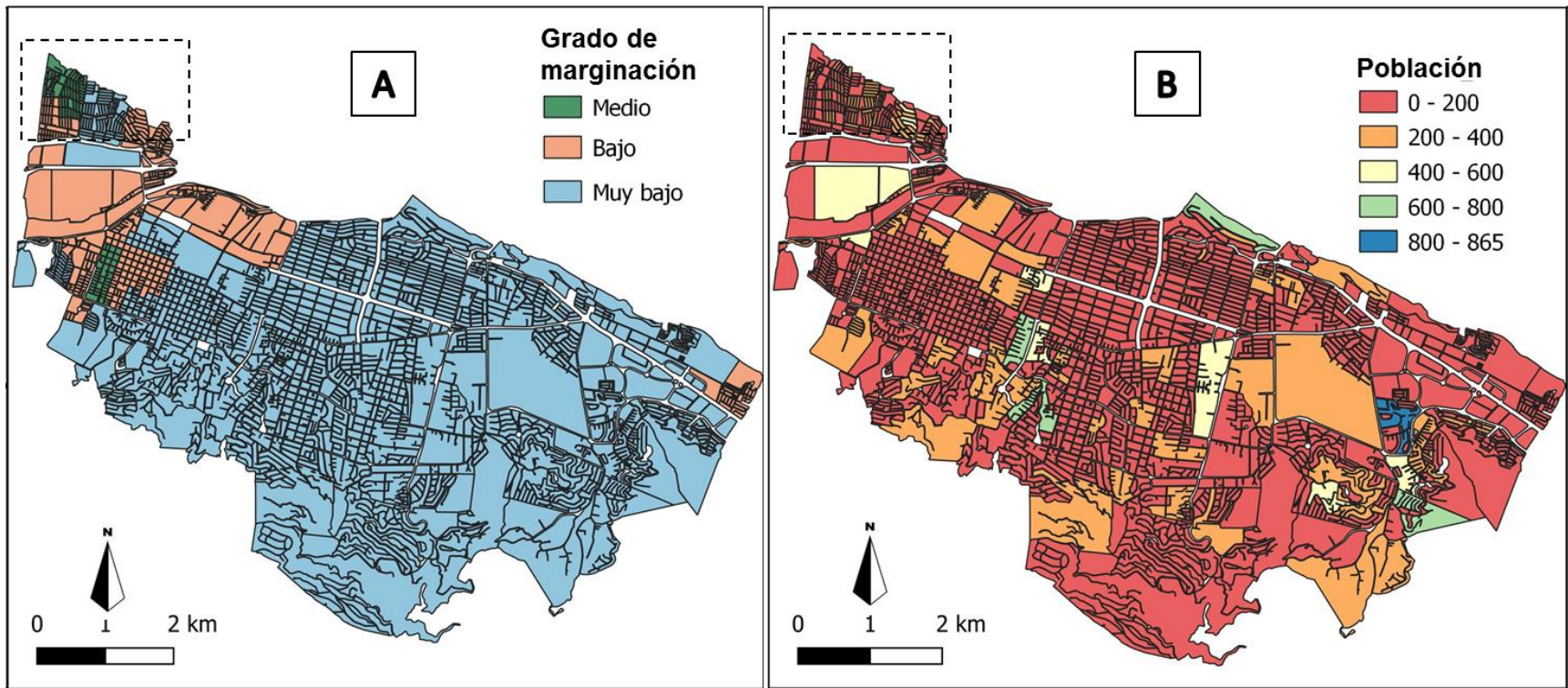


Figura 11. Capas geostatísticas del municipio de San Pedro Garza García por manzana indicando grado de marginación (A) y número de habitantes (B).

La Tabla 12 muestra la relación entre los grados de marginación y la generación de RSU por habitante dentro del AMM. La tabla fue calculada con la información de recolección de la sección 6.1, relacionada con las capas geoestadísticas de la Figura 11 para cada municipio. Peláez-Herrera (2012) indicó que las personas con índices de marginación bajo y muy bajo realizan compras de satisfacción adquiriendo artículos considerados de lujo que incrementan residuos como plástico, madera y metal, por otro lado, los grados alto y muy alto realizan sus compras en función de la necesidad generando residuos mayormente orgánicos. En la Tabla 12 se observa que los grados medio y bajo son los menores generadores de RSU, esto se atribuye a la actividad económica de esta población, la cual pertenece en gran parte al comercio y transporte, asignando los residuos generados a sus áreas de trabajo y no a sus hogares (INAFED, 2019).

Tabla 12. Generación de residuos sólidos urbanos per-carpita por grado de marginación para el Área Metropolitana de Monterrey.

Recolección RSU per cápita	Grado de marginación				
	Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo
kg hab ⁻¹ día ⁻¹	0.82	0.80	0.75	0.70	1.10

La Figura 12A muestra el mapa generado al aplicar la Ecuación 4 con la metodología de álgebra de mapas. La distribución heterogénea en la generación de RSU de cada manzana es atribuible a diferencias demográficas y de marginación. La zona delimitada con líneas discontinuas de la Figura 12A muestra una mezcla de manzanas con la mayor y menor generación de RSU debido a las variaciones observadas en la Figura 11. La Figura 13 representa las macro rutas necesarias

para SP (Ecuación 5), la línea roja es la capacidad de recolección de los VR y la línea negra es la generación de RSU con respecto a su frecuencia de recolección, el punto donde interceptan ambas líneas será el número de macro rutas para SP.

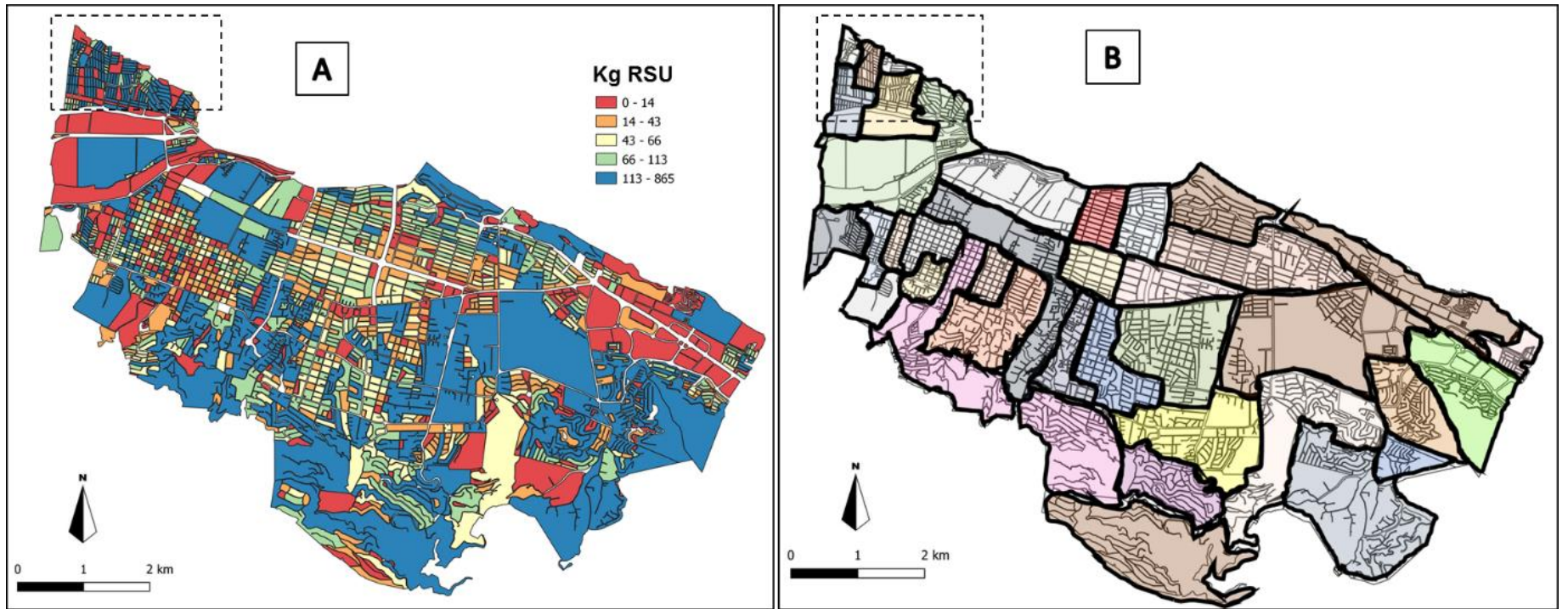


Figura 12. Generación de residuos sólidos urbanos por manzana (A) y división de macro rutas para el municipio de San Pedro (B).

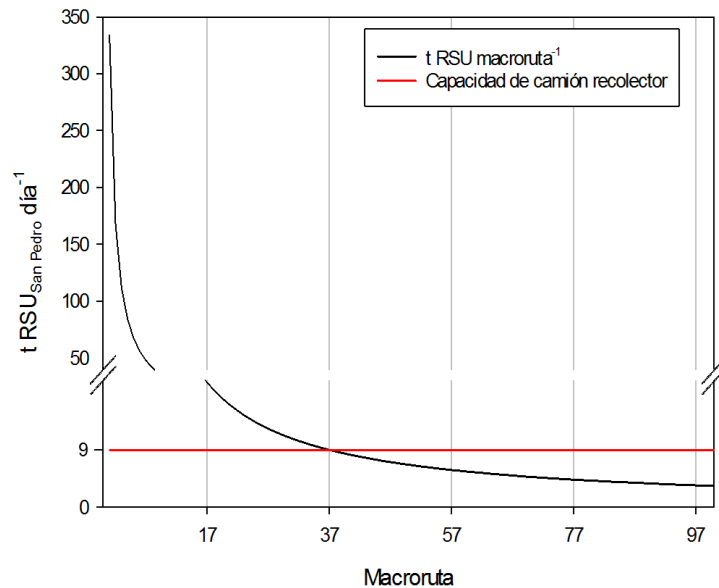


Figura 13. Número de macro rutas necesarias en el municipio de San Pedro.

La Figura 12B muestra el resultado del algoritmo SKATER, dividiendo el municipio en 37 macro rutas obtenidas de la Figura 13, todas las macro rutas muestran una homogeneidad en su generación de RSU aun cuando se observan diferentes tamaños. En el área delimitada por líneas discontinuas de la Figura 12B se pueden observar las macro rutas con menor tamaño del municipio, esto se debe a la alta generación de RSU (Figura 11A) y la aglomeración de manzanas en el área. Actualmente, la empresa de recolección privada brinda sus servicios dividiendo el municipio en 36 macro rutas, aunque los lunes y martes se reportan incrementos en la generación de RSU (generado por los hábitos de consumo durante los fines de semana y la falta de recolección en domingo) obligando a los VR a realizar más de un viaje para lograr recolectar todos los residuos. Este comportamiento es conocido como retorno e incrementa los costos de operación en 30 %. Se espera que al incrementar las macro rutas se eliminen los incrementos económicos por retorno, aun cuando incrementar el número de macro rutas implica adquirir más VR y contratar personal operativo. Por ello, en la sección 6.3 se evaluará el escenario actual

contra el propuesto para determinar la viabilidad de aumentar los costos por incrementar la flota de trabajo para reducir los gastos presentes por el fenómeno de retorno.

6.3 Evaluación de micro rutas y macro rutas optimizadas

6.3.1 Evaluación ambiental de micro rutas

La micro ruta matutina demostró ser superior desde un panorama económico mostrando los mejores porcentajes de reducción para distancia y tiempo; no obstante, los resultados demostraron que una menor distancia no siempre significa un menor consumo de combustible. Por esta razón se utilizó la metodología de ACV para cuantificar los impactos ambientales de los tres turnos optimizados. La Figura 14 representa la contribución medioambiental de las etapas de recolección (micro ruta), transporte y mantenimiento para la ruta actual y los tres turnos optimizados. Se muestran cinco conjuntos de columnas, cada uno de los cuales corresponde a una categoría de impacto de punto medio (Sección 5.3.1). La información cuantitativa de esta sección puede consultarse en la Tabla 13.

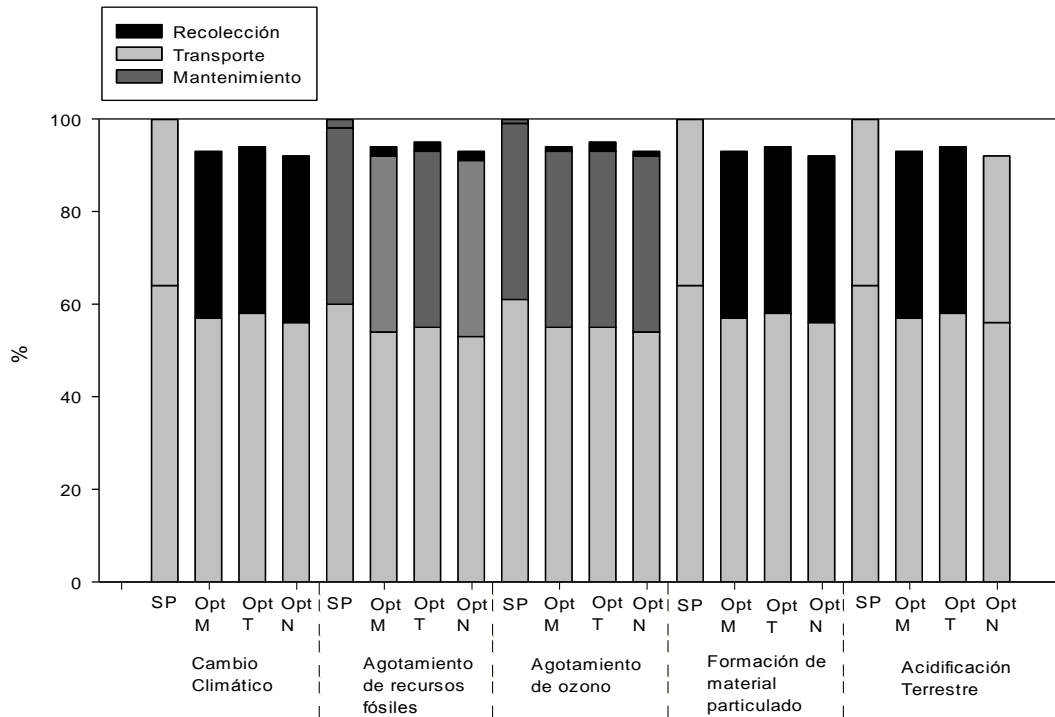


Figura 14. Análisis de impacto ambiental para la micro ruta actual y las micro rutas optimizadas.

Los resultados de la optimización, en la Figura 14, mostraron una reducción del indicador CC de 9.7 % para el turno matutino (Opt M), 9.1 % en el turno vespertino (Opt T) y 12 % para el turno nocturno (Opt N), equivalente a 0.64, 0.60 y 0.76 kg CO₂ eq UF⁻¹, respectivamente. Para este mismo indicador, la etapa de mantenimiento es mínima, dado que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son causadas en un 99.98 % por el consumo de diésel (14 % en la producción y 86 % en la combustión). La mayor contribución fue la etapa de micro ruta con un 64 %, causado principalmente por la baja distancia que recorre el VR hasta la ET.

En los demás indicadores de punto medio se observa una tendencia similar a la del indicador CC (Figura 14). Las emisiones que contribuyen a estos indicadores tienen una fuerte relación con el consumo de diésel. En el caso del PMF, la producción de diésel tiene una contribución del 42% y el resto proviene de la quema del combustible. Las principales cargas ambientales en este

indicador son NO_x (63 %), SO_x (25 %) y PM_{2,5} (8 %). En el caso del AT, la producción de diésel contribuye en un 53 % y el resto procede de su combustión. Las emisiones de gases en este indicador son NO_x (56 %), y el resto son SO_x.

Los indicadores FD y OD presentan una contribución pequeña pero visible en la etapa de mantenimiento (2 % y 1 %, respectivamente), causada por la producción de suministros (Tabla 3 y 4). Para estos indicadores, la combustión de diésel no tiene influencia, la producción de combustible y los suministros de mantenimiento tienen toda la contribución. En FD, el petróleo crudo tiene una participación del 94 %, y el resto se distribuye en gas natural y carbón. En el caso del OD, el 98.5% de este indicador procede de las emisiones de bromotrifluoro-metano al aire (Halón 1301) en el proceso de producción del diésel.

La Tabla 13 estima emisiones de GEI de 9.6 a 10.3 kg de CO₂ eq t⁻¹, inferiores a las reportadas por Aldana-Espitia *et al.* (2017) con 30.5 kg de CO₂ eq t⁻¹ para la ciudad de Celaya, Guanajuato en México. En contraste, Iriarte *et al.* (2009) reportaron 3.8 kg de CO₂ eq t⁻¹ para Barcelona en España. Estas diferencias tienen una relación con la eficiencia IFe, ya que el combustible es el mayor contribuidor en los resultados del ACV. Las bajas emisiones reportadas para Barcelona se deben a su densidad poblacional que supera 2.4 veces al municipio de SP, mejorando sus eficiencias de combustible, como se mostró en la sección 6.1. No obstante, la densidad poblacional de Celaya es de 86 hab ha⁻¹ y no presenta emisiones menores a SP, esto se puede atribuir a un IFe de 8.6, originado por el uso de VR con muchos años de antigüedad, los cuales afectan el rendimiento de combustible (Maimoun *et al.*, 2013).

La Tabla 11 muestra que existen pocos trabajos donde se reduzcan a la par aspectos económicos, técnicos y ambientales, especialmente trabajos que consideren el método de acera dentro de su optimización. Los resultados del ACV indican una reducción de emisiones similar a los trabajos reportados por Gilardino *et al.* (2017) y Maraga *et al.* (2018) aun considerando una recolección por contenedor. Akhtar *et al.* (2017) mostraron una mayor reducción de emisiones utilizando contenedores inteligentes a base de sensores que ayudan a reducir los puntos de recolección. Para los escenarios mexicanos cambiar su método de recolección o implementar nueva tecnología puede ser difícil dado que el 70% de los municipios del país tienen posibilidades financieras limitadas (BID, 2015).

Tabla 13. Datos cuantitativos para los impactos ambientales

Categoría de impacto	Unidad UF⁻¹	Recolección	Transporte	Mantenimiento	Recolección Mañana	Mantenimiento Mañana
Cambio climático	kg CO ₂ eq	6.58	3.75	1.64 x10 ⁻³	5.94	1.48 x10 ⁻³
Agotamiento de ozono	kg CFC-11 eq	8.68 x10 ⁻⁹	5.41 x10 ⁻⁹	1.39 x10 ⁻¹⁰	7.83 x10 ⁻⁹	1.26 x10 ⁻¹⁰
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	9.00 x10 ⁻³	5.14 x10 ⁻³	8.68 x10 ⁻⁶	8.12 x10 ⁻³	7.83 x10 ⁻⁶
Formación de material particulado	kg PM ₁₀ eq	3.75 x10 ⁻³	2.14 x10 ⁻³	5.37 x10 ⁻⁶	3.39 x10 ⁻³	4.85 x10 ⁻⁶
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq	1.62 x10 ⁻²	1.01 x10 ⁻²	5.60 x10 ⁻⁴	1.46 x10 ⁻²	5.05 x10 ⁻⁴

Continuación Tabla 13.

categoría de impacto	Unidad UF⁻¹	Recolección Tarde	Mantenimiento Tarde	Recolección Noche	Mantenimiento Noche
Cambio climático	kg CO ₂ eq	5.98	1.49 x10 ⁻³	5.82	1.45 x10 ⁻³
Agotamiento de ozono	kg CFC-11 eq	7.89 x10 ⁻⁹	1.27 x10 ⁻¹⁰	7.67 x10 ⁻⁹	1.23 x10 ⁻¹⁰
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	8.17 x10 ⁻³	7.89 x10 ⁻⁶	7.95 x10 ⁻³	7.67 x10 ⁻⁶
Formación de material particulado	kg PM ₁₀ eq	3.41 x10 ⁻³	4.88 x10 ⁻⁶	3.32 x10 ⁻³	4.75 x10 ⁻⁶
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq	1.47 x10 ⁻²	5.09 x10 ⁻⁴	1.43 x10 ⁻²	4.95 x10 ⁻⁴

6.3.2 Proceso de Jerarquización analítica

La Tabla 14 muestra los resultados para calificar los tres turnos optimizados utilizando los criterios de la Tabla 5. La recolección nocturna tiene un mayor impacto en la percepción del ruido, debido a que se reducen las actividades labores durante ese periodo. Adicionalmente, en este turno se tiene el mayor índice de violencia por el incremento de los delitos con violencia reportados dentro de la micro ruta de acuerdo con reportes de la Dirección de Inspección y Vigilancia del Estado de Nuevo León.

Tabla 14. Resultados por criterio para evaluación del Proceso de Jerarquización Analítica

Criterio	Subcriterio	Resultados		
		Matutino	Vespertino	Nocturno
Económico	Sección 6.2.1			
	Costo operación y mantenimiento. (USD)	8.2	8.5	8.5
	Costo de diésel (USD)	11	11.2	10.9
Ambiental	Sección 6.3.1			
	Emisiones VR (kg CO ₂ eq)	29.89	30.09	29.28
	Paunovic <i>et al.</i>, 2014			
	Percepción de Ruido de VR (DB)	54.5	54.5	75.7
Social	IPM, 2020			
	<i>Homicidio</i>	0	0	0
	<i>Delitos con violencia</i>	1	0	2
	<i>Delitos cometidos con armas</i>	0	1	0
	<i>Cárcel sin sentencia</i>	2	2	1
	<i>Delincuencia organizada</i>	0	0	0

Las matrices de comparación para ponderar los criterios deben ser elaboradas por personal experto en recolección de RSU dentro del AMM, considerando gobierno, ciudadanía y sector privado. Debido a la pandemia del COVID-19 la colaboración con estos expertos fue suspendida de forma indefinida. Por lo tanto, se plantearon tres escenarios hipotéticos para la ponderación de cada criterio.

- Escenario 1: Preferencia económica donde se otorga una ponderación de 0.5 al criterio económico, 0.25 para el criterio ambiental y 0.25 para el criterio social.
- Escenario 2: Preferencia ambiental donde se otorga una ponderación de 0.25 al criterio económico, 0.5 para el criterio ambiental y 0.25 para el criterio social.
- Escenario 3: Preferencia social donde se otorga una ponderación de 0.25 al criterio económico, 0.25 para el criterio ambiental y 0.5 para el criterio social.

La Figura 15 muestra los resultados de PJA mediante gráficas radiales, la distribución de la calificación se muestra para cada subcriterio dependiendo del turno y escenario. El subcriterio económico tuvo una ponderación de 0.6 para diésel y 0.4 para operación-mantenimiento. El subcriterio ambiental mantuvo una ponderación similar de 0.6 para emisiones y 0.4 para ruido.

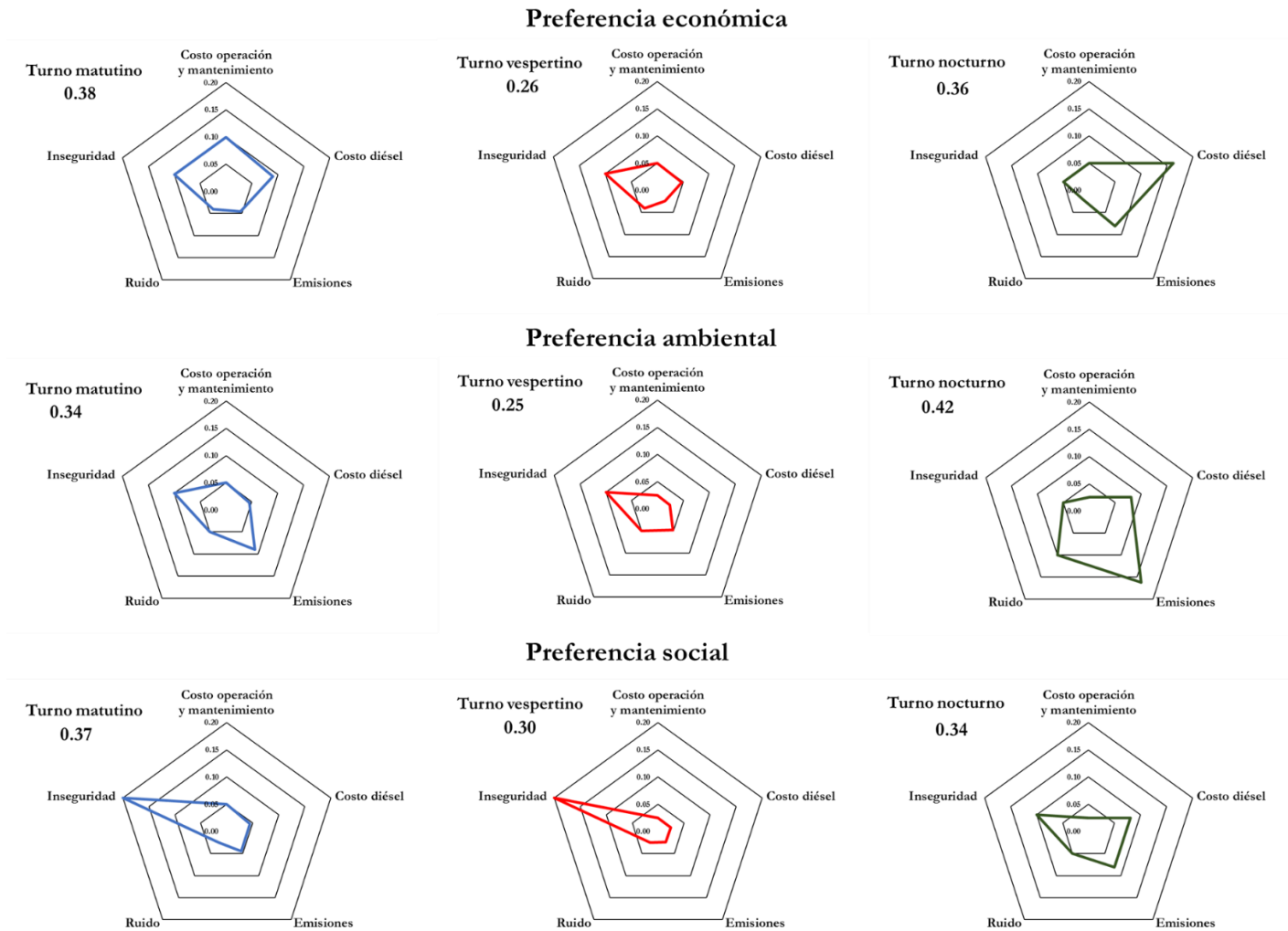


Figura 15. Resultados del proceso de jerarquización analítica para los tres escenarios.

La preferencia económica muestra calificaciones relativamente similares entre el turno matutino y nocturno, 0.38 y 0.36, respectivamente. La estrecha diferencia se atribuye a la alta ponderación dada al subcriterio de diésel, el turno matutino obtuvo el máximo porcentaje en los costos totales, pero el turno nocturno mostró la mayor reducción de combustible. Por ello, la preferencia ambiental considera al turno nocturno como la mejor opción con una diferencia del 20 % frente a la segunda mejor calificada. La Tabla 14 muestra la menor inseguridad en el turno matutino y vespertino, pese a ello, los bajos resultados de la tarde en los criterios económicos y ambientales dan la preferencia social al turno matutino.

Elegir el criterio con mayor peso para lograr un desarrollo sostenible, dependerá de las características socioeconómicas y ambientales de cada ciudad. América Latina y el Caribe (ALC) está considerada como una de las regiones más urbanizadas del mundo con el 80 % de su población viviendo en ciudades (ONU-Habitad, 2015) y aunque no es la más pobre, si es la más desigual (ONU-Agenda 2030, 2018). La Figura 16 muestra una relación entre población, tasa de pobreza y generación de CO₂ per cápita para algunos países de ALC durante el 2017 (Banco mundial, 2017). Países como Colombia, Brasil o Perú podrían inclinarse hacia preferencias económicas o sociales ya que han logrado diversificar sus matrices energéticas aumentando el uso de energías renovables (E. Colombia, 2017; E. Brasil, 2016; E. Perú, 2017), logrando mantener sus emisiones de CO₂ similares a las de países con menor población, pero igual tasa de pobreza como es el caso de Bolivia. Argentina o Chile son países que continúan utilizando cerca del 80 % de combustibles fósiles en su matriz de energía (E. Argentina, 2017; E. Chile, 2017) y que deberían enfocarse en una preferencia ambiental al tener la mayor generación de CO₂ per cápita aun con bajas tasas de pobreza. En Costa Rica, el 45 % de su matriz energética utiliza

combustibles fósiles y el 99 % de su energía eléctrica proviene de energías renovables, lo cual podría inclinarlo hacia preferencias sociales (E. Costa Rica, 2017).

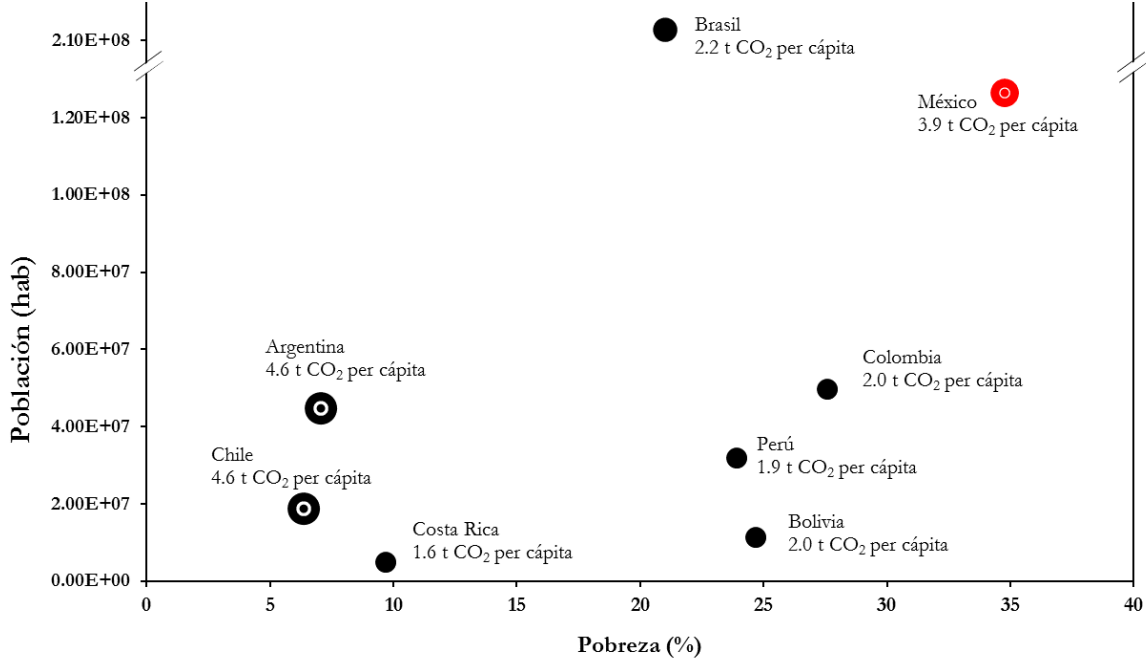


Figura 16. Relación entre población, tasa de pobreza y generación de CO₂ per cápita para países latinoamericanos durante el 2017.

México tiene un escenario complejo al mostrar altas tasas de pobreza (CEPAL, 2018), tener una matriz energética con 80 % de combustibles fósiles (SENER, 2017) y ser la décima con mayor población en el mundo (INEGI, 2015). Para la micro ruta de SP, el índice básico de ciudades prósperas califica al municipio con 63/100 lo cual lo posiciona por encima de la media nacional y lo establece como una ciudad próspera moderadamente sólida, dando los valores más bajos en la parte ambiental relacionándolo con la existencia de estaciones de medición que no cumplen con estándares requeridos para el control de contaminantes como PM₁₀, SO₂ y NO₂, además de una poca voluntad para estudiar la calidad del aire (CPI, 2018). En consecuencia, el turno

nocturno debería ser elegido para recolectar los RSU en la micro ruta de estudio al tener los mejores resultados del PJA en la preferencia ambiental.

6.3.3 Análisis económico

Los resultados del análisis económico para el escenario actual y el propuesto en la sección 6.2.2 se muestran en la Tabla 15. En ambos escenarios el costo por consumo de diésel representó el 16 % de los egresos. Similar a lo reportado por Sousa *et al.* (2018), reportando para ciudades europeas un consumo de diésel del 14 %. Esto refuerza lo discutido en la sección 6.1 donde las eficiencias de IDe e IFe en el AMM mostraron similitudes con la ciudad de Oporto en Portugal. El análisis VPN mostro ser viable mostrando ganancias en ambos escenarios, esto se debe a que los egresos son 43 % menos que las ganancias de la recolección de RSU. No obstante, el escenario actual mostró ser mejor que el propuesto al obtener 60 % más ganancias (0.264×10^6 USD).

Tabla 15. Análisis del valor presente neto del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos en el municipio de San Pedro.

Parámetro	Unidades	Escenario actual		Escenario propuesto	
		Valor	Desglose	Valor	Desglose
Inversión total	USD	-7.608×10^6		-8.018×10^6	
Inversión capital propio	USD		-3.804×10^6		-4.009×10^6
Inversión bancaria	USD		-3.804×10^6		-4.009×10^6

Ingresos por recolección de RSU	USD	34.817x10 ⁶	34.817 x10 ⁶
Egresos	USD	-19.694x10 ⁶	-20.442 x10 ⁶
Pago de intereses	USD	-1.669x10 ⁶	-1.757x10 ⁶
Sueldos	USD	-7.332x10 ⁶	-7.479x10 ⁶
Seguros	USD	-0.940x10 ⁶	-1.018x10 ⁶
Diésel	USD	-3.067x10 ⁶	-3.153x10 ⁶
Mantenimiento y neumáticos	USD	-1.515 x10 ⁶	-1.557x10 ⁶
Depreciación de los vehículos	USD	-3.675x10 ⁶	-3.981x10 ⁶
Otros costos	USD	-1.494 x10 ⁶	-1.494x10 ⁶
Utilidad bruta	USD	15.122x10 ⁶	14.375 x10 ⁶
Impuesto sobre la renta	USD	-4.487x10 ⁶	-4.264 x10 ⁶
Utilidad neta	USD	10.635x10 ⁶	10.110 x10 ⁶
Pago capital	USD	-3.262x10 ⁶	-3.434 x10 ⁶
Flujo de caja	USD	8.399x10 ⁶	7.850 x10 ⁶
VPN ¹	USD	0.697x10 ⁶	0.433 x10 ⁶

¹Calculado: Flujo de caja después de impuestos más inversión inicial.
RSU: Residuos Sólidos Urbanos

La Figura 17 muestra el comportamiento de ambos VPN en el tiempo del proyecto, lo cual ayuda a identificar el momento donde los flujos de caja se vuelven positivos y el inversionista comienza a percibir ganancias. En ambos escenarios se pueden observar descensos en el flujo durante el año cinco y diez, atribuibles a la compra de nuevos VR para renovar la flota y cumplir con el contrato. Los flujos de caja del escenario actual son positivos un año antes del escenario propuesto, reafirmando la decisión de seguir con el escenario actual. Aunque el escenario propuesto busca eliminar los gastos por retorno, estos se presentan en el 10 % de las micro rutas de SP, representando un aumento en los costos del 5.5 %, mientras que comprar un VR extra representa un incremento del 8 % en la inversión, mantenimiento, diésel y en especial para los salarios que representan el 37 % de los egresos.

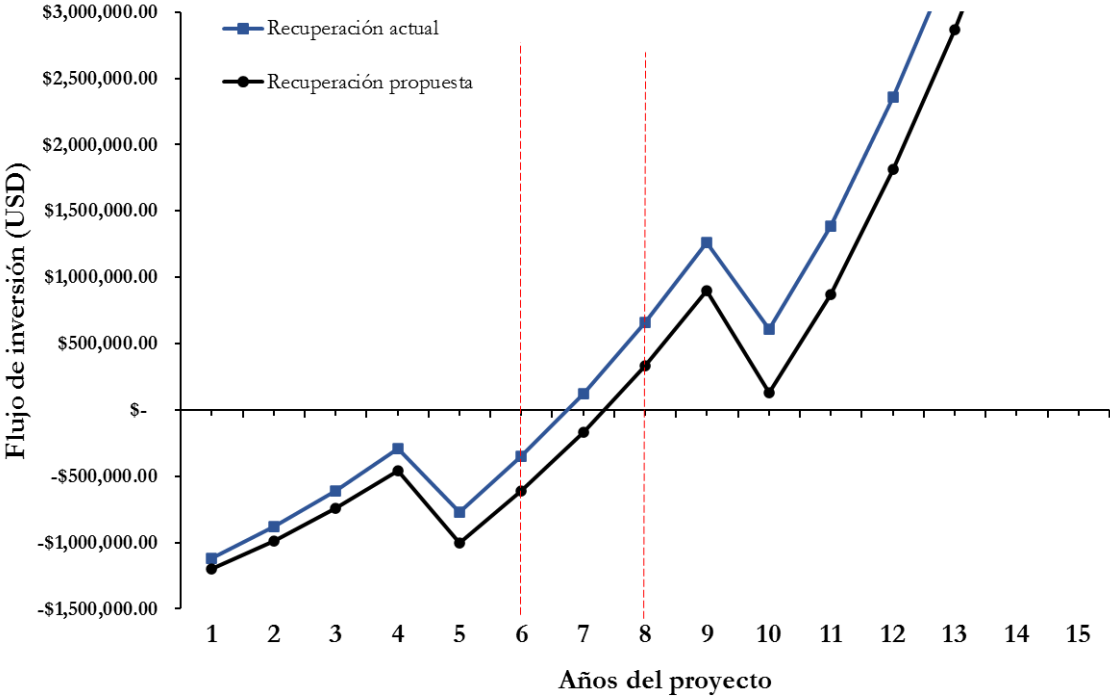


Figura 17. Recuperación de inversión dentro del tiempo de vida del proyecto.

Otro factor para considerar es el crecimiento poblacional. La Figura 18 muestra el incremento de macro rutas que necesitaría el municipio de SP y el municipio de Santa Catarina (SC) durante un contrato de recolección por 15 años utilizando la Ecuación 5. El municipio de SP mantiene un crecimiento demográfico de 0.1 %, incrementando el número de macro rutas en un 10 % durante los 15 años de operación. Por otra parte, SC muestra un incremento poblacional de 3 % (INEGI, 2015), lo que representa un incremento de 49 macro rutas (1.5 veces más que las actuales) para dar servicio al final de los 15 años del contrato. Por lo tanto, el uso de esta metodología en ciudades con un crecimiento acelerado puede ser de gran utilidad para reducir los costos futuros por el incremento de nuevas macro rutas en sus sistemas de recolección.

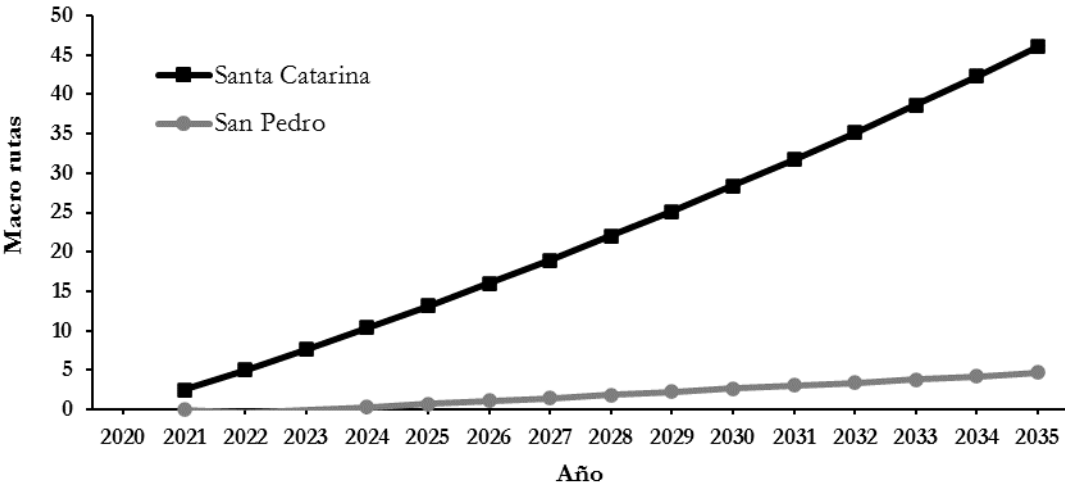


Figura 18. Crecimiento de micro rutas para los municipios de San Pedro y Santa Catarina.

Las diferencias demográficas y económicas mostradas en la Figura 16 dificultan una buena operación de los sistemas de recolección en ALC y su transformación hacia un desarrollo sostenible. La cobertura en la recolección de esta región es del 70 % al 100 %, presentándose las mayores coberturas en ciudades con ingresos altos, 50.6 % de la población tiene un servicio

público y el 45.4 % un servicio privado. Además, 33 % de los VR presentan una antigüedad mayor a 10 años (ONU, 2018). La Figura 19 muestra una comparación entre la generación de RSU y los costos de recolección de diferentes países en ALC durante el 2017 (BID, 2017). En países pequeños o medianos con tasas de pobreza elevadas se presentan niveles de servicio bajos ya que cada municipio es responsable de recolectar sus residuos de la mejor forma posible haciendo uso de sus propios fondos (APP, 2018), Bolivia y Perú son ejemplos de ello mostrando una cobertura de recolección menor al 85 %. Por otro lado, países con mayor población o mayor crecimiento económico tienden a concesionar con mayor frecuencia la responsabilidad de recolectar los residuos aumentando las tasas de cobertura (Jacobsen *et al.*, 2013). Argentina, Chile y Colombia tienen una participación del sector privado entre el 50 % y el 70 % superando el 98 % de cobertura (Rec. Argentina, 2017; Rec. Chile, 2016; Rec. Colombia, 2017). Costa Rica y Brasil mantienen una cobertura del 90 % aun con diferencias en su generación de RSU y población, esto se debe a un sistema de recolección desigual enfocado en las ciudades principales del país descuidando poblaciones pequeñas y medianas o asentamientos informales.

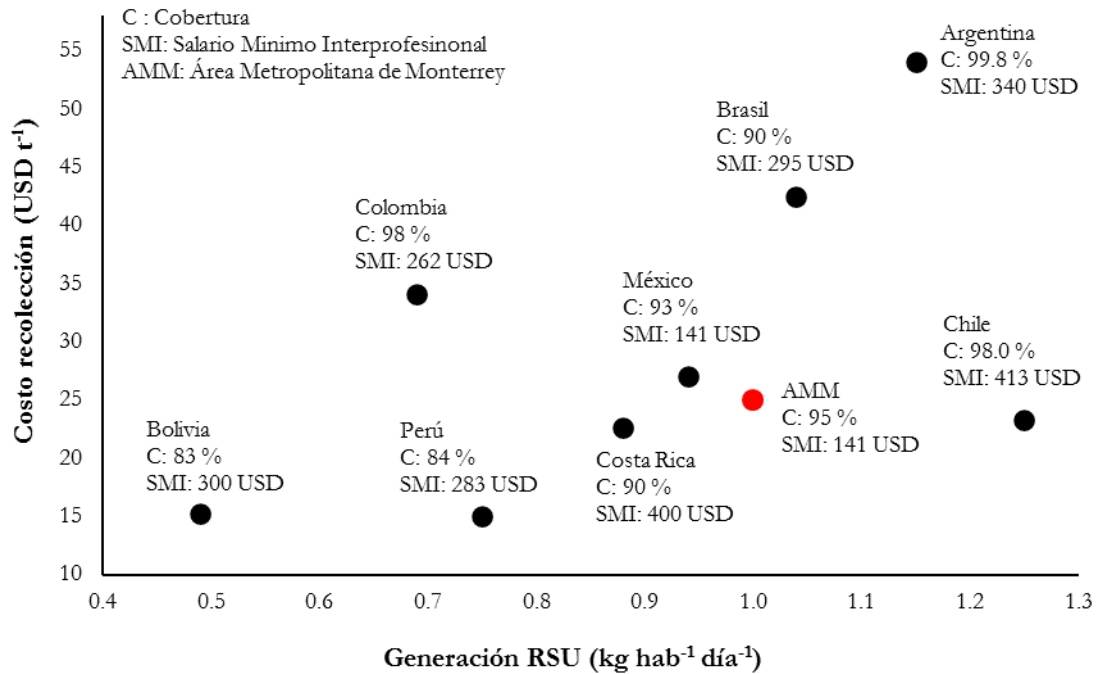


Figura 19. Relación entre generación de residuos sólidos urbanos, costos y cobertura por recolección para países de la región de América Latina y el Caribe.

El 93 % de cobertura para México en la Figura 19, se debe al 80 % de la población que vive en zonas urbanizadas, dejando al 20 % restante con coberturas entre el 30% y 80 % (INEGI, 2015). El AMM es un ejemplo de esa desigualdad mostrando una cobertura del 95 % con un sistema de recolección completamente privado, logrando costos por recolección menores a la media nacional. La inclusión de México dentro de la agenda 2030 de las naciones unidas aumenta el compromiso del país hacia el desarrollo de sistemas de recolección sostenibles (México y desarrollo, 2016), que puedan imitar los estándares de eficiencia mostrados por sistemas privados locales y de otros países, para reducir los impactos socioeconómicos y ambientales ocasionados por la rápida urbanización (Figura 16).

Otro factor por considerar para reducir los costos dentro de la recolección de RSU, es la modificación de la distribución tributaria en el país. La Tabla 16 muestra las diferentes formas de cobranza para sistemas de recolección en países de ALC (BID, 2015), en México no se tiene definida una estructura de recaudación que pueda dar estabilidad económica a los sistemas de recolección e invertir en nuevas tecnologías. Adicionalmente, nuestro país cuenta con un salario mínimo menor a la media de ALC (Figura 19) e implementar nuevos impuestos podría traer problemas para la población vulnerable.

El análisis económico en este trabajo mostró que los sistemas de recolección pueden ser negocios viables y con alta remuneración. Por ello, la Figura 20 muestra un análisis de sensibilidad utilizando el indicador TIR (línea azul) para calcular el porcentaje de rendimientos de la recolección actual, considerando la variación que tendrá la TMAR (línea roja) al modificar el nivel de inversión que se pretenda o se pueda. En la Figura 20 al reducir el capital propio y utilizar capital bancario (préstamo) las tasas de rendimiento aumentan, esto se debe a la inyección de dinero externo dentro de un proyecto que no requiere una mayor inversión, aumentando los flujos de efectivo y modificando la TIR, en literatura se recomienda una mezcla de inversión en las proporciones 30/70 o 70/30, toda inversión fuera de este intervalo se considera de alto riesgo (zona gris). Por lo tanto, el gobierno mexicano debe trabajar en un marco institucional para fomentar la inversión público-privada con el objetivo de generar y mantener competencia en el mercado de recolección de RSU, aumentando la eficiencia de operación.

Tabla 16. Sistemas de recaudación en diferentes países para los sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos.

Formas de cobranza en ALC en la población abarcada (%)

País	Impuesto predial	Electricidad	Agua potable y alcantarillado	Cuentas al usuario
Brasil	79 %	0	9 %	12 %
Colombia	0	35 %	65 %	0
Perú	85 %	0	0	15 %
Costa Rica	32 %	0	0	68 %
Bolivia		96 %		4 %
Argentina	68 %	4 %		28 %
Chile	59 %	0	0	41 %
México	-	-	-	-

ALC: América Latina y el Caribe

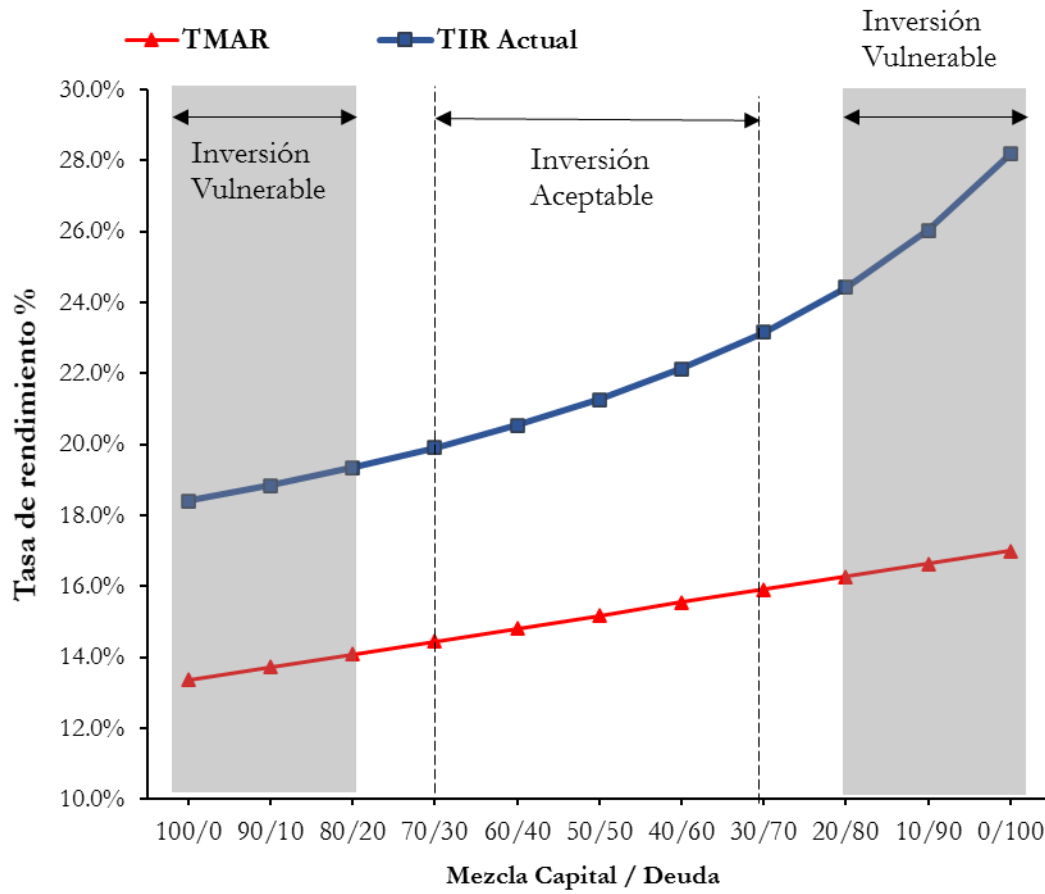


Figura 20. Flujo de rendimiento para un proyecto de recolección dependiendo del porcentaje de capital.

7 Conclusiones

En esta tesis se desarrolló una estrategia de trazado de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos en zonas con alto crecimiento urbano, tomando como caso de estudio el Área Metropolitana de Monterrey.

Los factores que más influyen en la eficiencia de recolección en el Área Metropolitana de Monterrey son la densidad poblacional y la altitud, debido a esto el municipio de San Pedro Garza García es el que presentó las menores eficiencias. El análisis estadístico mostró que implementar turnos nocturnos ayuda a reducir las variaciones en el consumo de diésel de los sistemas de recolección por el efecto del tráfico, sin embargo, el único municipio que presenta rutas nocturnas es Monterrey.

La optimización logró reducir hasta en un 15 % en costos y hasta 12 % en distancias, tiempos y emisiones en comparación con el escenario actual, manteniendo las restricciones del método de acera. La aplicación de sistemas de información geográfica ayudó a implementar factores como tráfico y altitud dentro de la función objetivo para diferentes momentos del día, demostrando que las micro rutas con menor distancia no significan las menores en el consumo de combustible.

La optimización matutina fue la mejor opción para reducir los costos y distancias, mientras que la optimización nocturna mostró la mayor reducción de emisiones. El proceso de jerarquización analítica ayudó a definir al turno nocturno como la mejor opción para la micro ruta de San Pedro Garza García, considerando dar una preferencia ambiental a causa de un bajo desarrollo ecológico dentro del municipio.

La implementación de niveles de marginación en la generación de RSU para la aplicación del algoritmo SKATER, logró modificar el tamaño y la distribución de las macro rutas. El modelo económico demostró que, a bajas tasas de crecimiento poblacional, la implementación de retornos en las micro rutas es económicamente mejores en comparación a la inversión para la creación de nuevas macro rutas.

Los resultados del VPN y TIR indican que aún con una inversión mínima privada, un proyecto de recolección puede ser viable. Los resultados que aporta este estudio pueden ser utilizados como base para crear nuevos fondos de financiamiento por parte del gobierno mexicano para fomentar la participación de inversionistas privados dentro de la recolección de RSU.

8 Referencias

Akthar M, Hannan MA., Begum RA., et al. (2017) Backtracking search algorithm in CVRP models for efficient solid waste collection and route optimization. *Waste Management*. 61: 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.022>

Aldana-Espitia NC, Botello-Álvarez JE, Rivas-García P, et al. (2017) Environmental impact mitigation during the solid waste management in an industrialized city in Mexico: an approach of life cycle assessment. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 19: 563–580. Available at: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=620/62052087021>

Alshraideh H and Abu H (2016) Stochastic modeling and optimization of medical waste collection in Northern Jordan. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 19:743-753. <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0474-3>

APP. (2018) Asociaciones publico privadas. Contraloría del poder legislativo dirección de vinculación municipal.

- Arribas CA, Blazquez CA and Lamas A (2010) Urban solid waste collection system using mathematical modelling and tools of geographic information systems. *Waste Management and Research*. 28: 355-363. <https://doi.org/10.1177/0734242X09353435>
- Assunção RM, Neves MC, Câmara G, and Costa-Freitas C, “Efficient regionalization techniques for socio-economic geographical units using minimum spanning trees,” *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, vol. 20, no. 7, pp. 797–811, 2006.
- Banco Mundial. (2017) Informe anual 2017. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/27986/211119SP.pdf>
- Banco Mundial. (2018) What a Waste 2.0 A global snapshot of solid waste management to 2050. Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317> (accessed 20 January 2020)
- BBVA. (2020) Préstamo Personal Inmediato. <https://www.bbva.mx/personas/productos/creditos/prestamos-personales/prestamo-personal-inmediato.html>
- Bel G. and Mur M. (2009) Intermunicipal cooperation, privatization and waste management costs: Evidence from rural municipalities. *Waste Management* 29 (2009) 2772–2778. doi:10.1016/j.wasman.2009.06.002
- BID (Banco interamericano de desarrollo) (2015) Situación de la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. Available at: <https://publications.iadb.org/es/situacion-de-la-gestion-de-residuos-solidos-en-america-latina-y-el-caribe> (accessed 22 January 2020).
- BID-Mapping. (2020) Digitalización: herramienta de defensa ante la crisis del Covid-19 y para el desarrollo sostenible. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Bing X., Bloemhof J., Pereira-Ramos T., Barbosa-Povoa A, Wong C. Y., van der Vorst J. G.A.J. (2015) Research challenges in municipal solid waste logistics management. *Waste Management*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.025>.
- Bonomo F, Durán G, Larumbe F et al. (2011) A method for optimizing waste collection using mathematical programming: a Buenos Aires case study. *Waste Management and Research*. 30:311-324. <https://doi.org/10.1177/0734242X11402870>
- Boskovic G., Jovicic N., Jovanovic S., Simovic V. (2016) Calculating the costs of waste collection: A methodological proposal. *Waste Management & Research* 2016, Vol. 34(8) 775–783. DOI: 10.1177/0734242X16654980
- Botello-Álvarez JE, Rivas-García P, Fausto-Castro L, et al. (2018) Informal collection, recycling and export of valuable waste as transcendent factor in the municipal solid waste management: A Latin-American reality.

- Journal of Cleaner Production. 182:485-495. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.065>
- Burnley SJ, "A review of municipal solid waste composition in the United Kingdom," vol. 27, pp. 1274–1285, 2007.
- CEPAL (2018) Segundo informe anual sobre el progreso y los desafíos regionales de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe. Foro de los Países de América Latina y el Caribe sobre el Desarrollo Sostenible. Santiago, Chile. 18 a 20 de abril de 2018.
- Comendador J, López-lambas M E, and Monzón A, "The Seventh International Conference on City Logistics A GPS analysis for urban freight distribution," vol. 39, pp. 521–533, 2012.
- CONEVAL. (2015) Información del Módulo de Condiciones Socioeconómicas (MCS) 2015. <https://www.coneval.org.mx>
- CPI. ÍNDICE BÁSICO DE LAS CIUDADES PRÓSPERAS (2018). San Pedro Garza García Nuevo León, México. ONU-Habitat.
- Das S and Bhattacharyya BK (2015) Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes. Waste Management. 43:9–18. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.033>
- Di Maria F and Micale C (2015) Life cycle analysis of management options for organic waste collected in an urban area. Environmental Science and Pollution Research. 22:248–263. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3330-9>
- Di Maria F and Micale C, (2014) A holistic life cycle analysis of waste management scenarios at increasing source segregation intensity: The case of an Italian urban area. Waste Management. 34:2382-2392. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.06.007>
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2019. "Ley del impuesto sobre la renta."
- Dugdhe S, Shelar P, Jire S, et al. (2016) Efficient Waste Collection System. International Conference on Internet of Things and Applications (IOTA), Maharashtra Institute of Technology, Pune, India 22 Jan - 24 Jan, 2016. <https://doi.org/10.1109/IOTA.2016.7562711>
- Duarte-Villaseñor M. A. (2007) Síntesis automática de bloques de ganancia unitaria utilizando algoritmos genéticos. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Tonantzintla, Puebla
- E. Argentina. (2017) Matriz Energética y Eficiencia. Academia de la ingeniería de la Provincia de Buenos Aires. Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos.

- E. Bolivia. (2020) Situación Energética de Bolivia y Desafíos. WWF Bolivia - World Wildlife Fund. ISBN: 978-9917-9861-0-2
- E. Brasil. (2016) Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética del Brasil. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <https://repositorio.cepal.org>
- E. Colombia (2017). MAPA ENERGÉTICO DE COLOMBIA, Unidad de Planeación Minero Energética. UTP-WORLD ENERGY COUNCIL. www.upme.gov.co
- E. Costa Rica. (2017) Matriz Energética de Costa Rica, Renovabilidad de las fuentes y reversibilidad de los usos de energía. <http://www.fesamericacentral.org>
- E. Perú. (2017) Balance nacional de energía. Dirección General de Eficiencia Energética, Área de Planeamiento Energético. www.minem.gob.pe
- E.Chile. (2017) Sector energía I: Marco regulatorio y matriz energética. www.deloitte.cl
- Emery A., Davies A., Griffiths A., Williams K. (2007) Environmental and economic modelling: A case study of municipal solid waste management scenarios in Wales. *Resources, Conservation and Recycling* 49 (2007) 244–263. doi:10.1016/j.resconrec.2006.03.016
- Erfan BT, Iraj M, Mir Mehdi SE, et al. (2019) A hybrid augmented ant colony optimization for the multi-trip capacitated arc routing problem under fuzzy demands for urban solid waste management. *Waste Management & Research*. 38: 156-172. <https://doi.org/10.1177/0734242X19865782>
- Erses Yay. A.S. (2015) Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya. *Journal of Cleaner Production*. 94:284-293. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.089>
- Ferronato N, Portugal Alarcón G. P., Guisbert-Lizarazu E.G., Torretta V., (2020). Assessment of municipal solid waste collection in Bolivia: Perspectives for avoiding uncontrolled disposal and boosting waste recycling options. *Resources, Conservation & Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105234>
- Fuente S, “Análisis Cluster Santiago de la Fuente Fernández,” pp. 2, 28, 2011.
- Gaidajis G, Angelakoglou K, Botsaris NP, et al. (2011) Analysis of the recycling potential of used automotive oil filters using the Life Cycle Assessment approach. *Resources, Conservation and Recycling*. 55: 986-994. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.008>
- Geodkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, et al. (2013) ReCiPe 2008: A life cycle assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level, first edition (revised), report I: Characterization.

- Ghiani G, Laganà D and Manni E, et al. (2014) Operations research in solid waste management: A survey of strategic and tactical issues. *Computers and Operations Research*. 44:22–32. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.10.006>
- Gilardino A, Rojas J, Mattos H, Larrea-Gallegos G, et al. (2017) Combining operational research and Life Cycle Assessment to optimize municipal solid waste collection in a district in Lima (Peru). *Journal of Cleaner Production*. 156: 589-603. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.005>
- Hannan M.A., Abdulla Al Mamun MD., Hussain A., Basri H, Begum R.A. (2015) A review on technologies and their usage in solid waste monitoring and management systems: Issues and challenges. *Waste Management* 43 (2015) 509–523. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.05.033>.
- Haya E (2016) Análisis de Ciclo de Vida. Escuela de organización industrial. Available at: <https://www.eoi.es/es/file/66611/download?token=BTXaL249>
- Hettiarachchi H, Ryo S, Caucci S, et al. (2018) Municipal Solid Waste Management in Latin America and the Caribbean: Issues and Potential Solutions from the Governance Perspective. *Recycling*. 3: 19. <https://doi.org/10.3390/recycling3020019>
- Imam A, Mohammed B, Wilson DC, and Cheeseman CR, “Solid waste management in Abuja, Nigeria,” vol. 28, pp. 468–472, 2008.
- IMP. (2020) ÍNDICE DE PAZ MÉXICO 2020. Identificar y medir los factores que impulsan la paz. Institute for Economics and Peace.
- IMSS. (2019) Informe al Ejecutivo Federal y al Congreso de la Unión sobre la Situación Financiera y los Riesgos del Instituto Mexicano del Seguro Social 2018-2019. <http://www.imss.gob.mx>
- INAFED. (2019) Guía Consultiva de Desempeño Municipal (GDM). Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI (2015) Conociendo Nuevo León. Available at: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825098148> (accessed 21 January 2020)
- International EPD System (2015) Product category rules for solid waste disposal services. Version 3.0.
- Iriarte A, Gabarrell X and Rieradevall J. (2009) LCA of selective waste collection systems in dense urban areas. *Waste Management*. 29: 903-914. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.002>
- Jacobsen R, Buysse J, Gellynck X (2013) Cost comparison between private and public collection of residual household waste: Multiple case studies in the Flemish region of Belgium. *Waste Management*. 33:3–11. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.08.015>

- Jato-Espino D., Tejero-Monzón I., Castro-Fresno D., Temprano-González J., Lobo-García de Cortázar A. (2016) Análisis multicriterio integral para optimizar la gestión de residuos sólidos municipales. <https://www.researchgate.net/publication/266673464>.
- Lara-Vázquez A, Leo-Lozano J, Jano-Ito M, et al. (2019) Propuestas para el desarrollo sustentable de una ciudad mexicana. Estudio del Área Metropolitana de Monterrey. Centro Mario Molina para estudios estratégicos sobre energía y medio ambiente A.C. Available at: http://aire.nl.gob.mx/docs/reportes/Propuestas_de_sustentabilidad_Monterrey.pdf
- Larsen AW, Merrild H, Møller J, et al. (2010) Waste collection systems for recyclables: An environmental and economic assessment for the municipality of Aarhus (Denmark). *Waste Management*. 30:744–754. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.10.021>
- Larsen AW, Vrgoc M, Christensen TH, et al. (2009) Diesel consumption in waste collection and transport and its environmental significance. *Waste Management and Research*. 27:652-659. <https://doi.org/10.1177/0734242X08097636>
- Laso J, García-Herrero I, Margallo M, et al. (2019) LCA-Based Comparison of Two Organic Fraction Municipal Solid Waste Collection Systems in Historical Centres in Spain, *Energies*, 12: 1407. <https://doi.org/10.3390/en12071407>
- Laureri F, Minciardi R and Robba M (2016) An algorithm for the optimal collection of wet waste. *Waste Management*. 48:56–63. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.020>
- Lethbridge J (2017) Municipal solid waste management services in Latin America. Public Services International Research Unit (PSIRU). Available at: www.psiru.org
- Maimoun MA, Reinhart DR, Gammoh FT, et al. (2013) Emissions from Us waste collection vehicles. *Waste Management*. 33:1079-1089. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.12.021>
- Maraqá MA, Swar Aldahab EZ, Ghanma M and Al Kaabi SK. (2018) Optimization of fuel consumption for municipal solid waste collection in Al Ain city, UAE. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 383 (2018) 012026 doi:10.1088/1757-899X/383/1/012026
- Marcos M., Ansaloni M., Mera G., (2010) La dimensión espacial de la marginación urbana. Una aplicación a la Región Metropolitana de Buenos Aires. *Revista Universitaria de Geografía*, vol. 25, núm. 2, 2016, pp. 49-77. ISSN: 0326-8373
- Margallo M, Ziegler-Rodríguez K, Vázquez-Rowe I, et al. (2019) Enhancing waste management strategies in Latin

- America under a holistic environmental assessment perspective: A review for policy support. *Science of the Total Environment*. 689: 1255-1275. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.393>
- México y desarrollo. (2015) México y la agenda 2030 de desarrollo sostenible. Acciones, contribuciones y propuestas. ISBN: 978-607-97173-1-5
- México, Banco de. 2020. "Banco de México." 2020. <https://www.banxico.org.mx/>.
- Diabat A., Kannan D., Kaliyan M., and Svetinovic D. (2013) An optimization model for product returns using genetic algorithms and artificial immune system. *Resources, Conservation and Recycling*. 74:156-169. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.010>
- ONU (2015). *World Urbanization Prospect*. United Nations. ISBN 978-92-1-
- ONU. (2018) *Perspectiva de la gestión de residuos en América Latina y el Caribe*. ONU medio ambiente. Ciudad de Panamá, Panamá. <http://www.unenvironment.org>
- ONU-Agenda 2030. (2018) *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. www.un.org/sustainabledevelopment/es
- ONU-Habitad. (2015) *Tendencias del desarrollo urbano en México*. <https://onuhabitat.org.mx>
- ONU-Habitad. (2012) *DE AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (ESTADO DE LAS CIUDADES)*, Rumbo a una nueva transición urbana. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos, www.unhabitat.org
- Passarini F, Vassura I, Monti F, Morselli L, and Villani B, "Indicators of waste management efficiency related to different territorial conditions," *Waste Manag.*, vol. 31, no. 4, pp. 785–792, 2011.
- Paunović K., Belojević G., Jakovljević B. (2014) Noise annoyance is related to the presence of urban public transport. *Science of the Total Environment* 481 (2014) 479–487. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.092>
- Peláez-Herreros O. (2012) Análisis de los indicadores de desarrollo humano, marginación, rezago social y pobreza en los municipios de Chiapas a partir de una perspectiva demográfica. *Economía, Sociedad y Territorio*, vol. XII, 38: 181-213.
- Rigamonti L., Sterpi I., Grosso M. (2016) Integrated municipal waste management systems: An indicator to assess their environmental and economic sustainability. *Ecological Indicators* 60 (2016) 1–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.022>
- Pi M, Elgowainy A, Kelly J, et al. (2015) *Emissions Modeling: GREET™ Life Cycle Analysis Peer Evaluation*

- Meeting. Argonne National Laboratory. Available at: <https://www.anl.gov/es/lifecycle-analysis>
- Polimeni A and Vietta A, “An approach for solving vehicle routing problem with link cost variability in the time,” vol. 39, pp. 607–621, 2012.
- Rec. Argentina. (2017) El sector de residuos sólidos en la Argentina. <https://www.argentina.gob.ar>
- Rec. Brasil (2017) Gestión de residuos sólidos en Brasil. Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Brasilia. www.icex.es
- Rec. Chile, (2011) Gestión de los residuos sólidos municipales en la ciudad del gran Santiago de Chile: desafíos y oportunidades. Universidad Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería Industrial. Rev. Int. Contam. Ambie. 27(4) 347-355, 2011
- Rec. Colombia (2017), Informe Nacional de Aprovechamiento. Departamento nacional de planeación.
- Rinaldi K. Y., “Application of modified Spatial K’luster Analysis by Tree Edge Removal Method (SKATER) on the level of Crime data in Way Kanan district, Lampung,” Cauchy, vol. 4, no. 4, p. 155, 2017.
- San Pedro Municipality (2014) Contrato y/o título administrativo de concesión de los servicios públicos municipales de recolección y traslado de residuos sólidos urbanos no peligrosos generados en el municipio de San Pedro Garza García, Nuevo León. Municipio de San Pedro Garza García, Dirección de asuntos jurídicos. Available at: <https://www.sanpedro.gob.mx/transparencia/ConcesionesPermisos/concesionesBasura.pdf>
- Santiago R, “Efficient Modularity Density Heuristics in Graph Clustering and Their Applications,” no. June, p. 158, 2017.
- SAT. 2020. “Ley de Impuesto Al Valor Agregado.” 2020. <https://www.sat.gob.mx/ordenamiento/37585/ley-del-impuesto-al-valor-agregado>.
- SEDESOL, “Manual para el diseño de rutas de recolección de residuos sólidos municipales,” México, D.F., 1997.
- SENER. (2017) Balance nacional de energía. Subsecretaría de Planeación y Transición Energética, Dirección General de Planeación e Información Energéticas. www.gob.mx/sener
- Sharholly M and Ahmad K, “Municipal solid waste management in Indian cities – A review,” vol. 28, pp. 459–467, 2008.
- SIMEPRODE Secretaría de desarrollo sustentable (2015). Programa estatal de gestión integral de residuos de nuevo león. Gobierno del estado de Nuevo León. Available at: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/187464/Nuevo_Le_n.pdf

- Son L. H., Louati A., (2016) Modeling municipal solid waste collection: A generalized vehicle routing model with multiple transfer stations, gather sites and inhomogeneous vehicles in time windows. *Waste Management* 52 (2016) 34–49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.041>
- Sousa V, Dias-Ferreira C, Vaz JM, et al. (2018) Life-cycle cost as basis to optimize waste collection in space and time: A methodology for obtaining a detailed cost breakdown structure. *Waste Management and Research*. 36: 788-799. <https://doi.org/10.1177/0734242X18774618>
- Sujauddin M, “Household solid waste characteristics and management in Chittagong, Bangladesh,” vol. 28, pp. 1688–1695, 2008.
- Sulemana A, Donkor EA, Forkuo EK, et al. (2018) Optimal Routing of Solid Waste Collection Trucks:A Review of Methods. *Journal of Engineering*. Volume: 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/4586376>
- Sullivan JL and Gaines L (2010) A Review of Battery Life-Cycle Analysis: State of Knowledge and Critical Needs. Energy Systems Division, Argonne National Laboratory. Available at: <http://www.osti.gov/bridge>.
- Taskin A and Demir N. Life cycle environmental and energy impact assessment of sustainable urban municipal solid waste collection and transportation strategies. *Sustainable Cities and Society*. 61: 102339. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102339>
- Tavares G, Zsigraiova Z, Semiao V, Carvalho M.G., (2009) Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling. *Waste Management* 29 (2009) 1176–1185. doi:10.1016/j.wasman.2008.07.013
- Teixeira C. A., Avelino C., Ferreira F, Bentes I., (2014) Statistical analysis in MSW collection performance assessment. *Waste Management* 34 (2014) 1584–1594. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.007>
- UNFPA. (2014) Estado de la población mundial 2014. Fondo de Población de las Naciones Unidas. www.unfpa.org
- World Bank Group. (2020) Doing Business. Comparing Business Regulation in 190 Economies. Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/32436/9781464814402.pdf>
- Wu B., “An Extended Minimum Spanning Tree method for characterizing local urban patterns,” *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, vol. 32, no. 3, pp. 450–475, 2018.
- Xiao Y, Zhao Q, Kaku I, and Xu Y, “Computers & Operations Research Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 39, no. 7, pp. 1419–1431, 2012.
- Xin Z, Gui-wu J, Ang L, and Ling W, “Economic analysis of waste-to-energy industry in China,” *Waste Manag.*,

vol. 48, pp. 604–618, 2016.