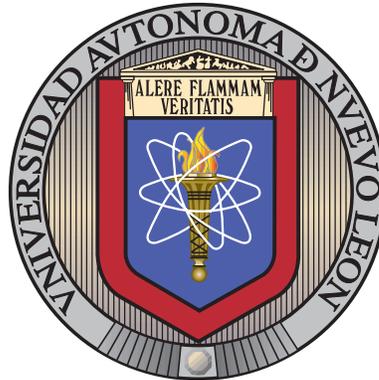


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE CONTENEDORES  
PARA RESIDUOS SÓLIDOS RECICLABLES. CASO  
DE ESTUDIO: MONTERREY, MÉXICO.

POR

DANIELA SIERRA VÉLEZ

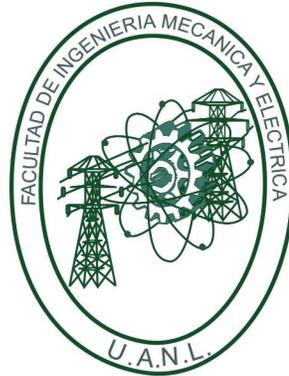
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

NOVIEMBRE 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE CONTENEDORES  
PARA RESIDUOS SÓLIDOS RECICLABLES. CASO  
DE ESTUDIO: MONTERREY, MÉXICO.

POR

DANIELA SIERRA VÉLEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

NOVIEMBRE 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Localización Óptima de contenedores para residuos sólidos reciclables. Caso de estudio: Monterrey, México. », realizada por el alumno Daniela Sierra Vélez, con número de matrícula 1985753, sea aceptada para su defensa como requisito para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

El Comité de Tesis

Dr. Leonardo Gabriel Hernández Landa  
Asesor

Dra. Jania Astrid Saucedo Martinez  
Revisor

MLYCS Johanna Bolaños Zuñiga  
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado

169

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, julio 2021



# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>IX</b>
<b>Resumen</b>	<b>x</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
1.1. Descripción del problema . . . . .	3
1.2. Objetivo . . . . .	4
1.3. Hipótesis . . . . .	4
1.4. Justificación . . . . .	4
1.5. Metodología . . . . .	5
1.6. Estructura de la tesis . . . . .	6
<b>2. Antecedentes</b>	<b>7</b>
2.1. Gestión de residuos sólidos . . . . .	7
2.1.1. Residuos sólidos urbanos valorizables . . . . .	8
2.1.2. Gestión de residuos en México . . . . .	9
2.1.3. Gestión de residuos en Monterrey . . . . .	10

---

2.2. Logística Urbana y Cadena de Suministro de la Gestión de Residuos . . . . .	11
2.2.1. Revisión de normatividad de gestión de residuos en México . . . . .	13
2.2.2. Sistema de ubicación de contenedores actual . . . . .	15
2.2.3. Encuesta de comportamiento de reciclaje en las población . . . . .	18
2.3. Localización de contenedores para residuos sólidos urbanos valorizables	19
2.4. Modelos de localización de instalaciones . . . . .	24
2.4.1. Modelos deterministas clásicos de localización . . . . .	25
2.4.2. Eficiencia y Justicia Espacial . . . . .	25
2.4.3. Accesibilidad . . . . .	26
2.4.4. Enfoques de solución para modelos de localización . . . . .	28
2.5. Sistemas de Información Geográfica . . . . .	30
2.5.1. Grafo de visibilidad y Algoritmo de Floyd-Warshall . . . . .	32
2.6. Resumen y conclusiones del capítulo . . . . .	32
<b>3. Metodología</b>	<b>34</b>
3.1. Aspectos generales de la herramienta metodológica seleccionada . . . . .	34
3.2. Descripción formal del problema . . . . .	36
3.2.1. Accesibilidad . . . . .	40
3.3. Construcción del modelo matemático . . . . .	41
3.3.1. Resumen y conclusiones del capítulo . . . . .	48
<b>4. Resultados</b>	<b>49</b>

---

4.1. Diseño de la experimentación . . . . .	49
4.2. Resultados de la experimentación en Cplex . . . . .	51
4.3. Resultados de la evaluación de la accesibilidad . . . . .	54
4.4. Resumen y conclusiones del capítulo . . . . .	59
<b>5. Conclusiones</b>	<b>61</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	61
5.2. Contribuciones . . . . .	62
5.3. Trabajo a futuro . . . . .	62

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.1. Cadena de suministro de la gestión de residuos . . . . .	12
2.2. Ilustración método de acera . . . . .	16
2.3. Ilustración método punto verde . . . . .	17
2.4. Ilustración método punto central de zona . . . . .	17
2.5. Algoritmo para el cálculo de las rutas de menor distancia . . . . .	31
3.1. Fases de estudio de la investigación de operaciones . . . . .	35
3.2. Ejemplo ilustrativo de intervalos de distancia y cubrimiento . . . . .	37
4.1. Diagrama de cajas y bigotes, tiempos de solución por tamaño de ins- tancias . . . . .	54
4.2. Ruta de recolección A San Pedro Garza García . . . . .	56
4.3. Composición de la Zona A San Pedro Garza Garcia con 75 puntos de demanda y 30 posibles lugares de ubicación de contenedores . . . . .	56
4.4. Resultados de ubicación de contenedores aleatorias con un $d_{min}=300$ y un $d_{max}=450$ . . . . .	58
4.5. Resultados de ubicación de contenedores con herramienta matemática con un $d_{min}=300$ y un $d_{max}=450$ . . . . .	59

# ÍNDICE DE TABLAS

---

4.1. Tipos de instancias utilizados para el problema de localización de contenedores . . . . .	51
4.2. Resultados instancias aleatorias en cuadrícula de 8x8 . . . . .	52
4.3. Resultados instancias aleatorias en cuadrícula de 15x15 . . . . .	52
4.4. Resultados instancias aleatorias en cuadrícula de 30x30 . . . . .	52
4.5. Resultados de la medida de accesibilidad . . . . .	57

# AGRADECIMIENTOS

---

Agradecimientos a México a cada una de las personas que he conocido y lugares que he recorrido, este ha sido una experiencia increíble y este es un país que he llegado a sentir hogar.

Gracias a cada uno de mis profesores y compañeros, de todos aprendí tanto.

Gracias a la Dra. Jania Sucedo, porque desde la distancia siempre atendió a mis dudas de la mejor manera posible y con su buena actitud hizo posible este sueño.

Gracias a el Dr Leonardo Hernandez, por brindarme tantas herramientas y enseñanzas para este proyecto.

Gracias CONACYT, a la Universidad Autónoma de Nuevo León y especialmente a FIME por esta oportunidad. Gracias por invertir en la educación y en el bien para crear conocimiento y bondad en el mundo.

# RESUMEN

---

Daniela Sierra Vélez.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE CONTENEDORES PARA RESIDUOS SÓLIDOS RECICLABLES. CASO DE ESTUDIO: MONTERREY, MÉXICO. .

Número de páginas: 69.

**OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO:** Se estima que en los próximos 30 años la generación de residuos a nivel mundial impulsada por la rápida urbanización y el crecimiento poblacional incrementará en un 70 %. Lo anterior hace necesaria la adopción de medidas que disminuyan el impacto ambiental de los residuos y el reciclaje constituye una de las acciones más eficientes comprobadas para la reducción de los mismos.

La localización correcta de contenedores para disposición de residuos sólidos urbanos valorizables (RUSV) abordada por la logística urbana, tiene la finalidad de optimizar la accesibilidad de la comunidad a los contenedores, siendo este un elemento esencial para garantizar la participación ciudadana en la recuperación de los materiales reciclables. En el presente trabajo se tiene como objetivo la determinación

de la localización adecuada de contenedores para disposición de RSUV en la zona metropolitana de Monterrey Nuevo León, mediante el empleo de una herramienta cuantitativa y el uso de programas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), considerando además factores accesibilidad y regulaciones existentes.

Las herramientas utilizadas para resolver el problema de localización de contenedores de RSUV fueron la programación lineal entera mixta para la codificación del modelo y el algoritmo de *Branch and Bound* para la solución final del código.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: Las contribuciones de este trabajo son la propuesta de una formulación matemática para resolver el problema de localización de contenedores de RSUV considerando factores de accesibilidad como: manzanas cubiertas completamente, manzanas cubiertas parcialmente, eficiencia del camino asignado de cada manzana al contenedor más cercano instalado, tiempo de viaje no cubierto y porcentaje global de RSUV cubiertos por todo el conjunto de contenedores instalados, además de la propuesta de una metodología general para la ubicación de contenedores en ciudades con características similares a las del caso de estudio.

Como conclusión, el concepto de accesibilidad se basa en brindar a las personas mejores oportunidades para acceder a bienes o servicios. En el problema de la ubicación de contenedores para residuos reciclables se desea especialmente lograr esta característica, ya que es un servicio público donde se debe garantizar un acceso igualitario y adecuado a la comunidad, que es también una de las principales razones de la participación ciudadana en las actividades de reciclaje. La formulación matemática propuesta puede obtener soluciones óptimas en menos de 21 minutos para instancias generadas de hasta 450 ubicaciones y 1500 puntos de demanda.

Firma del asesor: \_\_\_\_\_

Dr. Leonardo Gabriel Hernández Landa

—

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

De acuerdo con el último informe del World Bank Group (44), se estima que la generación de residuos sólidos en el mundo, impulsada por la rápida urbanización y el crecimiento poblacional aumentará en un 70 % para el año 2050. Los residuos no degradables como el plástico y otros materiales reciclables son especialmente problemáticos, ya que si no se gestionan correctamente podrían afectar el curso de los ecosistemas durante miles de años. El World Bank Group fue muy enfático durante todo su informe en algo: Es necesario generar medidas urgentes de reducción de residuos.

En México, cerca del 75 % de la basura que se genera termina en los rellenos sanitarios (37), lo anterior trae como consecuencia el colapso de los mismos y hace necesaria la creación de políticas que regulen e incentiven la participación ciudadana en la reducción de desechos. Ejemplo de lo anterior, lo ocurrido en Ciudad de México tras el colapso de los rellenos sanitarios en el 2016, el cual llevo a que se implementara de manera obligatoria la Norma Ambiental 024 del 2013 (38), la cual exige a los ciudadanos realizar la clasificación y disposición separada de los residuos sólidos para que posteriormente la empresa de aseo los recolecte selectivamente. De acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México (39) a un año de la implementación de la norma, se logró la reducción de alrededor de 260,000 toneladas de desechos, sólo por el hecho de que las personas separaran la

basura en casa.

Monterrey, es la capital del estado de Nuevo León y una de las ciudades más industrializadas del país, desde la cual se centraliza la gestión de residuos de los 6 municipios que conforman su zona metropolitana a través del Sistema Integral para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Residuos (SIMEPRODE). Actualmente se genera en la zona metropolitana de Monterrey, 3800 toneladas de basura diaria de acuerdo con estadísticas de SIMEPRODE de las cuales únicamente se logra recuperar el 1.06 %, siendo una de las causas principales de este bajo nivel de recuperación la poca disponibilidad de depósitos accesibles a la comunidad para la entrega de materiales reciclables.

La localización correcta de contenedores para disposición de residuos sólidos urbanos valorizables (RUSV) abordada por la logística urbana, tiene la finalidad de optimizar la accesibilidad de la comunidad a espacios para el depósito de materiales reciclables, siendo este un elemento esencial para garantizar la participación ciudadana en la recuperación de residuos como explica Blanco (2).

De acuerdo a lo anterior, el presente trabajo genera una herramienta cuantitativa para la localización adecuada de contenedores para disposición de materiales reciclables en la zona metropolitana de Monterrey Nuevo León, considerando factores de accesibilidad y regulaciones existentes y haciendo uso además de Sistemas de Información Geográfica.

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema de la investigación se centra entonces en que la ubicación actual de contenedores para disposición de residuos reciclables en la zona metropolitana de Monterrey no es la más adecuada y a su vez no se cuenta con estudios ni herramientas que permitan determinar la localización óptima de dichos contenedores, contemplando factores de accesibilidad a la comunidad y regulaciones existentes.

## 1.2 OBJETIVO

Determinar los puntos de localización óptimos de contenedores para residuos sólidos urbanos valorizables en la zona metropolitana de Monterrey Nuevo León, considerando factores de accesibilidad a la comunidad y regulaciones existentes por medio de la generación de una herramienta cuantitativa y el uso de Sistemas de Información Geográfica.

## 1.3 HIPÓTESIS

Con la utilización de una herramienta cuantitativa y Sistemas de Información Geográfica se puede determinar la ubicación óptima de contenedores para residuos reciclables en la zona metropolitana de Monterrey, de manera que se incremente su accesibilidad de la comunidad dentro de los correspondientes lineamientos establecidos por la ley.

## 1.4 JUSTIFICACIÓN

Ubicar correctamente los contenedores en el paisaje urbano es una tarea esencial de la logística urbana como explica Blanco(2016) (2), en primer lugar, porque para lograr la reducción de residuos por medio de la recuperación de materiales reciclables es indispensable contar con la participación ciudadana en las actividades de separación, clasificación y disposición adecuada y el contenedor es el contacto directo con la ciudadanía y por ende el elemento influyente en dicha participación, en segundo lugar, desde una perspectiva de recolección y almacenamiento de los residuos, la forma en la que se encuentran ubicados los contenedores, está directamente relacionada con el funcionamiento y eficiencia de estos dos procesos como argumenta Vijay et al. (42). Esto además teniendo en cuenta que generalmente los costos de

recolección abarcan entre el 80 % al 90 % o entre el 50 % al 80 % del presupuesto general de gestión de residuos municipales en los países de bajo y mediano ingreso respectivamente como señala Barrena et al.(5), la integración de la correcta ubicación de contenedores con el sistema de transporte y recolección se vuelve uno de los problemas operativos más importantes de resolver.

## 1.5 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente trabajo de tesis se siguió la metodología que se describe a continuación:

En primer lugar, se realizó una revisión de la literatura para determinar de qué manera había sido abordado el problema de localización de contenedores de residuos reciclables en otros trabajos de investigación y entender de manera amplia las características del mismo para así llegar a su correcta descripción.

En segundo lugar, de acuerdo con la información analizada en la revisión de la literatura se eligió el uso de herramientas cuantitativas y Sistemas de Información Geográfica como medios de solución del problema.

En tercer lugar se hizo la formulación del modelo matemático para la ubicación de contenedores de residuos sólidos urbanos valorizables, buscando maximizar la accesibilidad de la población, adoptando para esto algunos conceptos de accesibilidad propuestos por Ibarra, Ozuna y López (19) y Jiménez (22), posteriormente se pasó a la codificación y experimentación con el modelo, determinando así su capacidad de solución con determinados conjuntos de datos experimentales generados aleatoriamente, similares a los espacios reales de la zona metropolitana de Monterrey, en cuanto a área y cantidad de manzanas, pudiendo obtener las soluciones del modelo para espacios comparables a los reales mediante un método exacto.

Posteriormente mediante la aplicación de una herramienta de encuesta de com-

portamientos de reciclaje en la población y haciendo uso de información estadística real y Sistemas de Información Geográfica se probó el modelo con datos reales para finalmente realizar el análisis de la información obtenida y generar conclusiones.

## 1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Este trabajo de investigación está organizado de la siguiente manera: En el capítulo 2 se presenta una revisión de la literatura alrededor de los temas de residuos sólidos urbanos valorizables, logística urbana, localización de contenedores y accesibilidad. En el capítulo 3 se presenta la metodología propuesta para la solución del problema de investigación, la cual contiene la formulación matemática desarrollada, con cada uno de sus componentes. En el capítulo 4 se describe la codificación y experimentación de la herramienta cuantitativa propuesta con datos experimentales generados aleatoriamente, posteriormente en el capítulo 5 se presenta la descripción del método para la generación de información real y los resultados obtenidos con la incorporación de la misma al modelo. Finalmente en el capítulo 6 se presentan conclusiones.

## CAPÍTULO 2

# ANTECEDENTES

---

Este capítulo proporciona antecedentes de literatura para los temas que se estudiarán a lo largo de este trabajo. La primera sección presenta una revisión de la situación actual de la gestión de residuos sólidos urbanos valorizables, la segunda sección aborda una observación general de la literatura en torno al problema de localización de contenedores para residuos reciclables y finalmente la tercera sección presenta un análisis de los métodos y herramientas de solución del problema, entre los cuales se encuentran los modelos de localización y los Sistemas de Información Geográfica.

## 2.1 GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

La generación de desechos es un efecto natural de la urbanización, el desarrollo económico y el crecimiento poblacional (44). A medida que las naciones y las ciudades se vuelven más pobladas y prósperas, ofrecen más productos y servicios a los ciudadanos y participan en el comercio y el intercambio mundial, lo cual repercute proporcionalmente en las cantidades de desechos que se deben gestionar mediante el tratamiento y la eliminación.

Actualmente el mundo genera en promedio 0.74 kilogramos de basura per cápita.

ta diarios de acuerdo con el último informe del World Bank Group (44) y se proyecta un incremento de de dicha generación en un 70 % para el año 2050. La gestión actual de los desechos perjudica la salud humana y contamina los territorios, agravando al mismo tiempo los desafíos que plantea el cambio climático.

En el 2016 se generaron 1,600 millones de toneladas de emisiones de gases de efecto invernadero a partir de la gestión de residuos sólidos (44) . Esto es aproximadamente el 5 % de las emisiones globales, sin mejoras a la administración, se prevé que estas emisiones aumenten a 2,600 millones de toneladas en los próximos 30 años. Más de 80 países se comprometieron a reducir las emisiones a través del histórico Acuerdo de París de 2017 y disminuir la generación de residuos es una forma de contribuir a este esfuerzo.

### 2.1.1 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS VALORIZABLES

Los residuos sólidos urbanos (35) son los que se generan en los hogares, la vía pública o establecimientos como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas como por ejemplo los productos de consumo y sus envases, embalajes o empaques.

El reciclaje constituye una de las acciones más eficientes comprobadas para la reducción de desechos, los materiales reciclables representan una fracción sustancial de la cantidad de residuos generados en el mundo que varía en un promedio por nación de entre 16 % y 45 % dependiendo del nivel de ingresos. Por esta razón en algunos de los países más desarrollados se logra recuperar más del 33 % de los materiales desechados por medio de este método (44).

De acuerdo con Waxman (43) la aparición del concepto moderno de reciclaje se dio por primera vez en el mundo en la década de 1970 con la proclamación del primer Día de la Tierra y la creación de la Agencia de Protección Ambiental en Estados Unidos. Reciclar implica la transformación o aprovechamiento de materiales usados

o desechos para que puedan ser utilizados nuevamente, de esto se deduce que los RSUV son aquellos susceptibles de ser reutilizados.

Los materiales de mayor probabilidad de re-utilización son por excelencia las botellas de plástico, el vidrio, el papel, el cartón y las latas metálicas no contaminadas (3), existen una gran variedad de estudios alrededor del mundo para la recuperación de otro tipo de materiales, sin embargo los cuatro mencionados tienen los métodos de reciclaje más viables y más utilizados en la gran mayoría de países en el mundo.

La propuesta de localización de contenedores del presente trabajo se centra en estos 5 tipos de materiales.

### 2.1.2 GESTIÓN DE RESIDUOS EN MÉXICO

En México se generan diariamente 102,895 toneladas de basura (36), de las cuales cerca del 75 % termina en los rellenos sanitarios (37) lo cual trae como consecuencia el colapso de los mismos, más preocupante aún es que el 20 % de dicha basura es llevada a vertederos no autorizados (44) y tan sólo el 5 % restante logra ser reciclado en el país.

Lo anterior hace completamente necesaria la creación de estrategias políticas y lineamientos que regulen e incentiven la participación ciudadana en la reducción y correcta disposición de desechos. Ejemplo de lo anterior, lo ocurrido en Ciudad de México en el 2016, tras el colapso de los rellenos sanitarios, se implementó de manera obligatoria la Norma Ambiental 024 del 2013 (38), la cual exige a los ciudadanos realizar la clasificación y disposición separada de los residuos sólidos para que posteriormente la empresa de aseo los recolecte selectivamente. De acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México (39) a un año de la implementación de la norma, en julio del 2018 se registró la reducción de alrededor del 10,5 % de la basura llevada a los rellenos sanitarios, lo cual representa 260,000 toneladas de desechos, sólo por el hecho de que los ciudadanos separaran y

depositaran correctamente sus residuos.

En México el ente encargado de velar por la correcta gestión de residuos sólidos es la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Sermanat) (36), la cual por medio del artículo 10 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos establece que los municipios tienen a su cargo y responsabilidad las funciones de manejo integral de residuos sólidos urbanos, que consisten en la recolección, traslado, tratamiento, y su disposición final, lo cual básicamente le da autonomía a cada territorio para realizar su propia gestión.

### 2.1.3 GESTIÓN DE RESIDUOS EN MONTERREY

Monterrey, es la capital del estado de Nuevo León México y una de las ciudades más industrializadas del país, cuyo territorio comprende una superficie de 325 kilómetros cuadrados y una población de más de 1 millón 109 mil habitantes de acuerdo con el INEGI (20), rodeada por 6 municipios que hacen parte de su zona metropolitana entre los cuales se encuentran Ciudad Apodaca, General Escobedo, Guadalupe, Santa Catarina, San Pedro Garza García y San Nicolás de los Garza. Desde Monterrey se centraliza la gestión de residuos de los mismos, a través del Sistema Integral para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Residuos (SIMEPRODE).

Actualmente en la zona metropolitana de Monterrey se generan cerca de 3,800 toneladas de basura diaria de acuerdo con estadísticas de SIMEPRODE (2019) de las cuales únicamente se logra recuperar el 1.06 %, gracias a la clasificación manual de residuos que se ve obligada a realizar la empresa gestora, debido a que los ciudadanos no separan la basura en casa.

Para dicha clasificación manual SIMEPRODE emplea 360 empleados que se dividen en dos turnos diarios; cada día la planta clasificadora tiene la capacidad de recibir 800 toneladas de basura, de las cuales en promedio se logran recuperar al rededor de 60 toneladas de material valorizable, el cual se compacta, se licita y se

vende a plantas a recicladoras; en otras palabras se efectúa una gran cantidad de trabajo para tan solo recuperar el 1,06 %.

Cabe resaltar además que con el 98.04 % restante que termina en el relleno sanitario, SIMEPRODE genera energía eléctrica por medio la captura del gas metano que emiten las celdas de desechos del relleno con la cual alimenta el 80 % del alumbrado público de la zona metropolitana, sin embargo, la eficiencia de este proceso requiere de que los residuos que terminan en el vertedero sean netamente orgánicos, lo cual es completamente difícil de garantizar teniendo en cuenta el bajo porcentaje de recuperación, tanto este proceso como el de reciclaje podría ser mucho más eficiente si se lograra la correcta clasificación y disposición de residuos en la fuente.

SIMEPRODE es un organismo público descentralizado del Estado de Nuevo León, dedicado al procesamiento de desechos sólidos no peligrosos generados en toda el área metropolitana de Monterrey, sin embargo, aunque la disposición final de los residuos de los 7 municipios es centralizada, cada uno realiza la concesión particular a diferentes empresas recolectoras entre las cuales se encuentran Red Ambiental, Red Recolector, S.A de C.V, ente otras.

Existen además algunas iniciativas privadas como el Grupo Allen que fomentan las practicas de reciclaje en la ciudad, por medio de diferentes alianzas con instituciones públicas y la comunidad. Allen ha instalado dos plantas recicladoras en Monterrey en las que logra recuperar cerca del 80 % de sus empaques, en el 2018 llegó a la cifra de 50,000 toneladas de plástico recicladas.

## 2.2 LOGÍSTICA URBANA Y CADENA DE SUMINISTRO DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS

Tipicamente, la cadena de suministro de la gestión de residuos inicia desde la generación de materia prima a partir de fuentes renovables o no renovables y termina

en el relleno sanitario como explican Mahajan y Vakharia (?). En la figura 2.1 se muestra el proceso de la cadena explicado por los autores:

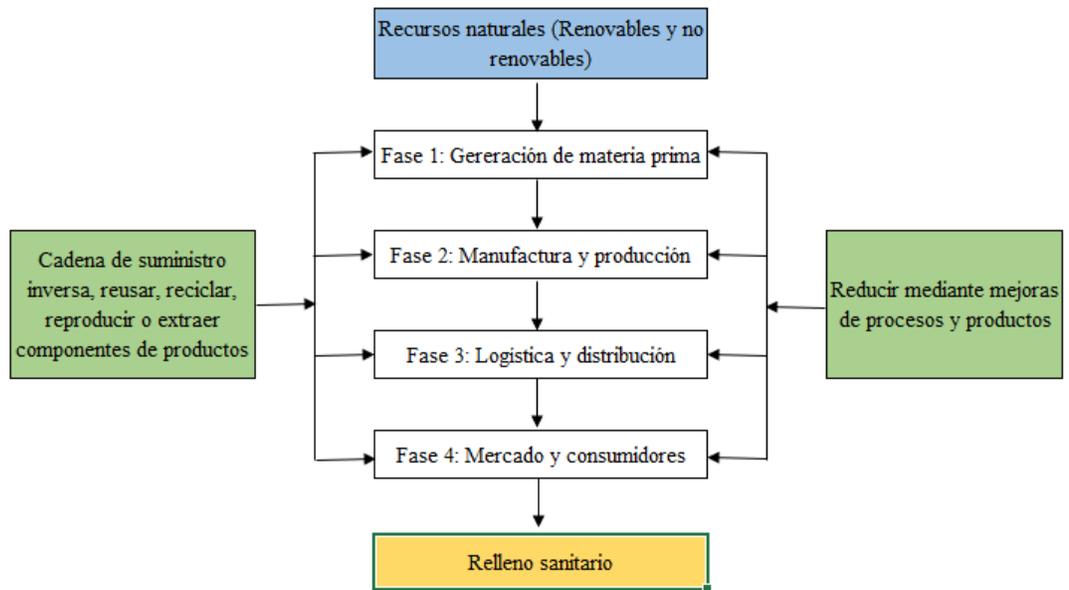


FIGURA 2.1: Cadena de suministro de la gestión de residuos

Fuente: Mahajan y Vakharia (? )

Esta perspectiva explica que en cualquier cadena de suministro, los eslabones de la misma pueden adoptar una posición proactiva (Asociada con disminución) o una posición reactiva (Asociada con reutilización y reciclaje) en torno a los abordajes de reducción de residuos sólidos.

Los autores argumentan que la importancia del enfoque reactivo radica en la generación de oportunidades de rentabilidad, ya que detrás de un sistema organizado de reciclaje de residuos, se encuentra la posibilidad de generar una operación rentable, la cual incluso puede ser abordada por el sector público.

En este sentido, la logística urbana consiste en el estudio, planificación y gestión de todas las operaciones que requiere una ciudad, las cuales son susceptibles de optimización como explica Robusté (33). Desde esta perspectiva, las ciudades se contemplan como unidades de negocio aplicando así principios de eficiencia empre-

sarial a las administraciones públicas, el objetivo de la logística urbana al igual que el de la logística tradicional está orientado a ofrecer el mejor servicio a los clientes, que en este caso son los ciudadanos.

La importancia de la adopción de este concepto por parte de las administraciones públicas es vital teniendo en cuenta que todas las actividades que desarrollan impactan directamente en la calidad de vida de toda la población y por lo tanto se requiere una planificada y correcta prestación de sus servicios. Dentro de estos servicios se encuentra la gestión de basuras la cual a su vez comprende las actividades de ubicación de contenedores para residuos, diseño de las rutas de recolección, almacenamiento en relleno sanitario, transporte y transferencia de desechos, aprovechamiento, localización de centros verdes, entre otras.

El presente trabajo se centrará en la actividad de ubicación de contenedores para disposición de RSUV, ya que para lograr la reducción de residuos por medio de la recuperación de materiales reciclables es indispensable contar con la participación ciudadana en las actividades de separación, clasificación y disposición adecuada y el contenedor es el contacto directo con la ciudadanía y por ende el elemento influyente en dicha participación como explica Blanco (2).

### 2.2.1 REVISIÓN DE NORMATIVIDAD DE GESTIÓN DE RESIDUOS EN MÉXICO

Teniendo en cuenta que la localización de contenedores para residuos sólidos es un tema de dominio público, se hace necesario realizar un revisión a la normatividad aplicable en la zona metropolitana de Monterrey Nuevo León.

El Congreso Nacional de los Estados Unidos Mexicanos (11) por medio de la Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos define a los desechos sólidos urbanos como aquellos generados en las casas habitación, que resultan de

la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados residuos de otra índole. Cabe aclarar que el presente trabajo se aplica únicamente a este tipo de residuos.

Dicha ley además dicta en su artículo 10 la autonomía y responsabilidad de cada municipio por el manejo integral de los residuos sólidos urbanos generados en su territorio, lo cual incluye las actividades de recolección, traslado, tratamiento, y disposición final.

Por su parte el Congreso de Estado de Nuevo León (11) denomina a la Secretaría de Desarrollo Sustentable como responsable de evaluar el impacto y emitir permisos para la ejecución de diversas actividades de gestión integral de residuos, entre las cuales se encuentra la instalación de sitios para disposición de residuos sólidos. De igual forma decreta la obligación del estado, los municipios y a la sociedad en general de prevenir la contaminación del suelo, fomentando la separación de residuos desde su origen, así como el control y la disminución de la generación de los mismos y la incorporación de técnicas y procedimientos para su reutilización y reciclaje.

El Ayuntamiento de Monterrey (3) establece en el Reglamento de Limpia del municipio: Que la Presidencia Municipal dotará a la Secretaría de Servicios Públicos del equipo necesario para la prestación del servicio de limpia. Lo cual incluye la instalación de depósitos en lugares adecuados con capacidad suficiente para la basura y desperdicios generados en la vía pública. Que los propietarios, administradores o encargados de edificios, conjuntos habitacionales o propiedades de régimen en condominio, tendrán la obligación de instalar en el interior de sus predios depósitos suficientes para la basura que se genere, debiendo ser instalados en un lugar que

permita las maniobras para su adecuada recolección. Que la Secretaría de Servicios Públicos, para optimizar el servicio podrá cambiar el sistema de recolección instalando depósitos para los residuos, compatibles con las unidades recolectoras tomando en consideración las necesidades de la comunidad, la densidad de la población y la vialidad para el acceso de los vehículos recolectores.

La Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) (34) en el Manual Técnico sobre Generación y Transferencia de Residuos Sólidos Municipales establece una guía con los procedimientos y cálculos sugeridos para determinar las cantidades de generación de residuos, la composición y el volumen adecuado de los contenedores de almacenamiento. Dichas guía además define los requisitos físicos de los contenedores que se ubiquen en la vía pública, entre los cuales se encuentran: Capacidad suficiente para recibir los residuos generados, resistentes a impactos fuertes, que cuenten con tapa, resistentes a las inclemencias del tiempo, de fácil manejo para su limpieza, mantenimiento y desinfección.

Actualmente en la legislación mexicana no existen restricciones específicas acerca de los lugares donde pueden ser ubicados contenedores ni tampoco requisitos especiales de distancia o servicio, como es el caso de algunos países como la India, donde por reglamento los contenedores para residuos sólidos urbanos deben ubicarse a una distancia máxima de 250 metros de cada zona de demanda y a una distancia máxima de 500 metros con respecto a otro contenedor (16).

### 2.2.2 SISTEMA DE UBICACIÓN DE CONTENEDORES ACTUAL

Desde una perspectiva de recolección, existen tres formas de ubicación de contenedores como explican González y Adenso (17):

Método de acera: Consiste en la ubicación del contenedor afuera de cada hogar donde los ciudadanos dejan sus correspondientes residuos para que posteriormente sean recolectados por el camión en determinados días y horarios, de esta manera

funciona el sistema tradicional de recolección de basura en Monterrey. En la figura 2.2 se presenta una descripción grafica de este método.

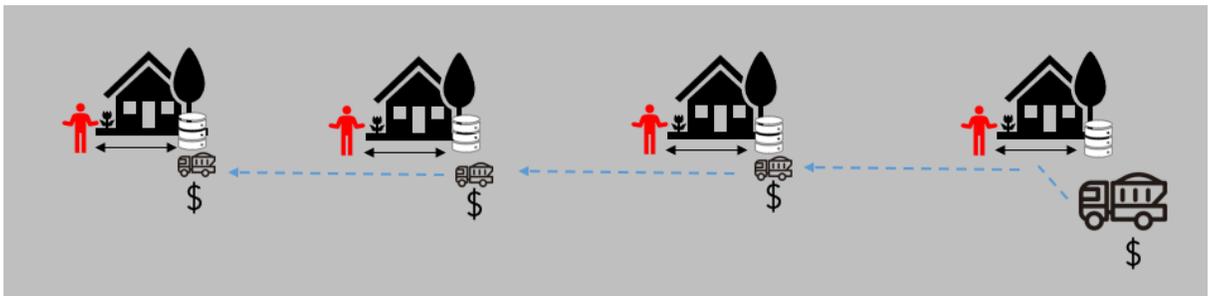


FIGURA 2.2: Ilustración método de acera

Fuente: Elaboración propia

Esta es la forma de ubicación que mayor probabilidad de participación ciudadana tiene debido a que representa la menor distancia y esfuerzo a ejercer para la disposición de basuras, sin embargo, es a su vez la más costosa en cuanto a la recolección. Actualmente se dispone de 750 camiones de basura para la recolección diaria de residuos de acuerdo con SIMEPRODE (14) :

Método de punto verde: Consiste en la ubicación de contenedores en un número limitado de lugares dentro de la ciudad, en ocasiones altamente transitados como por ejemplo plazas comerciales y supermercados para que los ciudadanos separen los residuos reciclables en casa y los lleven hasta estos lugares y a cambio reciban algún tipo de incentivo, actualmente unas pocas iniciativas públicas y privadas realizan este tipo de ubicación en la zona metropolitana motivando la participación con vales de despensa y productos de aseo, sin embargo, aunque esta es la forma de ubicación de contenedores más económica en cuanto a la recolección, es la que sugiere la menor probabilidad de participación ciudadana debido a que representa mayores distancias y esfuerzo por parte del consumidor final para la separación y disposición de los residuos reciclables. Actualmente el Grupo Allen cuenta con 17 máquinas de acopio instaladas en diferentes puntos del área metropolitana de Monterrey para la recolección y recuperación de PET. En la figura 2.3 se presenta una descripción grafica de este método.

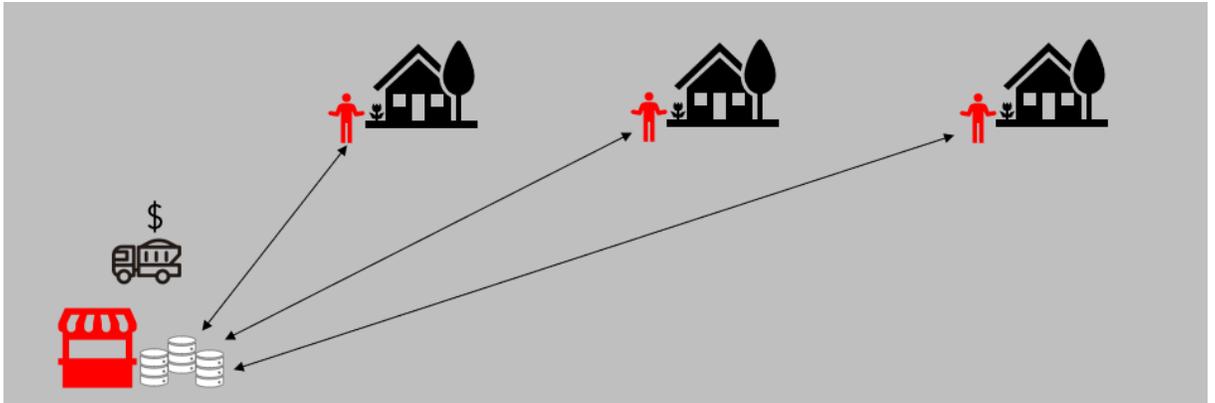


FIGURA 2.3: Ilustración método punto verde

Fuente: Elaboración propia

Punto central de zona: Consiste en la ubicación de contenedores en lugares estratégicos que reúnan varios puntos de demanda, por ejemplo en una colonia, este método puede lograr un equilibrio entre participación ciudadana y costos de recolección, de manera que no sea tan costosa su aplicación como el método de acera y que a su vez mediante el establecimiento de un radio de cobertura específico se garantice cierto grado de participación ciudadana. Sin embargo, actualmente, no existen este tipo de ubicaciones de contenedores en la zona metropolitana, principalmente porque requieren de estudios con los que tampoco se cuenta. En la figura 2.4 se presenta una descripción gráfica de este método.

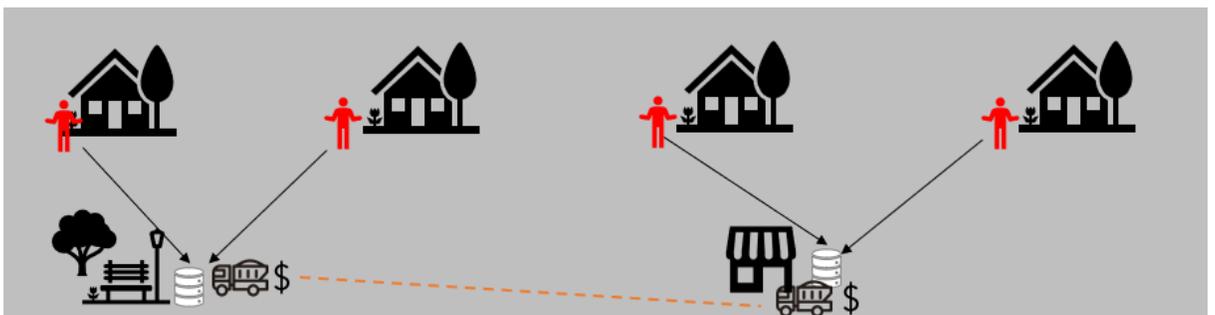


FIGURA 2.4: Ilustración método punto central de zona

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.3 ENCUESTA DE COMPORTAMIENTO DE RECICLAJE EN LAS POBLACIÓN

Además de la revisión de la normatividad relevante en cuento al tema de ubicación de contenedores, es importante además conocer las características de la población respecto a comportamientos en torno al reciclaje, centrándose únicamente en las de interés logístico, de esta forma se podría determinar por ejemplo, el porcentaje esperado de la población que participaría en las actividades de separación y disposición adecuada de los residuos, además de las distancias máximas que estarían dispuestos a caminar y la frecuencia con la que estarían dispuestos a depositar su basura, teniendo en cuenta que esta información puede llegar a ser necesaria para la aplicación correcta de la herramienta de solución del problema.

En la literatura se han encontrado diversos autores que proponen una metodología para la aplicación de encuestas con el objetivo de encontrar factores que determinen la participación de la población en reciclaje. A continuación se mencionan algunos:

Hage et al. (28) analizan los factores determinantes en los esfuerzos de reciclaje de los hogares de Suecia centrandó su atención en los residuos de empaques como plástico, vidrio papel y metal. Los autores diseñaron y enviaron el instrumento de encuesta a 2800 hogares distribuidos en 4 municipios de Suecia por medio de correo certificado, recibiendo la respuesta de 879 hogares. La investigación determinó que cuando el contenedor de RSUV se encuentra ubicado dentro de los límites de las propiedades, la probabilidad de que las personas reciclen incrementa en un 28 %.

Rojas et al. (13) aplican un cuestionario de 35 preguntas a 797 individuos en la ciudad de Valencia España para estudiar el fenómeno de la influencia de la distancia entre el domicilio y los contenedores de recogida selectiva para los envases de vidrio, papel, cartón, plástico, briks, bandejas de corcho y latas y su frecuencia de separación, la encuesta es aplicada de manera presencial y aleatoria en la calle abordando

transeúntes. La conclusión principal de la encuesta determina las probabilidades de mayor participación de los ciudadanos en el reciclaje con respecto a la distancia al contenedor. Así, cuando el contenedor se encuentre a menos de 50 metros, el 82 % de la población reciclará, entre 51 y 200 metros, el 37 % reciclará y a una distancia de ubicación del contenedor de más de 200 solo el 7 % de la población participará.

Finalmente Babaei et al. (4) aplican un cuestionario a 2400 hogares de Abdan Irán de manera presencial, para evaluar el conocimiento, prácticas y actitudes respecto a la reducción de residuos sólidos, de allí, mediante un análisis de correlación, determinan los factores de influencia directa en la disposición a reciclar entre otras conclusiones determina que el 99 % de la población no participa en el reciclaje cuando el contenedor no se encuentra accesible por la distancia.

### 2.3 LOCALIZACIÓN DE CONTENEDORES PARA RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS VALORIZABLES

A pesar de ser un factor completamente significativo en el logro exitoso de la gestión de residuos sólidos, el problema de localización de depósitos o contenedores para almacenamiento de residuos en general no ha sido un tema ampliamente estudiado de acuerdo con Purkayastha et al. (32). Debido a esto, a menudo la estimación de la generación y asignación de residuos es abordada incorrectamente durante la planificación y diseño de los sistemas de recolección y por ende el tipo, tamaño y ubicación de los contenedores son inadecuados.

Vijay et al. (42) explican que la mayoría de los estudios de gestión de residuos se centran en el transporte vehicular de desechos y aunque no cabe duda que este proceso es de suma importancia y criticidad por involucrar vehículos y maquinaria pesada, su eficiencia depende de la ubicación correcta de los contenedores o depósitos, así como de la frecuencia de eliminación de residuos deseada.

Purkayastha et al. (32) realiza una revisión detallada de la literatura en torno al tema de localización y asignación de contenedores tanto para residuos sólidos ordinarios como para residuos reciclables, teniendo en cuenta esta revisión además de la inclusión de otras investigaciones, a continuación se presenta un análisis y sinopsis los artículos que guardan mayor relación con la investigación que se pretende realizar en el presente trabajo.

Chang y Wei (10) proponen un plan estratégico para asignar estaciones de recogida de reciclaje de tamaños correspondientes a la generación identificada por sector y también diseñan la ruta de recolección más eficiente para los contenedores de reciclaje buscando maximizar la población atendida, minimizar la distancia a pie de un hogar a cada contenedor y minimizar la distancia de la ruta de recolección, el caso de estudio es desarrollado en Kaohsiung Taiwán. Para resolver el problema los autores utilizan un modelo de programación entera mixta no lineal multiobjetivo solucionado por medio de la aplicación de algoritmos genéticos programado en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Gautam y Kumar (16) establecen una evaluación multiobjetivo en un entorno SIG para obtener el número, tamaño y ubicación de los contenedores de reciclaje en una población de la India. Para esto delimitan el área estudio del sistema de recolección de residuos en el entorno SIG, posteriormente cargan la información de la red de carreteras en donde ubican los posibles lugares de instalación de contenedores, luego dividen el área en zonas de acuerdo a cuatro diferentes niveles de ingresos, estas representan sus puntos de demanda, de allí utilizan la información de densidad poblacional para calcular en el SIG la cantidad de habitantes por zona, para la caracterización física de los desechos de la ciudad, es decir las cantidades generadas y el porcentaje de habitantes que participaran en las actividades de reciclaje, realizan ciertos supuestos, finalmente proponen la utilización del modelo clásico de  $p$  mediana para minimizar la distancia total desde todos los puntos de demanda hasta su contenedor más cercano. De esta manera los autores logran garantizar que ningún residente tenga que recorrer una distancia de más de 250 metros para llegar a un

contenedor y que la distancia entre dos contenedores no sea superior a 500 metros de acuerdo con los lineamientos establecidos por la Organización Central de Salud Pública e Ingeniería Ambiental (CPHEEO) en India.

Bautista y Pereira (6) desarrollan el problema de ubicación de áreas de recolección de materiales reciclables mediante la formulación de un modelo basado en el problema clásico de cobertura de conjuntos y uno basado en el problema MAX-SAT, posteriormente programan un algoritmo genético y una heurística GRASP para resolver cada formulación respectivamente. Finalmente, la calidad de los algoritmos se prueba en una experiencia computacional en un entorno SIG con instancias reales del área metropolitana de Barcelona España, además utilizan un conjunto reducido de instancias de cobertura de conjuntos encontrados en la literatura.

Vijay et al. (42) desarrollan un procedimiento para la estimación precisa de la generación de residuos sólidos en un territorio de la India y calculan el tipo y tamaño de los contenedores a ubicar para un área de estudio con una superficie de 4  $km^2$ . Los autores emplean una metodología similar a la de Gautam y Kumar (16), con la variante de que los puntos de demanda elegidos corresponden a las calles que componen la red de carreteras del área de estudio y las intersecciones entre dichas calles son elegidas como los posibles lugares de ubicación de los contenedores, adicionalmente calculan la capacidad requerida de los contenedores asumiendo que los puntos de demanda siempre se acercaran al contenedor más cercano. De igual forma los autores emplean el modelo de *P-mediana* como método de solución mediante la programación en un entorno SIG y siguen los lineamientos establecidos por CPHEEO.

Kao, Wen, y Liu (23) consideran los factores distancia promedio del servicio (la distancia entre el hogar y el depósito de reciclaje más cercano), la relación LS (relación entre los hogares locales que reciben el servicio) y la relación del servicio (la relación de los residentes que reciben un servicio a una distancia aceptable) para optimizar la ubicación del depósito de reciclaje. Abordan el problema utilizando

cuatro modelos cuyo objetivo es el de minimizar la suma o la distancia promedio entre cada hogar y el depósito de reciclaje más cercano siguiendo el modelo clásico de localización de  $p$  centro. El caso de estudio fue conformado por 15 distritos en las regiones del este de la ciudad de Hsinchu, Taiwán, con un área total de  $21.28 \text{ km}^2$ , 18,280 hogares y 58,379 residentes.

Blanco (2) desarrolla una metodología para la localización óptima y diseño de la ruta de recolección de contenedores para residuos reciclables en la localidad de Alcalá Henares, España, con una extensión de  $87,7 \text{ km}^2$ . Haciendo uso del software SIG determina las zonas de demanda y elige como puntos candidatos para ubicación de los contenedores las intersecciones entre calles, posteriormente utiliza la información estadística de la generación de residuos per cápita y la densidad poblacional para hallar la generación de residuos en kilogramos por zona, con esta información y haciendo uso de del peso volumétrico de cada material calcula los volúmenes generados por punto de demanda para así establecer el tamaño de contenedor más apropiado, posteriormente teniendo en cuenta la disponibilidad 610 contenedores para vidrio y 475 para cartón en la localidad codifica el software SIG con el objetivo de maximizar asistencia, el cual asigna un mayor peso a los hogares que se encuentren más cercanos al contenedor teniendo en cuenta que a mayor distancia menor probabilidad de participación. Con la solución del código Blanco(2) determina que independientemente de la distancia, la población cubierta por los contenedores ubicados será del 99%; pero no toda reciclara por igual. Finalmente logra posicionar los contenedores de tal forma que la distancia máxima a pie a un contenedor será de 200 metros, atendiendo el estudio de Rojas et al.(13) donde se determina la distancia máxima que un ciudadano en el territorio de España está dispuesto a caminar para depositar sus residuos reciclables es de 200 metros.

Barrena et al.(5) diseñan un modelo matemático de programación lineal entera derivado del problema clásico de cobertura parcial de conjuntos con el objetivo de disminuir el costo de ubicación de contenedores en un contexto de recolección selectiva de residuos sólidos urbanos. Para la solución del modelo emplean una heurística

mediante la programación de un algoritmo voráz. Para evaluar el desempeño de la metodología desarrollada, llevan a cabo una experiencia computacional en un entorno SIG simulando un espacio urbano inspirado en una zona perteneciente al área de Sevilla, España. Algo interesante de estos autores es que el modelo considera la ubicación de distintos tipos de contenedores dependiendo del residuos de generación que predomine en la zona a cubrir, se consideran costos de instalación de un contenedor y a diferencia de los otros vistos en la literatura, no considera puntos de ubicación potenciales, sino que define que en todas las zonas de demanda debe ubicarse al menos un contenedor que las cubra lo que varía es el número de contenedores y el tipo.

Es necesario resaltar la total coincidencia de los métodos de solución en el uso de modelos matemáticos de localización de instalaciones y Sistemas de Información Geográfica, el 100 % de los autores estudiados utilizaron la programación de modelos matemáticos de localización para la descripción del problema, lo que varió para cada caso fue el método de solución utilizado, por su parte el 42 % de las investigaciones revisadas, lograron hallar la solución al problema de localización de contenedores mediante un método exacto y el otro 58 % mediante un método heurístico. Igualmente el 100 % de los autores usaron SIG para la programación de los parámetros del modelo. A continuación la tabla 2.3 presenta un resumen de los autores estudiados.

<b>Autores</b>	<b>Modelo de localización</b>	<b>Solución exacta</b>	<b>Heurística</b>	<b>SIG</b>
Chang y Wei (1999)	X		X	X
Gautam y Kumar (2005)	X		X	X
Bautista y Pereira (2006)	X		X	X
Vijay (2008)	X	X		X
Kao, Wen y Liu (2009)	X	X		X
Blanco (2016)	X	X		X
Barrena (2019)	X		X	X
Porcentajes	100 %	42 %	58 %	100 %

Debido a la coincidencia de modelos de localización de instalaciones y SIG en

cada uno de los autotres estudiados, a continuación se estudiarán más a fondo estos conceptos.

## 2.4 MODELOS DE LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES

La localización de instalaciones es un aspecto crítico de la planificación estratégica de una gran cantidad de servicios públicos y privados como expresan Owen y Daskin (30), por esta razón una amplia gama de literatura se ha desarrollado en torno a la solución de este desafío para el cual se han aplicado herramientas de investigación de operaciones y más específicamente en su gran mayoría modelos de programación lineal entera mixta.(12)

Los problemas de localización corresponden a formulaciones matemáticas cuyo objetivo es identificar la ubicación geográfica óptima para las instalaciones en función de la distribución de la demanda y otra variedad de factores que varían de acuerdo al interés particular de ubicación.(30)

A medida que se ha desarrollado el problema han aparecido nuevos aspectos a considerar en las formulaciones, de allí los problemas de localización pueden clasificarse en probabilistas o deterministas. (30)

Los modelo probabilistas se caracterizan por tomar los parámetros de entrada del modelo como inciertos, por lo cual las soluciones que derivan pueden variar de acuerdo a escenarios planteados y presentan variables aleatorias.

Por su parte, los modelos deterministas se caracterizan por tomar parámetros constantes y conocidos como entradas y obtener una solución única, la cual se elige de acuerdo con uno de los muchos objetivos que se busquen (30). Varios investigadores, particularmente aquellos que trabajan con problemas aplicados o que tienen interés en localizar instalaciones indeseables, han estudiado extensiones de criterios múltiples de este tipo de modelos.

### 2.4.1 MODELOS DETERMINISTAS CLÁSICOS DE LOCALIZACIÓN

*P – mediana:* Consiste en la ubicación de un número determinado de instalaciones  $P$  buscando minimizar la distancia total ponderada entre la demanda y las instalaciones (30), este tipo de formulación puede ser apropiada en casos en los que la demanda no es sensible al nivel de servicio o a la accesibilidad.

*P – centro:* Busca minimizar la distancia máxima entre cualquier zona de demanda y su instalación más cercana (30), es decir, busca minimizar el peor caso posible de distancia entre dos puntos, esta formulación a diferencia de la *p–mediana*, puede lograr asegurar un mejor nivel de cobertura al observar cada zona de demanda en particular, aunque esto no necesariamente asegura una distancia aceptable para todos los puntos de demanda.

*Máxima cobertura:* Tiene la finalidad de maximizar el total de zonas de demanda cubiertas con un determinado número de instalaciones en una distancia máxima aceptable (22). Como variante a este problema, existe el de máxima cobertura con restricción obligatoria de cercanía, el cual busca que no haya demanda más allá determinado radio máximo de distancia y que a su vez la mayor cantidad de zonas cubiertas se encuentren dentro de un radio mínimo. Sin embargo en ocasiones ciertos tipos de instalaciones requieren que sean tomados en cuenta otros criterios además de la distancia. A continuación, se estudian otro tipo de criterios observados en la literatura.

### 2.4.2 EFICIENCIA Y JUSTICIA ESPACIAL

Bosque, Gómez y Palm (9) introducen los conceptos de eficiencia y justicia espacial, los cuales son magnitudes generales que consideran los modelos de localización de acuerdo a su objetivo:

La eficiencia espacial hace referencia al volumen global de desplazamientos que

el conjunto de la demanda debe efectuar para utilizar las instalaciones y lo que busca es minimizar dicho volumen (9), este concepto se encuentra completamente relacionado con el modelo clásico de p-mediana.

Por su parte la justicia espacial hace referencia al grado de accesibilidad igualitaria de los puntos de demanda a los servicios que presta cada instalación (9), el cual depende de varios factores como la variabilidad de las distancias desde cada punto a su instalación más cercana, concepto relacionado con los modelos de máxima cobertura o p-centro, además la capacidad de oferta de la instalación y la disponibilidad de sus servicios. La importancia de la justicia espacial se destaca, como se cita en Jiménez (22) en caso de los servicios ofrecidos por la administración pública debido a que al ser financiados por la población todos tienen igualdad de derechos a usarlos en las mismas condiciones de accesibilidad.

### 2.4.3 ACCESIBILIDAD

Paéz, Scott y Morency (31) definen la accesibilidad como el potencial para alcanzar o participar en oportunidades que se encuentran espacialmente distribuidas. Por su parte Miller (29) explica que la accesibilidad incluye intrínsecamente medidas de:

Impedancia: Facilidad o dificultad para viajar a diferentes puntos en el espacio.

Atractivo: Conveniencia, capacidad o calidad de las oportunidades

Integración de las oportunidades en el espacio: Ponderadas por la facilidad de interacción, de esta forma las oportunidades que están más cerca o más accesibles, tienen mayor peso que otras con menor accesibilidad.

Bocarejo y Oviedo (8) establecen la relación directa entre los medios de transporte y la accesibilidad definiendo esta como la facilidad de llegar a los destinos deseados dado un número de oportunidades disponibles y la impedancia característica

de los recursos o medios utilizados para viajar desde el origen hasta el destino. En otras palabras, la accesibilidad va más allá de de la cercanía de las oportunidades, ya que además de una distancia aceptable, debe existir un medio viable para llegar a las mismas. Es por esto que una gran variedad de autores han aumentado la visión de accesibilidad más allá de términos de distancia, tiempo o número de instalaciones disponibles y han agregado y desarrollado nuevos indicadores al enfoque de acuerdo con las características del problema tratado, construyendo así un teoría más amplia sobre accesibilidad (8).

Algunos de los indicadores que se han utilizado para medir la accesibilidad son: Los basados en infraestructura, los cuales analizan las características del suministro en términos de capacidad y nivel de servicio; los basados en el transporte, lo cuales analizan el cubrimiento, la capacidad y la calidad de los medios , los basados en las personas, medidos en términos de espacio tiempo y teniendo en cuenta la facultad que tiene un persona para realizar una actividad (8). Sin embargo el uso de estos indicadores u otros nuevos depende realmente de las condiciones de la situación analizada es por esto no existe una medida de accesibilidad general de acuerdo con Makrí y Folkesson (25).

El enfoque típico para abordar el problema del mejoramiento de la accesibilidad de las personas a los servicios ha sido la solución de problemas de optimización (19) los cuales en su gran mayoría son formulados mediante programación lineal entera mixta (30).

Al respecto Ibarra-Rojas, Ozuna y López-Piñon (19) proponen un modelo de programación lineal entera mixta para la localización de instalaciones maximizando la medida de accesibilidad de la demanda, para esto, los autores integran al problema clásico de máxima cobertura, considerando dos radios de cercanía y movilidad y 6 indicadores de accesibilidad que corresponden a: El número de zonas cubiertas por el radio de menor distancia, el número de instalaciones que se encuentran dentro del radio de mayor distancia con respecto a un punto de demanda, la impedancia del

viaje, la distancia o tiempo de viaje no cubierto, el número de zonas no cubiertas por una instalación y la desagregación espacial. Los autores prueban la capacidad de un software comercial para hallar la solución óptima del problema en un tiempo razonable con instancias gran tamaño generadas aleatoriamente. Un modelo similar y los mismos indicadores de accesibilidad basados en Ibarra-Rojas, Hernández y Ozuna (18) son usados por Jiménez (22) para localizar instalaciones en respuesta a situaciones de emergencia, por su parte utiliza un software comercial de para hallar la solución óptima de instancias pequeñas y propone un metodo heurístico para instancias más grandes.

#### 2.4.4 ENFOQUES DE SOLUCIÓN PARA MODELOS DE LOCALIZACIÓN

Como ha sido mencionado en las secciones anteriores, los modelos de localización comúnmente han sido formulados en la literatura utilizando programación lineal entera mixta. Sin embargo, construir o diseñar el modelo matemático apropiado es solo el primer paso del proceso del análisis del problema, el siguiente desafío y a menudo el más profundo, es identificar la solución óptima de acuerdo con Current, Daskin y Schilling (12), la cual está relacionada con la complejidad computacional del problema tratado.

La complejidad computacional de un problema matemático se refiere la eficiencia de los algoritmos en función de los recursos requeridos para resolver un problema, como son el tiempo de ejecución y el espacio requerido en la computadora o almacenamiento de datos como explica Benítez (7), de esta forma los problemas pueden ser clasificados de acuerdo a su dificultad para hallar la solución, lo cual resulta completamente importante a la hora de buscar el algoritmos más eficientes.

Maldonado y Gómez (26) indican que en general pueden identificarse dos tipos de problemas: Computables y no computables. Los problemas computables se divi-

den a su vez entre problemas que pueden resolverse con un algoritmo comprobado en un tiempo polinomial conocidos en la literatura como problemas P (P de polinomial) y aquellos que pueden resolverse de forma aproximada con algoritmos no deterministas en un tiempo exponencial conocidos como problemas NP-Completo (NP de no polinomial) o bien problemas para los cuales ni siquiera se conoce un algoritmo para su resolución llamados NP-Hard. Esto obliga a que las aplicaciones para resolver dicho tipo de problemas vayan más allá de la lógica matemática, dirigiéndose hacia la lógica computacional, razón por la cual con el pasar de los años se han ido generando software comerciales para la solución de problemas matemáticos.

Los problemas de localización son en su totalidad NP, el identificar si son NP-Completo o NP-Hard depende generalmente de las instancias o características del problema, como consecuencia resolver un problema de localización de instalaciones consta en primer lugar de idear o utilizar métodos para identificar soluciones óptimas y, en su defecto, al no ser esto posible tratar de diseñar o utilizar métodos para encontrar soluciones factibles (12).

Típicamente, uno de los primeros enfoques para encontrar la solución óptima de problemas de localización consiste en aplicar algoritmos ampliamente conocidos en la literatura, como por ejemplo *Branch and Bound* y *Branch and Cut* (12), los cuales básicamente aplican estrategias de división del problema original con el fin de disminuir el espacio de búsqueda general en espacios de menor tamaño para los cuales encontrar la solución óptima sea más sencillo (21). La división se realiza sucesivamente hasta que la solución de cada subespacio sea entera. Paralelamente se realiza una exploración que consiste en comparar las soluciones parciales para cada uno de los subespacios generados descartando las que no cumplan con el objetivo general, de esta forma se puede hallar el óptimo global como la mejor solución entre las encontradas en cada uno de los subespacios (21). Actualmente una gran variedad de software comerciales de optimización se encuentran codificados con base en estos algoritmos como es el caso de Cplex, Gurobi, entre otros (27), los cuales constituyen herramientas de gran utilidad para encontrar la solución del modelo matemático que

se propone para el presente trabajo.

## 2.5 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Como pudo observarse en la revisión de modelos de localización, existe una gran cantidad de enfoques para formular cada problema, los cuales dependen básicamente de las características de la situación analizada, sin embargo, comúnmente en todos los casos hay cierto tipo de información que requiere ser conocida previamente, como por ejemplo la distribución o ubicación de la demanda, los posibles lugares de localización de las instalaciones y la distancia comprendida entre cada punto de demanda y cada posible punto de oferta.

Los SIG son herramientas de información computarizada que capturan, almacenan, actualizan, manipulan, analizan y muestran información geográficamente referenciada como explica Selvam et al. (40). Un SIG es esencialmente una base de datos, pero con la diferencia importante de que toda la información que posee se encuentra vinculada a una referencia geográfica espacial, ya sea latitud, longitud u otras coordenadas. Los SIG se alimentan de información oficial de censos poblacionales, investigaciones o estudios de mercado consolidados, en donde a cada conjunto de datos con respecto a un territorio en específico se le llama capas, las cuales pueden ser consultadas o llamadas cuando se requieran.

Teniendo en cuenta lo anterior, los SIG se han convertidos en aliados naturales para la toma de decisiones respecto a los temas de localización, razón por la cual, han sido ampliamente utilizados en los problemas de localización en general y específicamente en la ubicación de contenedores para RSUV como pudo visualizarse en la sección 2.3. Su amplia utilidad además ha llevado a la creación de librerías especiales para el intercambio de datos e integración de SIG y software de optimización.

Benítez (7) utiliza el software de programación R y los paquetes de integración SIG para encontrar la menor distancia de recolección de los residuos sólidos urbanos

en la zona metropolitana de Monterrey Nuevo León para los camiones de recolección. Como primer paso, el autor importa las capas de municipios, colonias y vialidades del territorio, posteriormente al delimitar el área de análisis transforma las vialidades en nodos de la red vial, dichos nodos son a su vez transformados en coordenadas para calcular la matriz de distancias entre todos los nodos y finalmente se hace uso del modelo TSP para calcular la distancia más corta. El algoritmo seguido por Benítez (7) se muestra en la Figura 2.5:

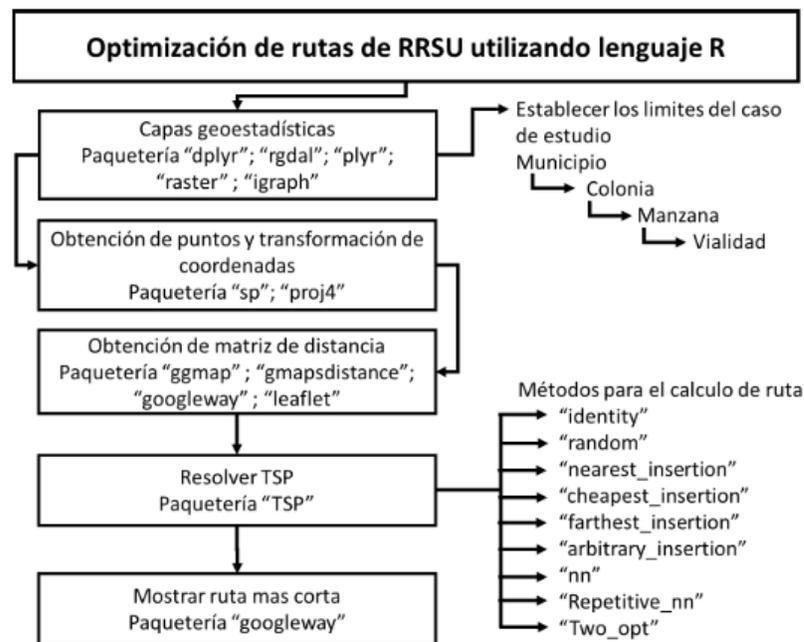


FIGURA 2.5: Algoritmo para el cálculo de las rutas de menor distancia

Fuente: Reyes Benítez Bravo (7)

El algoritmo utilizado por el Benítez (7) constituye una herramienta de gran utilidad para el cálculo de las distancias entre los puntos de demanda que se contemplan en el presente trabajo y los posibles lugares de localización de los contenedores. Teniendo en cuenta que dichas distancias no pueden ser euclidianas, si no que deben considerar los caminos entre calles, es necesario hacer uso de una herramienta adicional que lo permita.

Al respecto (24) Khaili explica que en la planificación de caminos, cuando

existen obstáculos estáticos, una condición necesaria es la construcción de la ruta mediante una secuencia de segmentos de línea que conectan un subconjunto de puntos visibles entre dichos obstáculos. Varios algoritmos han sido desarrollados para este propósito y el más conocido es el Grafo de Visibilidad.

### 2.5.1 GRAFO DE VISIBILIDAD Y ALGORITMO DE FLOYD-WARSHALL

Dado un conjunto de obstáculos con forma poligonal en un plano, el grafo de visibilidad es aquel en el cual cada nodo representa un vértice de los polígonos y las aristas son las conexiones visibles entre dichos vértices de tal forma que el segmento de recta que conecta los vértices correspondientes en el plano no se intersecte con ningún polígono u obstáculo (24). Sin embargo, lo anterior puede llegar a generar diferentes caminos visibles desde un mismo punto de origen hasta un mismo punto destino por lo cual se requiere elegir la mejor ruta posible, que en la mayoría de ocasiones es por lo general la ruta más corta, al respecto Aini y Salehipour (1) explican que cuando se trata del cálculo de los caminos más cortos entre un conjunto de parejas de nodos origen y nodos destino el que ha probado ser el algoritmo más eficiente en la literatura es el de Floyd-Warshall, el cual consiste en la comparación de todos los posibles caminos a través del grafo entre cada par de vértices, de tal forma que paulatinamente se vaya estimando el camino más corto entre dos vértices, descartando o eligiendo aristas hasta que se llega a la estimación óptima (1).

## 2.6 RESUMEN Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se realizó una revisión detallada de la literatura y normatividad en torno al tema de localización de contenedores para residuos sólidos urbanos reciclables, a continuación se describen las conclusiones generadas a partir de la

información obtenida:

Mediante el análisis inicial de la gestión de residuos sólidos actual, se pudo visualizar el panorama en cuanto a cantidades de generación y porcentajes de recuperación, además se estableció la definición de residuos sólidos urbanos valorizables.

Por otra parte, mediante el estudio de la normatividad aplicable al proyecto, se logró determinar las restricciones en cuanto a ubicación de contenedores y la metodología para calcular el volumen de capacidad requerido.

La revisión de la literatura específica de localización óptima de contenedores para residuos reciclables permitió observar que las herramientas más utilizadas para la solución del problema son el uso de modelos matemáticas de localización y SIG. Los modelos matemáticos de localización presentan una gran variedad de enfoques de acuerdo a las características de la situación tratada, generalmente cuando se aborda la ubicación de instalaciones de servicio público, como es el caso de los contenedores, lo que se busca lograr es la maximización de la accesibilidad a dichos puntos, por lo que un modelo de localización que considere medidas de accesibilidad puede representar un adecuado método de solución para el presente trabajo.

Por su parte, teniendo en cuenta las nociones de complejidad estudiadas y los métodos de solución para problemas matemáticos de localización, el primera paso será el de intentar la solución por medio de un método exacto, mediante la utilización de un software de programación y de allí se partira, evaluando si es necesario desarrollar un método de solución más complejo.

## CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍA

---

Este capítulo proporciona una descripción de la metodología de solución aplicada para el desarrollo del presente trabajo. La primera sección presenta la introducción general de la herramienta seleccionada, la segunda sección muestra la delimitación formal de las características consideradas para el diseño de la herramienta, finalmente la tercera sección explica detalladamente la formulación matemática propuesta.

### 3.1 ASPECTOS GENERALES DE LA HERRAMIENTA METODOLÓGICA SELECCIONADA

Los argumentos presentados en las secciones 2.3 y 2.4 permitieron demostrar la utilidad de la implementación de un modelo matemático de localización como herramienta de solución principal del problema tratado en el presente trabajo.

Los modelos matemáticos de localización, son en su gran mayoría formulaciones de programación lineal entera mixta que forman parte de las herramientas de investigación de operaciones como se explica en la sección 2.4.

En general, la investigación de operaciones comprende una serie de 5 fases principales de desarrollo para la implementación de cualquier herramienta cuantitativa

de acuerdo con Taha (41), dichas fases que se muestran a continuación constituyen el proceso metodológico seguido:

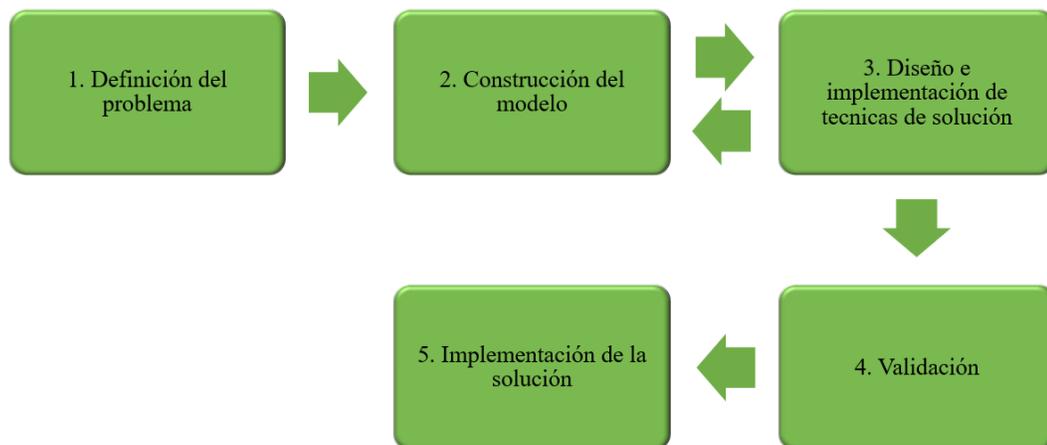


FIGURA 3.1: Fases de estudio de la investigación de operaciones

Fuente: Elaboración propia

La definición del problema implica delimitar el alcance de la situación que se investiga, la construcción del modelo traduce la definición del problema en relaciones matemáticas, la solución del modelo emplea el uso de algoritmos definidos de optimización para extraer la información del mismo, la validación comprueba si la herramienta cuantitativa propuesta predice de forma adecuada el comportamiento del sistema que se estudia, finalmente, la implementación de la solución de un modelo validado implica la traducción de los resultados a conclusiones comprensibles y claras de acuerdo con Taha (41).

El presente capítulo abarca las dos primeras fases del proceso metodológico mostrado en la figura 3.1. Las siguientes fases serán desarrolladas en las siguientes partes del documento.

## 3.2 DESCRIPCIÓN FORMAL DEL PROBLEMA

En esta sección se presenta las características formales del problema de localización de contenedores para residuos sólidos urbanos valorizables describiendo los supuestos considerados en la formulación.

Dado un conjunto de puntos de demanda  $J = \{1, 2, 3, \dots, m\}$  los cuales representan ciudadanos que buscan depositar sus residuos reciclables en un lugar adecuado y que se encuentran agrupados por manzanas, entendiéndose por manzana el bloque urbano contenido entre 4 calles o vialidades; y un conjunto de posibles ubicaciones  $I = \{1, 2, 3, \dots, n\}$  para la localización de contenedores disponibles, los supuestos que se manejan para la definición del presente problema son:

Existe un número finito y conocido de manzanas o puntos de demanda  $m$ . Se conocen además todas las ubicaciones posibles  $n$  donde se puede localizar un contenedor y la distancia desde cada manzana a cada ubicación posible. Se conoce el volumen de residuos reciclables generados por día por cada manzana y se cuenta con una cantidad finita de contenedores  $k$  disponibles para ser ubicados con una capacidad igual y conocida.

En trabajos como el de Ibarra-Rojas, Ozuna y López-Piñól (19) el cubrimiento de las zonas de demanda se encuentra definido previamente mediante radios de cobertura y movilidad, sin embargo, la demanda no varía en ninguno de los radios. En el presente problema, similar a lo planteado por los autores (19) se consideran 3 intervalos de distancia diferentes, los cuales determinan el cubrimiento total, parcial o no cubrimiento de una manzana, pero para este caso la distancia al contenedor influye en la cantidad de demanda esperada o participación ciudadana en la disposición correcta de residuo, la cual es una característica principal del problema tratado como pudo observarse en las secciones 2.3 y 2.2.2. A continuación se presenta un ejemplo gráfico mediante el cual posteriormente se definen los intervalos de distancia considerados en el presente trabajo:

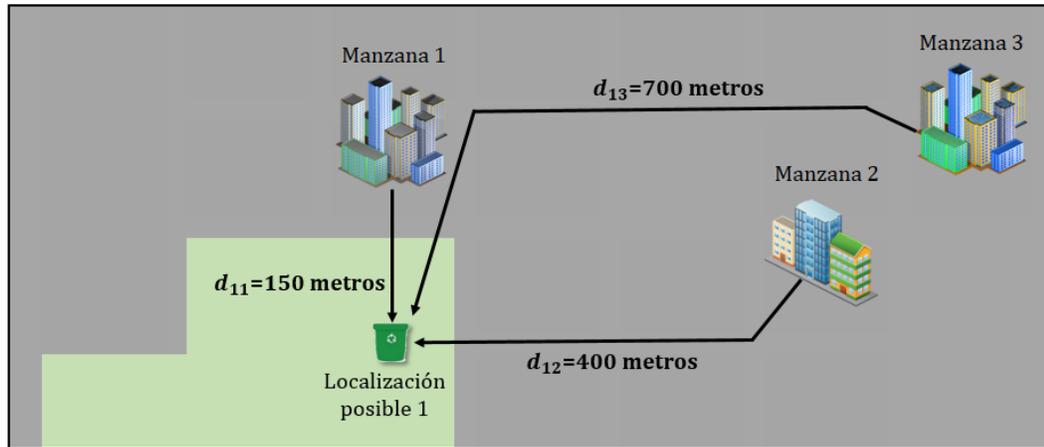


FIGURA 3.2: Ejemplo ilustrativo de intervalos de distancia y cubrimiento

Fuente: Elaboración propia

En el ejemplo presentado en la Figura 3.2 suponga que la mayor parte de la población, a la cual se nombrará como  $\alpha_f = 100\%$  está dispuesta a caminar una distancia menor a  $d_{min} = 200$  metros para depositar sus residuos reciclables correctamente, por su parte, tan solo una menor proporción de la población, la cual se delimitará como  $\alpha_p = 60\%$  está dispuesta a caminar más de  $d_{min} = 200$  metros y no más de  $d_{max} = 450$  metros para depositar sus residuos reciclables, finalmente tan solo un menor porcentaje de la población, el cual será nombrado  $\alpha_0 = 2\%$  está dispuesta a desplazarse más de  $d_{max} = 450$  metros.

Teniendo en cuenta lo anterior en la Figura 3.2 si se ubica un contenedor en la localización potencial 1:

De la manzana 1 que se encuentra a menos de 200 metros de distancia de dicha localización se espera recibir el 100% de los residuos reciclables que genere y por lo tanto se puede decir que la localización potencial 1 cubre **completamente** a la manzana 1.

De la manzana 2, que se encuentra a más de 200 metros de la localización potencial pero a menos de 450 metros se espera recibir el 60% de los residuos que genere y por lo tanto puede decirse que la localización potencial 1 cubre **parcialmente** a

la manzana 2.

Finalmente puede decirse que la localización potencial 1 **no cubre** a la m 3 ya que esta se encuentra a más de 450 metros de distancia de la localización, sin embargo al ser esta la más cercana a la manzana podría esperar recibir como máximo un 2% de los residuos que la manzana genere.

De esta forma la capacidad requerida para un contenedor que se instale en la localización p 1 deberá ser mayor o igual a la suma de los volúmenes de los residuos reciclables que se espera recibir por parte de las manzanas 1, 2 y 3.

Teniendo en cuenta el ejemplo anterior, se presentan los supuestos considerados para la cobertura de las manzanas del conjunto  $J$  por parte de las Localizaciones potenciales del conjunto  $I$ :

Para cada localización potencial  $i \in I$ , se conoce el conjunto de manzanas  $J_f \subset J$  que se encuentran cubiertas completamente por dicha ubicación. De esta forma se cuenta con una matriz de incidencias de cubrimiento total  $f_{ij}$  cuyos elementos toman el valor de 1 cuando una manzana  $j \in J_f$  y 0 de lo contrario. En el ejemplo de la figura 3.2  $f_{11} = 1$  mientras que  $f_{12}$  y  $f_{13}$  son iguales a 0.

Por su parte para cada localización potencial  $i \in I$  se conoce el conjunto de manzanas  $J_p \subset J$  que se encuentran cubiertas parcialmente por dicha ubicación. De esta forma se cuenta con una matriz de incidencias de cubrimiento parcial  $p_{ij}$  cuyos elementos toman el valor de 1 cuando una manzana  $j \in J_p$  y 0 de lo contrario. En el ejemplo de la figura 3.2  $p_{12} = 1$  mientras que  $p_{11}$  y  $p_{13}$  son iguales a 0.

De esta manera los intervalos de distancia definen el cubrimiento completo, parcial o no cubrimiento de una manzana así:

Existe una distancia mínima promedio llamada  $d_{min}$  que la mayor proporción de la población  $\alpha_f$  está dispuesta a caminar para depositar correctamente sus residuos ( $\alpha_f$  corresponde al mayor porcentaje de participación ciudadana esperado). Por consiguiente una manzana  $j \in J$  se considera completamente cubierta por una ubi-

cación posible  $i \in I$  cuando esta se encuentra a una distancia menor o igual a  $dmin$  de la misma con  $f_{ij} = 1$  y su volumen de generación esperado será el equivalente a  $(\alpha_f \%)$ .

Por otra parte existe una distancia máxima promedio llamada  $dmax$ , con  $dmax > dmin$ , que un menor porcentaje  $\alpha_p$  de la población está dispuesto a caminar para depositar correctamente sus residuos. De esta forma una manzana  $j \in J$  se considera parcialmente cubierta cuando se encuentra a una distancia mayor a  $dmin$  y menor o igual a  $dmax$  de una ubicación posible  $i \in I$  con  $p_{ij} = 1$ , de igual manera el volumen de generación esperado por dicha manzana es el equivalente  $(\alpha_p \%)$

Finalmente cuando una manzana  $j \in J$  se encuentra a una distancia mayor a  $dmax$  de una ubicación potencial  $i \in I$  se considera no cubierta por la misma con  $f_{ij} = 0$  y  $p_{ij} = 0$ , sin embargo se supone un porcentaje de participación mínima  $(\alpha_0)$  por parte de la manzana de manera que el volumen de generación esperado es equivalente a este porcentaje.

Teniendo en cuenta las características anteriores, en la solución del problema se puede considerar además que todas las ubicaciones potenciales pueden servir a todas las manzanas y todas las manzanas tienen la opción de dirigirse a todas las ubicaciones, sin embargo se asume que una manzana  $j \in J$  siempre buscará acercarse a depositar sus residuos en la ubicación potencial  $i \in I$  más cercana disponible, es decir en la más cercana donde finalmente se instale un contenedor.

Cabe resaltar que entre mayor sea el cubrimiento del conjunto  $J$  de manzanas, mayor será la participación ciudadana esperada, por lo tanto una de las metas de la herramienta matemática debe ser maximizar el cubrimiento del conjunto  $J$ .

### 3.2.1 ACCESIBILIDAD

En los conceptos estudiados en la sección 2.4 se puede observar que en ciertos problemas de localización deben ser tomados en cuenta otros criterios además de la distancia, por ejemplo en el caso de instalaciones de servicio público, al ser financiadas por la población, lo que se busca es la justicia espacial, es decir las mismas condiciones de accesibilidad para todos los ciudadanos.

La ubicación de contenedores es un problema de servicio público, por lo que requiere de la inclusión del concepto de justicia espacial. Por esta razón más allá de lograr el mayor cubrimiento de los puntos de demanda, lo que se busca es garantizar la mayor accesibilidad posible.

Para lograr lo anterior se cuenta con una medida de accesibilidad, que incluye la incorporación de 5 indicadores diferentes, los cuales consideran el porcentaje de manzanas cubiertas completamente, el porcentaje de manzanas cubiertas parcialmente, la eficiencia del camino asignado a cada manzana, la proporción de distancia que deben recorrer las manzanas no cubiertas y el porcentaje promedio de participación ciudadana lograda. Cada uno de los 5 indicadores se explica detalladamente en la siguiente sección.

Las ponderación de los 5 indicadores da como resultado la medida de accesibilidad, para esto se cuenta además con parámetros de peso, que asignan mayor o menor importancia a cada uno de los indicadores, el peso o importancia de cada indicador puede ser calculado mediante métodos de regresión como proponen Ibarra-Rojas, Ozuna y López-Piñón (19).

Por consiguiente el problema de optimización presentado determina la localización adecuada de los  $k$  contenedores que se instalarán en el conjunto  $I$  de ubicaciones potenciales de manera que se maximice la medida de accesibilidad, teniendo en cuenta las limitaciones de cantidad de contenedores disponibles, relación entre distancia, participación ciudadana y cantidad de residuos esperados.

### 3.3 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Una vez definido el problema, se puede llevar a cabo la fase del diseño de la formulación matemática, que consiste en modelar lo anteriormente establecido en ecuaciones que permitan facilitar el análisis de la situación. La formulación de cualquier herramienta de optimización consta de 4 elementos principales: La función objetivo que corresponde a la medida cuantitativa de la operación del sistema que se busca optimizar, como por ejemplo la maximización de la accesibilidad. Las variables de decisión que representan las decisiones que requieren tomarse para lograr la operación deseada del sistema, como por ejemplo donde ubicar los contenedores. Las restricciones, que representan todas aquellas limitantes que influyen sobre la toma de decisiones, como por ejemplo la cantidad limitada de contenedores. Finalmente los parámetros representan toda la información previamente conocida del sistema que de igual forma influye en la toma de decisiones como por ejemplo las distancia de una manzana a cualquier contenedor, los parámetros pueden ser calculados o recolectados de distintas maneras.

Teniendo en cuenta lo anterior, en esta sección se desarrolla la formulación matemática para el problema de localización de contenedores de residuos sólidos urbanos valorizables. Se presentan los conjuntos, parámetros y variables del modelo, además de la explicación de la función objetivo y las restricciones incluidas.

Para la herramienta cuantitativa propuesta se hace uso del modelo de localización clásico de máxima cobertura estudiado en la sección 2.4 y se agrega al mismo la medida de accesibilidad, teniendo en cuenta indicadores propuestos por Ibarra-Rojas, Ozuna y López-Piñól (19) y Jiménez (22), se incluyen además algunas modificaciones de acuerdo con las características del problema tratado.

**Conjuntos:**

$I$  : Conjunto de ubicaciones potenciales para la localización de contenedores con  $I = \{1, 2, 3, \dots, n\}$

$J$  : Conjunto de manzanas o puntos de demanda con  $J = \{1, 2, 3, \dots, m\}$

**Parámetros:**

$k$  : Número de contenedores disponibles para ubicar.

$d_{ij}$  : Distancia desde la manzana  $i \in I$  hasta la ubicación potencial  $j \in J$ .

$r_j$  : Volumen de RSUV generado por la manzana  $j \in J$ .

$q$  : Volumen de capacidad de los contenedores disponibles para ser ubicados

$f_{ij}$  : Parámetro binario que toma el valor de 1 si la manzana  $j \in J$  es cubierta completamente desde la ubicación potencial  $i \in I$  o 0 si no.

$p_{ij}$  : Parámetro binario que toma el valor de 1 si la manzana  $j \in J$  es cubierta parcialmente desde la ubicación potencial  $i \in I$  o 0 si no.

$dmin$  : Distancia mínima de cubrimiento.

$dmax$  : Distancia máxima de cubrimiento.

$\alpha_f$  : Porcentaje de participación esperado para las manzanas cubiertas completamente.

$\alpha_p$  : Porcentaje de participación esperado para las manzanas cubiertas parcialmente.

$\alpha_0$  : Porcentaje de participación esperado para las manzanas no cubiertas.

$\beta_1$  : Peso del indicador de accesibilidad 1.

$\beta_2$  : Peso del indicador de accesibilidad 2.

$\beta_3$  :Peso del indicador de accesibilidad 3.

$\beta_4$  :Peso del indicador de accesibilidad 4.

$\beta_5$  :Peso del indicador de accesibilidad 5.

**Nota** : La suma de los pesos  $\beta$  es igual a 1, de tal manera que cada indicador representa un valor ponderado en la conformación de la medida de accesibilidad final.

### **VARIABLES DE DECISIÓN:**

$z_i$  : Variable binaria que toma el valor de 1 si un contenedor se ubica en la localización potencial  $i \in I$ , 0 de lo contrario.

$x_j$  : Variable binaria que toma el valor de 1 si una manzana  $j \in J$  queda cubierta completamente por un contenedor instalado, 0 de lo contrario.

$y_j$  : Variable binaria que toma el valor de 1 si una manzana  $j \in J$  queda cubierta parcialmente por un contenedor instalado, 0 de lo contrario.

$u_{ij}$  : Variable binaria que toma el valor de 1 si una manzana  $j \in J$  queda cubierta completamente con  $x_j = 1$  y la ubicación potencial  $i \in I$  es la más cercana con un contenedor instalado  $z_i = 1$ , 0 de lo contrario.

$v_{ij}$  : Variable binaria que toma el valor de 1 si una manzana  $j \in J$  queda cubierta parcialmente con  $y_j = 1$  y la ubicación potencial  $i \in I$  es la más cercana con un contenedor instalado  $z_i = 1$ , 0 de lo contrario.

$w_{ij}$  : Variable binaria que toma el valor de 1 si una manzana  $j \in J$  no queda cubierta con  $x_j = 0$ ,  $y_j = 0$  y la ubicación potencial  $i \in I$  es la más cercana con un contenedor instalado  $z_i = 1$ , 0 de lo contrario.

$w_{ij}$  : Variable binaria que toma el valor de 1 si una manzana  $j \in J$  no queda cubierta con  $x_j = 0$ ,  $y_j = 0$  y la ubicación potencial  $i \in I$  es la más cercana con un contenedor instalado  $z_i = 1$ , 0 de lo contrario.

$e_j$  : Variable continua que representa la eficiencia del camino asignado a la manzana  $j \in J$ .

$t_j$  : Variable continua que representa la distancia de viaje no cubierta para la manzana no cubierta  $j \in J$ .

$s_j$  : Variable continua que representa el porcentaje de residuos reciclables que se espera recibir de la manzana  $j \in J$ .

### Indicadores de accesibilidad:

**Cobertura completa:** El indicador de cobertura completa calcula el porcentaje de manzanas que quedan cubiertas completamente por los contenedores ubicados en la solución del problema, la cobertura completa esta relacionada con los valores que toman las variables  $x_j$  así:

$$\frac{1}{|J|} \sum_{j \in J} x_j$$

**Cobertura parcial:** Calcula el porcentaje de manzanas que quedan cubiertas parcialmente por los contenedores ubicados en la solución del problema, la cobertura parcial esta relacionada con los valores que toman las variables  $y_j$  así:

$$\frac{1}{|J|} \sum_{j \in J} y_j$$

**Eficiencia del camino programado  $e_j$ :** Calcula el porcentaje de eficiencia del camino asignado a cada manzana  $j \in J$ , comparando la distancia desde la manzana  $j \in J$  a la ubicación más cercana  $i \in I$  donde ha sido instalado un contenedor (Con  $z_i = 1$ ) con la menor distancia desde la manzana  $j \in J$  a cualquier ubicación del conjunto  $i \in I$ . De esta forma, los parámetros  $d_{ij}$  se activan cuando las variables  $u_{ij}$ ,  $v_{ij}$  o  $w_{ij}$  toman valor de uno.

$$e_j = (\min_{i \in I} d_{ij}) \sum_{i \in I} \frac{u_{ij} + v_{ij} + w_{ij}}{d_{ij}}$$

**Distancia de viaje no cubierta  $t_j$ :** Calcula la proporción de distancia no cubierta para cada manzana  $j \in J$  con  $x_j = 0$  y  $y_j = 0$ , comparando la distancia máxima de cubrimiento  $dmax$  con la distancia desde la manzana  $j \in J$  a la ubicación más cercana  $i \in I$  donde ha sido instalado un contenedor, esta razón genera la proporción de distancia que se considera cubierta con respecto a  $dmax$ , luego, la resta de 1, que equivale al 100 %, menos esta proporción genera el porcentaje de distancia no cubierta para la manzana.

$$t_j = \sum_{i \in I} w_{ij} - dmax \sum_{i \in I} \frac{w_{ij}}{d_{ij}}$$

**Porcentaje de participación ciudadana  $s_j$ :** Calcula el porcentaje sobre la generación de residuos que se espera recibir de cada manzana  $j \in J$ , dependiendo del tipo de cubrimiento obtenido en la solución y el porcentaje de participación determinado para cada cubrimiento.

$$s_j = \sum_{i \in I} (\alpha_f u_{ij} + \alpha_p v_{ij} + \alpha_0 w_{ij})$$

Finalmente se presenta la formulación matemática propuesta para la maximización de los indicadores de accesibilidad:

### Modelo matemático

$$\max \frac{1}{|J|} \sum_{j \in J} (\beta_1 x_j + \beta_2 y_j + \beta_3 e_j + \beta_4 t_j + \beta_5 s_j) \quad (3.1)$$

*Sujeto a :*

$$\sum_{i \in I} z_i \leq k \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \in I} f_{ij} z_i \geq x_j \quad \forall j \in J \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in I} p_{ij} z_i \geq y_j \quad \forall j \in J \quad (3.4)$$

$$u_{ij} \leq z_i \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in I} u_{ij} \leq x_j \quad \forall j \in J \quad (3.6)$$

$$v_{ij} \leq z_i \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.7)$$

$$\sum_{i \in I} v_{ij} \leq y_j \quad \forall j \in J \quad (3.8)$$

$$w_{ij} \leq z_i \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.9)$$

$$2 \sum_{i \in I} w_{ij} \leq 2 - x_j - y_j \quad \forall j \in J \quad (3.10)$$

$$\sum_{i \in I} (u_{ij} + v_{ij} + w_{ij}) = 1 \quad \forall j \in J \quad (3.11)$$

$$e_j = (\min_{i \in I} d_{ij}) \sum_{i \in I} \frac{u_{ij} + v_{ij} + w_{ij}}{d_{ij}} \quad \forall j \in J \quad (3.12)$$

$$t_j = \sum_{i \in I} w_{ij} - dmax \sum_{i \in I} \frac{w_{ij}}{d_{ij}} \quad \forall j \in J \quad (3.13)$$

$$s_j = \sum_{i \in I} (\alpha_f u_{ij} + \alpha_p v_{ij} + \alpha_0 w_{ij}) \quad \forall j \in J \quad (3.14)$$

$$\sum_{j \in J} r_j (\alpha_f u_{ij} + \alpha_p v_{ij} + \alpha_0 w_{ij}) \leq q \quad \forall i \in I \quad (3.15)$$

$$z_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I \quad (3.16)$$

$$x_j, y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (3.17)$$

$$u_{ij}, v_{ij}, w_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.18)$$

$$t_j, e_j, s_j \in R_0^+ \quad \forall j \in J \quad (3.19)$$

La función objetivo 3.1 maximiza y normaliza la medida de accesibilidad, teniendo en cuenta que cada termino en la suma toma valores entre 0 y 1, la función genera una proporción entre 0 y 1. La restricción 3.2 asegura que se ubiquen como máximo  $k$  contenedores. Las restricciones 3.3 y 3.4 verifican que una manzana no sea considerada cubierta completa o parcialmente si no se ubica un contenedor que así la cubra. Las restricciones 3.5 y 3.6 garantizan la asignación de una manzana cubierta completamente al contenedor más cercano instalado, de manera paralela 3.7 y 3.8 aseguran la misma situación para las manzanas cubiertas parcialmente y las restricciones 3.9 y 3.10 para las manzanas no cubiertas; por su parte la restricción 3.11 asegura que cada manzana se acerque a un único contenedor más cercano. Las ecuaciones 3.12, 3.13 y 3.14 definen a los indicadores  $e_j$ ,  $t_j$  y  $s_j$  respectivamente, la

restricción 3.15 se asegura de que la capacidad de los contenedores disponibles no sea excedida y finalmente las ecuaciones 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19 son las restricciones lógicas de estado de las variables.

### 3.3.1 RESUMEN Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se presentó la descripción de la metodología de solución elegida para el presente proyecto teniendo en cuenta todos los aspectos estudiados en el capítulo de Antecedentes. Se propuso la implementación de un modelo matemático de localización de máxima cobertura con indicadores de accesibilidad, esto debido a que el problema presenta dos características principales: La primera es que al tratarse de un servicio público uno de los criterios a cumplir es la accesibilidad justa de toda la comunidad a los contenedores, la segunda es una demanda de servicio inversamente proporcional a la distancia a los contenedores, por lo cual para lograr un porcentaje requerido de participación ciudadana es necesario lograr el máximo cubrimiento posible.

En la primera sección se describió todo el desarrollo de la metodología de solución, la cual al ser una herramienta de la investigación de operaciones está previamente definida por la misma, en la segunda sección se presentaron todas las características particulares del problema que dieron paso al establecimiento de las variables y parámetros requeridos y finalmente se presentó la formulación matemática propuesta.

Siguiendo la línea de acción de las herramientas de investigación de operaciones, en los siguientes capítulos se desarrollaran el diseño e implementación de técnicas de solución para el modelo matemático formulado, así como la validación del mismo y el análisis de resultados.

## CAPÍTULO 4

# RESULTADOS

---

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados numéricos obtenidos con la experimentación del modelo matemático propuesto, se evalúan los límites de la herramienta y la eficiencia de un software comercial de optimización para resolver instancias generadas aleatoriamente, variando además los parámetros de cobertura y participación para así determinar su influencia en la medida de accesibilidad.

### 4.1 DISEÑO DE LA EXPERIMENTACIÓN

Se diseñaron diferentes tipos de instancias en función del número de ubicaciones potenciales de contenedores  $|I|$ , el número contenedores disponibles para ubicar  $k$ , la cantidad de manzanas o puntos de demanda  $|J|$ , las distancias de participación ciudadana  $dmin$  y  $dmax$  y los tamaños de cuadrícula para la generación de coordenadas aleatorias.

Para establecer la cantidad de manzanas  $|J|$  por instancia se experimentó incrementando el número de manzanas de 100 en 100 y finalmente se agruparon los resultados en los 4 tamaños que presentaron mayores incrementos en los tiempos. De esta forma se determinaron las instancias con 300, 600, 1000 y 1500 manzanas respectivamente.

Para fijar el valor  $k$  de contenedores disponibles para ubicar, se realizó la suma total de la demanda máxima esperada de acuerdo al número de manzanas por instancia y dicho valor fue dividido entre la capacidad máxima de los contenedores a ubicar, esto para garantizar la factibilidad del experimento.

Finalmente, la cantidad de ubicaciones potenciales de contenedores  $|I|$  fue generada aleatoriamente con entre 15 y 150 ubicaciones potenciales por encima del valor  $k$  para cada instancia.

Para la experimentación, además se consideraron los siguientes parámetros:

Capacidad estándar por contenedor  $q$ : Se estableció una capacidad de 2000 litros, teniendo en cuenta el contenedor para residuos urbanos de mayor capacidad encontrado en el mercado.

Cantidad de residuos reciclables  $r_j$  generados por cada manzana  $j$ : Para esto, se supone la existencia de entre 30 y 90 habitantes por manzana, de acuerdo con las cifras de densidad poblacional de la zona metropolitana de Monterrey, posteriormente teniendo en cuenta las estadísticas de SIMEPRODE en relación a la cantidad de residuos reciclables generados por habitante se establece para la experimentación valores aleatorios entre 200 y 500 litros por manzana.

Para los parámetros porcentuales de participación ciudadana se fijaron valores de  $\alpha_f = 82\%$ ,  $\alpha_p = 37\%$  y  $\alpha_0 = 7\%$ , de acuerdo con la investigación Rojas et al (13) mencionada en el capítulo de Antecedentes, la cual además presenta los valores de  $dmin$  de 50 metros y  $dmax$  de 200 metros, utilizados de igual forma en el experimento. Adicionalmente, para evaluar la influencia de la variación de los parámetros  $dmax$  y  $dmin$  se incluyeron de manera arbitraria valores de 300 y 600 metros respectivamente, conservando los porcentajes de participación ciudadana para estos casos.

Finalmente para los parámetros de peso de los indicadores se asume una preferencia lexicográfica, de acuerdo a lo propuesto en la sección experimental de

Ibarra-Rojas, Ozuna y López-Piñól (19), donde  $\beta_1 = 0.5$ ,  $\beta_2 = 0.25$ ,  $\beta_3 = 0.125$ ,  $\beta_4 = -0.0625$  y  $\beta_5 = 0.125$ .

En las tabla 4.1, se presentan los diferentes grupos de instancias diseñados, cada uno a su vez, se fue probado para tamaños de cuadrícula de  $8 \times 8$  *Km*,  $15 \times 15$  *Km* y  $30 \times 30$  *Km* respectivamente, ya que estos corresponden a los tamaños de superficie territorial de los municipios de la zona metropolitana de Monterrey.

Para cada tipo de instancia que se muestra a continuación se generaron aleatoriamente 10 conjuntos de datos experimentales.

TABLA 4.1: Tipos de instancias utilizados para el problema de localización de contenedores

Tipo de instancia	$ I $	k	$ J $	dmin	dmax
1	90	75	300	50	200
2	250	150	600	50	200
3	300	250	1000	50	200
4	450	375	1500	50	200
5	90	75	300	300	600
6	250	150	600	300	600
7	300	250	1000	300	600
8	450	375	1500	300	600

## 4.2 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN EN CPLEX

Para realizar el análisis experimental, el modelo se codificó y resolvió utilizando el software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio versión 12.10. El estudio computacional se realizó con un criterio de parada hasta la capacidad de memoria

del equipo y un límite de tiempo de 1800 segundos en una PC Intel (R) Core (TM) i5-8250U, 3.4 *GHz*, 8.0 *GB* de RAM y un sistema operativo Windows 10.

En las tablas 4.2, 4.3 y 4.4 se muestran los resultados obtenidos al resolver las instancias para cada tipo de cuadrícula respectivamente, donde cada fila exhibe el tiempo promedio de solución en segundos  $t_{prom}$ , las desviación estándar de los datos  $\sigma$ , el tiempo máximo  $t_{max}$  y mínimo  $t_{min}$  de solución, mientras que las columnas denotan los diferentes tipos de instancias.

TABLA 4.2: Resultados instancias aleatorias en cuadrícula de 8x8

Instancias/Resultados	1	2	3	4	5	6	7	8
$t_{prom}$ (s)	20.63	88.48	231.64	699.35	21.07	138.34	351.63	961.74
$\sigma$ (s)	2.01	5.84	17.15	58.99	0.79	6.13	21.35	121.01
$t_{min}$ (s)	18.90	80.96	216.38	600.26	19.42	125.20	323.24	854.66
$t_{max}$	26.13	103.48	263.94	778.95	22.60	145.35	398.33	1306.00

TABLA 4.3: Resultados instancias aleatorias en cuadrícula de 15x15

Instancias/Resultados	1	2	3	4	5	6	7	8
$t_{prom}$ (s)	19.60	96.39	181.64	598.13	21.19	112.46	314.09	775.13
$\sigma$ (s)	1.12	5.09	8.19	145.61	1.04	5.26	37.31	133.48
$t_{min}$ (s)	18.14	87.21	170.22	399.60	19.28	105.15	256.01	610.54
$t_{max}$	22.37	106.34	200.12	852.02	23.05	122.56	373.78	1026.45

TABLA 4.4: Resultados instancias aleatorias en cuadrícula de 30x30

Instancias/Resultados	1	2	3	4	5	6	7	8
$t_{prom}$ (s)	18.95	85.06	222.15	406.17	19.29	99.54	222.18	633.35
$\sigma$ (s)	0.93	1.19	49.71	42.67	1.67	4.43	23.05	131.24
$t_{min}$ (s)	17.84	83.28	170.42	353.53	17.37	93.60	191.19	478.88
$t_{max}$	21.50	87.39	316.79	491.63	22.80	107.54	282.58	887.07

En la tabla 4.2, los valores promedio de solución oscilan entre 20 segundos para la instancia más pequeña y 16 minutos para la instancia más grande, a medida

que incrementa el tamaño de las instancias, incrementan los tiempos de solución promedio en un 300 %, de forma similar se comportan los valores de las tablas 4.3 y 4.4, sin embargo, el tiempo promedio de solución y la desviación estándar disminuyen a medida que aumenta el tamaño de la cuadrícula, ya que al generar ubicaciones en un espacio mucho más extenso con iguales características de distancias máximas y mínimas, se hace más evidente el resultado óptimo.

Los resultados de las tablas anteriores demuestran que el modelo propuesto es adecuado para la solución óptima de instancias con 1500 manzanas y 450 localizaciones posibles de contenedores, las cuales son comparables con escenarios reales del caso de estudio, lo anterior fue logrado en un tiempo máximo de 21 minutos y 46 segundos, además todas las soluciones obtenidas presentaron un gap promedio relativo de 0 %.

Las pruebas realizadas con instancias de mas de 1500 manzanas, no lograron hallar la solución óptima ya que el equipo utilizado se quedó sin memoria a partir de estos tamaños.

En la figura 4.1 se presenta el diagrama de cajas y bigotes de los resultados de experimentación de las instancias agrupadas por tamaños. En general, cada uno de los espacios de instancias con los que se realizó la experimentación presentan comportamiento similares, en torno al tiempo promedio de solución, donde los 2 últimos cuartiles de cada una de las muestras aleatorias tienden a incrementar considerablemente los tiempos de solución debido a que la computadora se ralentiza después de determinado número de corridas con cada experimentación.

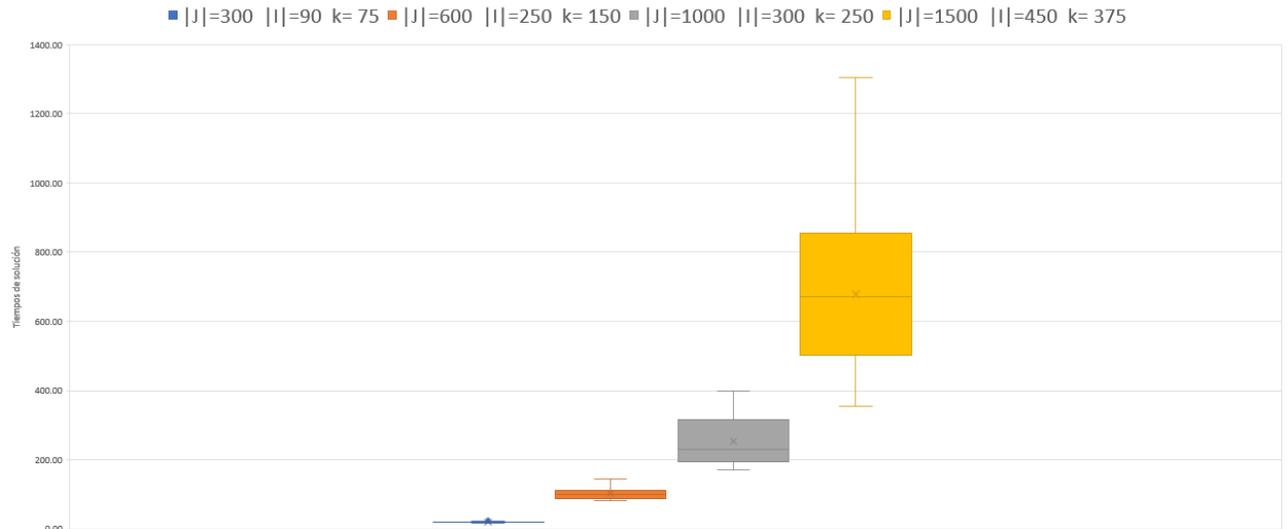


FIGURA 4.1: Diagrama de cajas y bigotes, tiempos de solución por tamaño de instancias

Fuente: Elaboración propia

### 4.3 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA ACCESIBILIDAD

Una vez comprobada la capacidad del algoritmo de solución diseñado para darle una solución exacta al modelo matemático, se hace completamente necesaria la evaluación de la optimización de la accesibilidad a la población, la cual es el objetivo principal de la herramienta matemática.

Para esto se ha generado una experimentación con un espacio real de generación de residuos de la zona metropolitana de Monterrey, así:

De acuerdo con Benítez (7), cada municipio de la zona metropolitana de Monterrey está dividido en zonas, las cuales son agrupaciones de colonias con vialidades cercanas, que a su vez, representan las rutas del sistema actual de recolección de residuos urbanos. En su trabajo (7) hace un énfasis especial en el municipio de San Pedro Garza Garcia debido a que es el territorio que genera la mayor generación

de residuos sólidos urbanos de la zona metropolitana de Monterrey, lo cual además concuerda con los datos estadísticos de SIMEPRODE, los cuales estiman que la generación de residuos percapita es 40 % mayor en el municipio de San Pedro que en el resto de la zona metropolitana.

San Pedro Garza García (15) cuenta con aproximadamente  $72.01 \text{ km}^2$  de extensión territorial, para el 2010 contaba con una población de 123,156 habitantes, 34,730 hogares y más de 340 manzanas.

Benítez (7) explica que el municipio de San Pedro está dividido en 36 zonas de recolección. En su investigación, el autor hace énfasis particular en la ruta de recolección de la zona A, eligiendo esta como su territorio de experimentación, al ser especialmente representativa por la gran cantidad de residuos sólidos urbanos que genera, debido a que da servicio a una zona habitacional con alta densidad poblacional.

La evaluación de la accesibilidad del presente trabajo será realizada con base en la ruta de recolección A del municipio de San Pedro Garza García, compuesta por las 5 colonias de Palo Blanco, Villas de Santa Barbara, Jardines de Mira Sierra, San Gabriel y Privada Versailles, así como por 75 manzanas en total (7). En la zona A se han identificado al rededor de 30 puntos de posibles puntos para ubicar contenedores en los que se encuentran comercios pequeños, colegios y parques públicos. En las figuras 4.2 y 4.3, se puede visualizar el espacio comprendido por la zona A en San Pedro Garza García y la composición de la misma, los puntos verdes corresponden a los posibles lugares para ubicar contenedores, mientras que los números en negro a cada una de los puntos de demanda o manzanas de la zona.

Se asume una generación de residuos sólidos urbanos valorizables aleatoria entre 200 y 500 litros y al igual que el ejemplo anterior se asumirá para los contenedores disponibles para ubicar una capacidad de 2,000 litros.

Finalmente para que el problema sea factible se requieren como mínimo la disponibilidad de 19 contenedores para ubicar, teniendo en cuenta la capacidad global

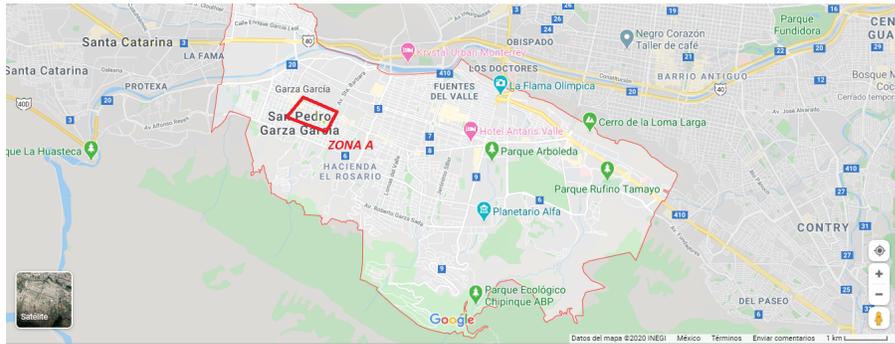


FIGURA 4.2: Ruta de recolección A San Pedro Garza García

Fuente: Reyes Benítez Bravo (7)



FIGURA 4.3: Composición de la Zona A San Pedro Garza García con 75 puntos de demanda y 30 posibles lugares de ubicación de contenedores

Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.5: Resultados de la medida de accesibilidad

$d_{max} - d_{min}$	Ubicaciones aleatorias (%)	Soluciones del modelo (%)
50- 200	20.6	54.3
100-250	40.1	63.2
150-300	49.8	77.6
200-350	55.2	82.4
250-400	60.3	83.5
300-450	62.5	84.4

de los contenedores y el volumen promedio de generación de las 75 manzanas.

Para la medición de la accesibilidad, se realizó la variación de los parámetros  $d_{min}$  y  $d_{max}$  aumentando cada uno de 50 en 50, como se muestra en la tabla 4.5, además por cada variación de distancias se consideran los mismos parámetros de  $\alpha_f = 82\%$ ,  $\alpha_p = 37\%$  y  $\alpha_0 = 7\%$ .

Para la comparación de los resultados del modelo se generaron soluciones aleatorias de la ubicación de contenedores, en cada caso, se generaron  $n$  números aleatorios, no repetidos, simulando las ubicaciones en donde debían ser localizados contenedores y las mismas fueron comparadas con la solución óptima del modelo. Para cada comparación se realizaron 5 ensayos diferentes variando la demanda por manzana.

En la tabla 4.5 podemos observar la comparación de soluciones variando diferentes valores de  $d_{min}$  y  $d_{max}$  observados en la columna 1, en estas comparaciones se observan además, la accesibilidad resultante de la ubicación aleatoria de los contenedores, valores mostrados en la columna 2, contra las soluciones obtenidas gracias a la aplicación del modelo matemático de optimización de la accesibilidad, observados en la columna 3.

Los resultados anteriores demuestran que dos de los parámetros más influyentes en el logro de mejores valores de la función objetivo son las distancias mínimas y

máximas de participación ciudadana respectivamente  $d_{min}$  y  $d_{max}$ , a medida que estos factores aumentan, la función objetivo de accesibilidad incrementa entre un 50 % y 100 %, esto indica que los comportamientos de la población en cuanto al reciclaje influyen directamente en el logro de la optimización de la accesibilidad.

En los ensayos aleatorios de ubicación de contenedores, las manzanas fueron dirigidas al contenedor más cercano hasta que se copara toda la capacidad respectiva, de esta forma, ciertos puntos de demanda se veían obligados a desplazarse distancias más largas por capacidad.

En el 100 % la accesibilidad lograda por medio del modelo es superior a la accesibilidad lograda de manera aleatoria, entre 50 % y 80 % mayor, debido a que logra asignar casa punto de demanda al contenedor más cercano posible, manteniendo la capacidad del mismo y aumentando el nivel de participación ciudadana.

Las figuras 4.4 y 4.5, presentan la comparación de los resultados para soluciones aleatorias y de la herramienta matemática, con un  $d_{min} = 300$  y un  $d_{max} = 450$ .

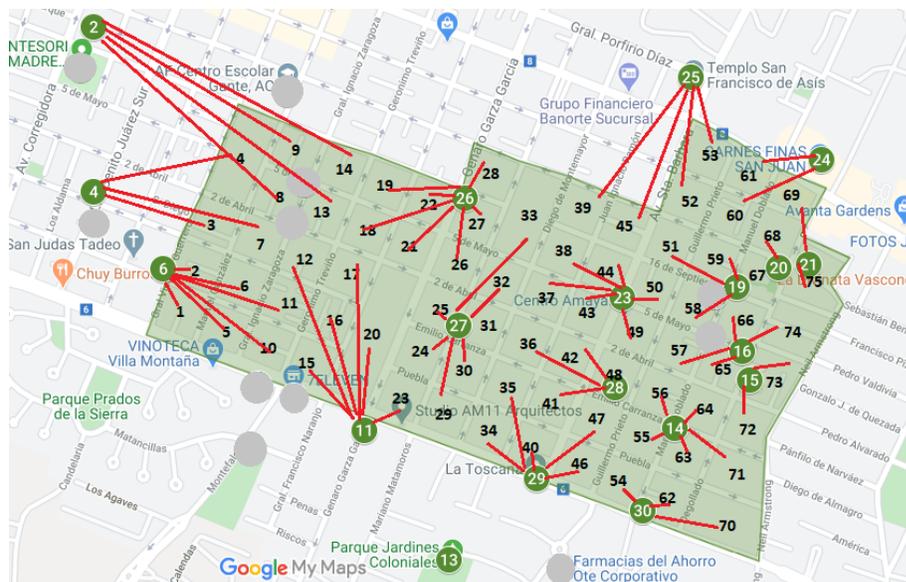


FIGURA 4.4: Resultados de ubicación de contenedores aleatorias con un  $d_{min}=300$  y un  $d_{max}=450$

Fuente: Elaboración propia



comercial IBM ILOG CPLEX Optimization Studio versión 12.10, se logró identificar la eficiencia del software para hallar soluciones exactas con distintos tipos de instancias de prueba con características similares a las de los territorios del caso de estudio. Esto permitió identificar la eficacia de la herramienta para obtener la solución exacta en territorios con 1,500 manzanas y 450 localizaciones potenciales en un tiempo promedio de 21 minutos.

Mediante la experimentación en la zona de recolección A del municipio de San Pedro Garza García, mencionada en la investigación de Benítez (7) en donde se compara la medida de accesibilidad lograda por el modelo matemático propuesto, contra una ubicación aleatoria de contenedores, fue posible observar la capacidad del modelo para hallar mejores soluciones con medidas de accesibilidad entre 50 % y 80 % mayores al método aleatorio.

Tanto la experimentación de los límites del modelo en el software comercial como la experimentación de la medida de accesibilidad en la zona A de recolección A evidenciaron la gran influencia de los parámetros  $d_{max}$  y  $d_{min}$  relacionados con las distancias de participación ciudadana, demostrando así que la participación ciudadana es un factor completamente influyente en el logro de mejores valores de la función objetivo.

## CAPÍTULO 5

# CONCLUSIONES

---

En este capítulo se presentan las conclusiones encontradas con la implementación de la formulación matemática propuesta para la localización de contenedores de RSUV, así como el trabajo a futuro.

## 5.1 CONCLUSIONES

El concepto de accesibilidad se basa en brindar a las personas mejores oportunidades para acceder a bienes o servicios. En el problema de la ubicación de contenedores para residuos reciclables se desea especialmente lograr esta característica, ya que es un servicio público donde se debe garantizar un acceso igualitario y adecuado a la comunidad, que es también una de las principales razones de la participación ciudadana en las actividades de reciclaje.

El problema de optimización propuesto se formula matemáticamente a través de un programa lineal de enteros mixtos que es manejable por solucionadores comerciales. Específicamente, el solucionador de CPLEX puede obtener soluciones óptimas en menos de 21 minutos para instancias generadas aleatoriamente de hasta 450 ubicaciones y 1500 puntos de demanda.

La eficiencia de un software comercial al momento de dar solución al problema

propuesto, permite realizar análisis de sensibilidad para analizar el impacto de los parámetros del problema en la medida de accesibilidad, se realizó un estudio en un área especialmente representativa que genera la mayor parte de los residuos reciclables en la zona metropolitana de Monterrey, este logró determinar que uno de los factores más influyentes en el logro de mejores valores de la función objetivo son los comportamientos en cuanto a reciclaje de la población.

## 5.2 CONTRIBUCIONES

Se desarrolló un modelo matemático para la localización de contenedores de RSUV donde por primera vez, se tiene en cuenta la medida de accesibilidad de la población, mediante factores influyente como cobertura máxima, eficiencia del camino programado y porcentaje de participación ciudadana logrado. Además, se propone un método de localización en donde la principal característica es la variabilidad de la demanda de acuerdo a la distancia de la población a cada uno de los puntos de oferta.

Esta herramienta podrá ser aplicable a zonas urbanas y territorios con características similares a la zona metropolitana de Monterrey Nuevo León, para la ubicación de contenedores de residuos.

## 5.3 TRABAJO A FUTURO

En este trabajo se realiza una aplicación del problema de localización de contenedores para RSUV, sin embargo, este trabajo puede ser adaptado para otro tipo de actividades como la localización de almacenes, fábricas o puntos de comercio con características similares.

En este trabajo se consideran solamente aspectos de accesibilidad, sin embargo

---

un siguiente paso consistiría en la inclusión de costos de la ubicación de contenedores como parte de una restricción o de la función objetivo.

Para la solución de la herramienta, es importante experimentar con instancias de mayor tamaño mediante un método de solución heurístico, comparando igualmente los resultados de dicho método con las soluciones obtenidas a partir del método exacto para los tamaños de instancias que lo permitan.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] AINI, A. y A. SALEHIPOUR, «Speeding up the Floyd-Warshall algorithm for the cycled shortest path problem», *Applied Mathematics Letters*, **25**(1), págs. 1–5, 2012, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.aml.2011.06.008>.
- [2] ALONSO, A. B., «Optimal Location of Solid Waste Containers in Alcala De Henares», *M+a-Revista Electronica De Medio Ambiente*, **17**(1), págs. 1–23, 2016.
- [3] AYUNTAMIENTO DE MONTERREY, «Reglamento de Limpia para el Municipio de Monterrey», , 2018, URL <http://www.monterrey.gob.mx/transparencia/articulo10-01.html>.
- [4] BABAEI, A. A., N. ALAVI, G. GOUDARZI, P. TEYMOURI, K. AHMADI y M. RAFIEE, «Household recycling knowledge, attitudes and practices towards solid waste management», *Resources, Conservation and Recycling*, **102**, págs. 94–100, 2015, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.06.014>.
- [5] BARRENA, E., D. CANCA, F. A. ORTEGA y R. PIEDRA-DE-LA-CUADRA, «Optimizing container location for selective collection of urban solid waste», *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, **231**, págs. 1–9, 2019.
- [6] BAUTISTA, J. y J. PEREIRA, «Modeling the problem of locating collection areas for urban waste management. An application to the metropolitan area of Barcelona», *Omega*, (6), págs. 617–629, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2005.01.013>.

- [7] BENITEZ, R., *Optimización económica y ambiental de las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos en el área metropolitana de Monterrey*, Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2018.
- [8] BOCAREJO, J. y D. OVIEDO, «Transport accessibility and social inequities: a tool for identification of mobility needs and evaluation of transport investments», *Journal of Transport Geography*, **24**, págs. 142–154, 2012, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.12.004>.
- [9] BOSQUE, J., D. GÓMEZ y F. PALM, «Un nuevo modelo para localizar instalaciones no deseables: Ventajas derivadas de la integración de modelos de localización- asignación y sig», *Cuadernos Geograficos*, **2(39)**, págs. 53–68, 2006.
- [10] CHANG, N. y Y. WEI, «Strategic planning of recycling drop-off stations by multi-objective programming», *Environmental Management*, **24(2)**, págs. 247–264, 1999.
- [11] CONGRESO DE ESTADO DE NUEVO LEÓN, «Ley ambiental del Estado de Nuevo León», , 2005, URL <http://www.hcnl.gob.mx/trabajo{ }legislativo/leyes/leyes/ley{ }ambiental{ }del{ }estado{ }de{ }nuevo{ }leon/>.
- [12] CURRENT, J., M. DASKIN y D. SCHILLING, «Discrete Network Location Models John», en Z. Drezner y H. W. Hamacher (editores), *Facility Location: Applications and Theory*, primera edición, capítulo 3, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, págs. 81–118, 2001, URL <https://daskin.engin.umich.edu/wp-content/uploads/sites/133/2014/07/chapter3currentdaskinandschilling.pdf>.
- [13] DAYANNA, L., R. CASTILLO, A. G. IZQUIERDO y A. P. GUILAMANY, «La distancia del domicilio al contenedor como un factor influyente en la frecuencia de separación de residuos urbanos», *Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima*, págs. 209–213, 2011.

- [14] FERNÁNDEZ, J. L., «Quienes somos», , 2014, URL <http://www2.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/bioenergia{ }12{ }j{ }fernandez.pdf>.
- [15] GARZA, M. F., «Plan de Desarrollo del Municipio de San Pedro Garza Garcia», *Informe técnico*, Ayuntamiento de San Pedro Garza Garcia, San Pedro Garza Garcia, 2015, URL <https://www.sanpedro.gob.mx/Gobierno/Plan2030/PlanDesarrolloUrbano2030.pdf>.
- [16] GAUTAM, A. K. y S. KUMAR, «Strategic planning of recycling options by multi-objective programming in a GIS environment», *Clean Technologies and Environmental Policy*, **7**(4), págs. 306–316, 2005.
- [17] GONZÁLEZ-TORRE, P. L. y B. ADENSO-DÍAZ, «Influence of distance on the motivation and frequency of household recycling», *Waste Management*, **25**(1), págs. 15–23, jan 2005, URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X04001503>.
- [18] IBARRA-ROJAS, O. J., L. HERNANDEZ y L. OZUNA, «The Accessibility Vehicle Routing Problem», *Journal of Cleaner Production*, **172**, págs. 1514–1528, 2018, URL <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.249>.
- [19] IBARRA-ROJAS, O. J., L. OZUNA y L.-P. D, «The Maximal Covering Location Problem with Accessibility indicators», , 2019, URL <https://www.researchgate.net/publication/325627997{ }The{ }Maximal{ }Covering{ }Location{ }Problem{ }with{ }Accessibil>
- [20] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA, «División municipal Nuevo León», , 2015, URL <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/nl/territorio/div{ }municipal.aspx?tema=me{&}e=19>.
- [21] JAVIER, C., T. ISAZA y R. A. HINCAPI, «Planeación de sistemas secundarios de distribución usando el algoritmo branch and bound», *Ingeniería y Ciencia*, **7**(13), págs. 47–64, 2011, URL <file:///C:/Users/dani9/Downloads/>

- Dialnet-PlaneacionDeSistemasSecundariosDeDistribucionUsand-3912845.pdf.
- [22] JIMENEZ, B. A., *Problema de localización de instalaciones en respuesta a situaciones de emergencia considerando indicadores de accesibilidad*, Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2019.
- [23] KAO, J.-J., L.-M. WEN y K.-H. LIU, «Service Distance and Ratio-Based Location-Allocation Models for Siting Recycling Depots», *Journal of Environmental Engineering*, **136**(4), págs. 444–450, 2009.
- [24] KHAILI, M. E. L., «Visibility Graph For Path Planning In The Presence Of Moving Obstacles», *Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ)*, **4**(4), págs. 118–123, 2014.
- [25] MAKRÍ, M.-C. y C. FOLKESSON, «Accessibility Measures for Analyses of Land Use and Travelling with Geographical Information Systems 1 Introduction 2 General issues on accessibility», , 1969, URL <https://www.trafikdage.dk/td/papers/papers99/papers/paper/bpot/makri/makri.pdf>.
- [26] MALDONADO, C. E. y N. A. GÓMEZ, *El Mundo de las Ciencias de la Complejidad*, Innovar, Bogotá, 2011, URL [https://www.ugr.es/~raipad/investigacion/excelencia/seminarioXV/2011\\_el\\_mundo\\_de\\_las\\_ciencias\\_de\\_la\\_complejidad.pdf](https://www.ugr.es/~raipad/investigacion/excelencia/seminarioXV/2011_el_mundo_de_las_ciencias_de_la_complejidad.pdf).
- [27] MENDI, B. y M. TEMPL, «Analysis of commercial and free and open source solvers for linear optimization problems», , 2012, URL <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.455.3926&rep=rep1&type=pdf>.
- [28] MILIUTE-PLEPIENE, J., O. HAGE, A. PLEPYS y A. REIPAS, «What motivates households recycling behaviour in recycling schemes of different maturity? Lessons from Lithuania and Sweden», *Resources, Conservation and Recycling*, **113**,

- págs. 40–52, 2016, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.008>.
- [29] MILLER, E., «Measuring Accessibility : Methods & Issues», , 2019.
- [30] OWEN, S. H. y M. S. DASKIN, «Strategic facility location: A review», *European Journal of Operational Research*, **111**(3), págs. 423–447, 1998.
- [31] PÁEZ, A., D. M. SCOTT y C. MORENCY, «Measuring accessibility: Positive and normative implementations of various accessibility indicators», *Journal of Transport Geography*, **25**, págs. 141–153, 2012, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.03.016>.
- [32] PURKAYASTHA, D., M. . MAJUMDER y S. CHAKRABARTI, «Collection and recycle bin location-allocation problem in solid waste management : A review», *Pollution Agartala P.O.: Former Tripura Engineering College Barjala*, **1**(2), págs. 175–191, 2015, URL [https://jpoll.ut.ac.ir/article/{\\_}52927{\\_-}7f3c6c2744324db252eaead57db03019.pdf](https://jpoll.ut.ac.ir/article/{_}52927{_-}7f3c6c2744324db252eaead57db03019.pdf).
- [33] ROBUSTÉ, F., J. MAGÍN y D. GALVÁN, «Nace la Logística Urbana», *LAMOT, ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona*, pág. 9, 2000.
- [34] SECRETARÍA DE DESARROLLO SOCIAL EN MÉXICO, «Manual Técnico sobre Generación y Transferencia de Residuos Sólidos Municipales», , 1999.
- [35] SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, «Informe de Gestión Ambiental del Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales 2011», *Informe técnico*, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México, 2011, URL [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe-{\\_}12/pdf/Cap7{\\_-}residuos.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe-{_}12/pdf/Cap7{_-}residuos.pdf).
- [36] SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, «Residuos Sólidos Urbanos (RSU)», , 2017, URL <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu>.

- [37] SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE, «Informe de Situación de Medio Ambiente en México», *Informe técnico*, Secretaría del Medio Ambiente, Ciudad de México, 2016, URL <https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/informe15/tema/pdf/Cap7{ }Residuos.pdf>.
- [38] SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE DEL GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO, «Nadf-024-Ambt-2013», , 2015.
- [39] SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE DEL GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO, «Inventario de Residuos Sólidos CDMX», *Informe técnico*, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México, 2017, URL <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/IRS{ }2017{ }FINAL{ }BAJA.pdf>.
- [40] SELVAM, S., A. MANISHA, J. VIDHYA y S. VENKATRAMANAN, «Fundamentals of GIS», en *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science*, capítulo 1, Elsevier Inc., págs. 3–15, 2019, URL <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-815413-7.00001-8>.
- [41] TAHA, H., *Operations Research: An Introduction.*, tomo 23, 7ª edición, Pearson Education Mexico, 2004.
- [42] VIJAY, R., A. GAUTAM, A. KALAMDHAD, A. GUPTA y S. DEVOTTA, «GIS-based locational analysis of collection bins in municipal solid waste management systems», *Journal of Environmental Engineering and Science*, **7**(1), págs. 39–43, 2008, URL <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1139/S07-033>.
- [43] WAXMAN, O., «America Recycles Day 2016: A Brief History of Recycling — Time», *Time*, pág. 2, 2016, URL <https://time.com/4568234/history-origins-recycling/>.
- [44] WORLD BANK GROUP, «What a waste 2.0 A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050», *Informe técnico*, World Bank Group, 2018.