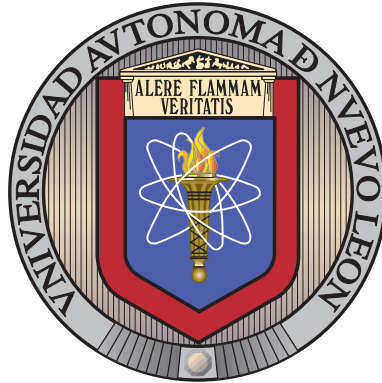


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



APLICACIÓN DE LOGÍSTICA INVERSA PARA EL  
APROVECHAMIENTO DE MATERIALES  
RECICLADOS

POR

CARMEN ALEXIA GONZALEZ LAGUNAS

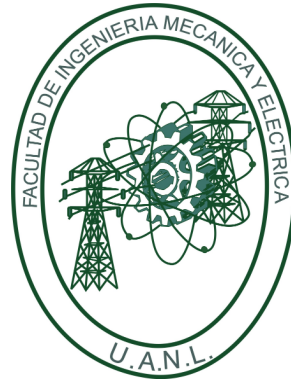
COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

ENERO 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



APLICACIÓN DE LOGÍSTICA INVERSA PARA EL  
APROVECHAMIENTO DE MATERIALES  
RECICLADOS

POR

CARMEN ALEXIA GONZALEZ LAGUNAS

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

ENERO 2024

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**  
**Posgrado**

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Aplicación de Logística Inversa para el aprovechamiento de materiales reciclados”, realizada por la estudiante Carmen Alexia González Lagunas, con número de matrícula 2082098, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

**El Comité de Evaluación de Tesis**

Dr. Tomás Eloy Salais Fierro  
Director

Dr. Giovanni Lizárraga Lizárraga  
Revisor

MLyCS Blanca Idalia Pérez Pérez  
Revisor

Dra. Carolina Solís Peña  
Revisor

Vo.Bo.

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 642597

Acta Núm. 4290

Ciudad Universitaria, a 29 de noviembre del 2023

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>XI</b>
<b>Resumen</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del Problema . . . . .	2
1.2. Objetivo . . . . .	3
1.2.1. Objetivos Específicos . . . . .	4
1.3. Hipótesis . . . . .	4
1.4. Justificación . . . . .	4
1.5. Metodología . . . . .	6
1.6. Estructura de la tesis . . . . .	7
<b>2. Antecedentes</b>	<b>9</b>
2.1. Gestión de residuos . . . . .	10
2.2. Cultura del Reciclaje . . . . .	13
2.2.1. Retos en la industria del reciclaje . . . . .	15



---

2.2.2.	Soluciones ante los retos de la industria de reciclaje . . . . .	18
2.3.	Logística inversa . . . . .	21
2.3.1.	Diferencia entre la logística inversa y la logística directa . . . . .	23
2.3.2.	Beneficios de logística inversa . . . . .	25
2.3.3.	Logística y cadena de suministro en función al reciclaje . . . . .	27
2.3.4.	Relación entre la cultura del reciclaje y la logística inversa . . . . .	29
2.3.5.	Barreras de la logística inversa . . . . .	33
2.4.	Herramientas para eficientar el proceso de recolección . . . . .	35
2.5.	Sistemas de recolección de Residuos . . . . .	37
2.5.1.	Modelos de localización . . . . .	39
2.5.2.	Modelos Clásicos de Localización . . . . .	40
2.6.	Métodos de Planeación de Rutas . . . . .	43
2.6.1.	VRP (Vehicle Routing Problem) . . . . .	44
2.6.2.	CVRP Problema de enrutamiento de vehículos capacitados . . . . .	46
2.6.3.	DCVRP Problema de ruteo vehicular con restricción de capacidad y distancia . . . . .	47
2.6.4.	VRP con ventanas de tiempo VRPTW . . . . .	47
2.6.5.	VRPB con devoluciones . . . . .	48
2.6.6.	VRP con múltiples depósitos MDVRP . . . . .	49
2.6.7.	TSP (Travel Salesman Problem) . . . . .	49
2.7.	Métodos de Solución de Problemas . . . . .	56

---

2.7.1. Métodos Exactos . . . . .	57
2.7.1.1. Búsqueda Exhaustiva . . . . .	57
2.7.1.2. Ramificación y Acotamiento . . . . .	58
2.7.2. Métodos de simulación . . . . .	58
2.7.3. Métodos Heurísticos . . . . .	59
2.7.3.1. Vecino más Cercano . . . . .	60
2.7.3.2. Búsqueda Local . . . . .	61
2.7.4. Métodos Metaheurísticos . . . . .	61
2.7.4.1. Búsqueda Tabú . . . . .	62
2.7.4.2. Colonia de Hormigas . . . . .	62
2.8. Casos de estudio . . . . .	65
2.9. Conclusión del Capítulo . . . . .	70
<b>3. Metodología</b>	<b>72</b>
3.1. Enfoque Metodológico . . . . .	72
3.2. Descripción del problema . . . . .	73
3.3. Descripción de la metodología . . . . .	74
3.3.1. Etapa 1: Análisis de Datos . . . . .	75
3.3.2. Etapa 2: Modelo Aplicable al Problema . . . . .	77
3.3.2.1. Problemas de ruteo de vehículos (VRP) . . . . .	78
3.3.2.2. Etapa 3: Variante . . . . .	78

---

3.3.3. Etapa 4:Desarrollo del modelo . . . . .	80
3.3.3.1. Formulación del Modelo . . . . .	81
3.3.3.2. Parámetros . . . . .	84
3.3.3.3. Variable de decisión . . . . .	84
3.3.4. Caso de estudio . . . . .	85
3.3.5. Conclusión de capítulo . . . . .	89
<b>4. Análisis y resultados</b>	<b>90</b>
4.1. Resultados . . . . .	92
4.2. Conclusiones del capítulo . . . . .	101
<b>5. Conclusiones</b>	<b>102</b>
5.1. Conclusiones generales . . . . .	102
5.2. Contribuciones . . . . .	104
5.3. Trabajo a futuro . . . . .	105
<b>A. Este es un apéndice</b>	<b>106</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

1.1. Metodología de la Investigación . . . . .	6
2.1. Ejemplo de una Red Logística Inversa . . . . .	28
2.2. Barreras abordados en la Logística Inversa . . . . .	34
2.3. Herramientas del proceso de recolección de residuos . . . . .	36
2.4. Método Punto Central Zona . . . . .	38
2.5. Método Punto Verde . . . . .	39
2.6. Método Acera . . . . .	39
2.7. Representación modelo de Agente Viajero . . . . .	51
3.1. Diagrama de proceso de metodología . . . . .	74
3.2. Diagrama de proceso de metodología . . . . .	77
3.3. Diagrama de proceso de metodología . . . . .	81
3.4. Método Punto Verde . . . . .	88
4.1. Representación modelo de Agente Viajero . . . . .	91
4.2. Mapa de los puntos de recolección en las Instituciones Educativas . . .	93

---

4.3. Ruta de recolección actual . . . . .	94
4.4. Recorrido de la Ruta 1 . . . . .	96
4.5. Recorrido de la ruta 2 . . . . .	97
4.6. Recorrido de la ruta 3 . . . . .	98
4.7. Recorrido de la ruta 4 . . . . .	99

# ÍNDICE DE TABLAS

---

2.1. Procesos en la Logística Inversa . . . . .	19
2.2. Diferencia entre Logística Directa y Logística Inversa . . . . .	24
2.3. Beneficios de Logística Inversa . . . . .	25
2.4. Métodos de Solución de Problemas . . . . .	56
2.5. Tabla de antecedentes . . . . .	66
4.1. Resultados del Proceso de recolección . . . . .	91
4.2. Resultados Obtenidos . . . . .	92
4.3. Recorrido de las rutas obtenidas para cada vehículo . . . . .	95
4.4. Capacidad del vehículo 1 . . . . .	96
4.5. Capacidad del Vehículo 2 . . . . .	97
4.6. Capacidad del vehículo 3 . . . . .	98
4.7. Capacidad del vehículo 4 . . . . .	99

# AGRADECIMIENTOS

---

Agradezco a dios por guiarme y darme la fortaleza para culminar mi posgrado en Logística y Cadena de Suministro. A mi madre, porque sin ti no sería nada de lo que soy, gracias por tantos kilómetros viajados, por cada desayuno, cada beso que me dabas antes de ir a la escuela, gracias por nunca dejarme sola. Gracias papá por siempre creer en mi cuando nadie más lo hacía, por ofrecerme lo mejor, gracias por ser mi apoyo más grande.

Gracias a mis hermanos que día con día me motivaron para salir adelante, gracias por enseñarme a nunca darme por vencida y no perder la fé.

Gracias a la Universidad Autónoma de Nuevo León y principalmente a FIME por haberme permitido realizar mis estudios de posgrado, por apoyarme en todo momento, por invertir en mi educación, gracias a todas las personas que formaron parte de este proceso. Siempre estaré agradecida con el Ing. Aldo Raudel Martinez Moreno y el Ing. Jonathan Daniel Banda Ibarra, por confiar en mí, por motivarme para concluir mis estudios.

Quiero agradecer de manera muy especial a mis profesores por apoyarme para realizar este proyecto, en base a su experiencia, por brindarme tantas herramientas y fundamentos, de la misma manera a la Dra. Jania Saucedo y el Dr. Tomás Salias Fierro a todos los que colaboraron directamente en el proyecto de tesis, y a mis amigos que me apoyaron en la ejecución de la tesis.

Agradezco a CONACYT por la oportunidad y por el apoyo económico que me

brindaron para terminar mi posgrado.

El camino no ha sido fácil hasta ahora, pero siempre estaré agradecida con todos los que contribuyeron para lograr esta meta, por llegar a mi vida y permanecer cuando más los necesitaba, gracias por demostrarme su amor, bondad y lealtad. Gracias dios por darme la oportunidad y por permitirme crecer sin límites.



# RESUMEN

---

Carmen Alexia Gonzalez Lagunas.

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: APLICACIÓN DE LOGÍSTICA INVERSA PARA EL APROVECHAMIENTO DE MATERIALES RECICLADOS.

Número de páginas: 117.

**OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO:** En la actualidad la generación de residuos va en aumento con el paso de los años, debido al consumo elevado de productos y ante la falta de un sistema de recolección eficiente, así como la disposición de estos residuos, de los cuales acaban en tiraderos, relleno sanitario, sin que puedan ser reutilizados, ocasionando contaminación para el medio ambiente.

Implementar una logística inversa proporciona ventaja competitiva de manera sostenible, disminuye los costos de producción, ahorros en la compra de materia prima, ofreciendo servicio al cliente y garantía. Para que los procesos logísticos sean eficientes, es importante establecer un sistema de recolección, considerando la participación de la sociedad, creando estrategias que se enfoquen en la población, por lo que dentro de las instituciones educativas a nivel primaria y secundaria se presenta un comportamiento ecológico relevante y esto genera un impacto socio-ambiental, fomentando la cultura de reciclaje a temprana edad en los estudiantes. El propósito de este estudio es desarrollar una red logística para aumentar la capacidad de recolección de residuos, aplicando una logística inversa para mejorar la ruta de recolección y optimizar los costos de transporte.

En este estudio se hizo un análisis de datos para mejorar la red logística inversa

en su proceso de recolección, donde se ubicaron los puntos de demanda, la distancia entre cada uno de los puntos, costos logísticos, considerando la capacidad que tienen los vehículos para recolectar los residuos. Por tal motivo se aplicó un modelo de problema de ruteo de capacidad limitada conocido por sus siglas en inglés CVRP. El sistema de información geográfica favorece el modelo para hacer una simulación de una manera más rápida y eficiente al obtener las distancia entre los puntos y sea menor el tiempo de procesamiento. La solución deberá determinar el número de vehículos necesarios para el proceso de recolección, así como el orden en que cada vehículo visite los puntos, de esta forma aumentar el acopio de residuos.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: Y aquí tus contribuciones y conclusiones. (También es parte del formato). Las contribuciones a este trabajo son propuestas de una formulación matemática para resolver el sistema de recolección de residuos, considerando la distancia entre cada uno de los puntos, definir la cantidad de vehículos que cuentan la empresa, la capacidad que tienen los vehículos y los costos que genera el proceso de recolección. para darle una solución la problema se tuvo que realizar un análisis de datos y se concluyo que los métodos heurísticos y metaheurísticos, son herramientas de apoyo para simular y acortar el tiempo de procesamiento. El integrar un sistema de información geográfica SIG, ayudo al modelo para hacer una simulación y procesar información de una manera más eficiente y rápida para obtener las distancias entre los los puntos de recolección y trazar la ruta.

Como conclusión, hoy en el día el reciclaje se a convertido en un tema muy común y cada vez son más las empresas que se preocupan por el cuidado al medio ambiente y buscan retornar sus productos para darles una segunda vida, y se adapte a las necesidades de las Pymes. Es muy importante que las escuelas tengan más participación en reciclar, los niños pueden identificar como se debe de reciclar de una manera adecuada.

Firma del asesor: \_\_\_\_\_  
Dr. Tomás Eloy Salais Fierro

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

Hoy en día el tema del reciclaje ha tomado relevancia debido a la generación de residuos provocado por el consumo acelerado de productos, es por ello que las empresas hoy en día buscan crear estrategias y modelos para recuperar y reducir los residuos que se crean día con día tras concluir su ciclo de vida y evitar que terminen en rellenos sanitarios, para que puedan ser recolectados con la finalidad de darles un segundo uso.

Según Fullerton y Kinnaman (1995) el consumo humano ha generado grandes cantidades de basura, desechos orgánicos, productos químicos y la mala gestión de estos, está causando daños al medio ambiente y sus poblaciones. De acuerdo al informe de DBGIR (el diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos) emitido por la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, la producción de residuos se ha incrementado en México con el paso del tiempo. Cada mexicano genera 944 gramos de residuos al día, generando una suma total de 120,128 toneladas de desechos al día, de los cuales solo se recolectan el 83.93 %, en consecuencia 19,377 toneladas de los residuos no son recolectados, y tan solo el 9.63 % de los residuos generados es reciclado (DBGIR, 2020).

El origen de esta investigación reside en el interés, cada vez mayor, por el cuidado al medio ambiente y las empresas recicladoras han comenzado a desarrollar

métodos que ayuden a reducir el impacto de los residuos generados.

En la actualidad las empresas comienzan a involucrar en su proceso la forma en que los productos van a ser recuperados de los consumidores para poder reutilizar y aprovechar los componentes o como un servicio adicional que se ofrece. Según Luttwak (1971) a este proceso se le conoce como “Logística Inversa”. Para Guide y Van Wassenhove (2002) el proceso de logística inversa está cobrando relevancia donde las empresas aplican modelos que resultan eficientes para poder reutilizar los productos que generan.

La logística inversa, es un proceso de actividades que tienen relación entre la efectividad con la que se maneja el proceso, desde la generación de materia prima, contar con una base de datos de los productos generados, los puntos de venta y el destino que tienen los mismos para que al final de su ciclo de vida puedan ser recuperados, con el fin de que sean aprovechados (Rogers y Tibben-Lembke, 1999).

La relación que existe entre logística inversa y las empresas de reciclaje proviene de su función que es cuidar al medio ambiente a partir de un ahorro para las empresas, es decir, aprovechar todos aquellos materiales que no fueron ocupados para empezar un proceso de izquierda a derecha (inverso) en el cual la materia desechada se convierte en un producto secundario. En México el sistema de recolección de residuos que se tiene no es suficiente, ya que se ejecuta de manera incorrecta debido a la falta de educación e infraestructura lo cual genera que los residuos al ser mezclados con otros desechos pierdan su valor para el reciclaje.

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años las empresas recicladoras han comenzado a demostrar una mayor conciencia por cuidar al medio ambiente, con el fin de proteger y resguardar el mismo, debido a la degradación que ha sufrido, a tal punto, que hoy en día los residuos que se generan (basura, desechos, plásticos, textiles y otro tipo de basura)

no son reciclados o reutilizados de una manera adecuada.

El problema principal al que se enfrenta México es la sobreproducción de basura y el tratamiento erróneo para su disposición final. Con base en el artículo de Meneses Requena (2021), existe un sistema de recolección de residuos, que no se le ha dado el tratamiento adecuado y al ser mezclados con otros desechos pierde su valor para el reciclaje por lo cual se convierte en basura y terminan en rellenos sanitarios, ante la urgencia de preservar y cuidar al medio ambiente por los índices de contaminación que imperan en el país, es necesario desarrollar una cadena logística para poder recolectar los residuos y estos puedan ser tratados.

De acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA, 2020) diariamente se producen más de 13 mil toneladas de residuos. De estos, al año se generan 42 millones de toneladas de RSU y solo es aprovechado el 14 %, en consecuencia de lo anterior, más del 70 % de los residuos que se recolectan terminan en rellenos sanitarios, debido a la falta de procesos que ayuden a la recolección y tratamiento de los residuos.

El sistema de recolección de residuos que se tiene en México no es suficiente, ya que se ejecuta de manera incorrecta o carece de efectividad debido a la falta de educación de desarrollo sostenible. De acuerdo con el Decenio publicado por la UNESCO (2017), ha demostrado que la educación en primaria y secundaria se presta una creciente atención a la EDS y a su integración, en donde se ha incrementado la conciencia ambiental teniendo un impacto en comunidades, familias y núcleos cercanos, que han llevado a la adopción de esta medida como estrategia empresarial.

## 1.2 OBJETIVO

Mejorar el proceso de recolección basado en la logística inversa diseñando un modelo de ruteo con restricción de capacidad, estableciendo la ruta que optimice el costo de transporte y aumente el acopio de residuos.

### 1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar una red logística para aumentar la capacidad de recolección de residuos reciclables.
- A través del modelo con base en la logística inversa, mejorar la ruta para recolectar los residuos.

## 1.3 HIPÓTESIS

Si se aplica un modelo de recolección que considere los parámetros de un problema de ruteo con restricción de capacidad va optimizar el proceso, al obtener la ruta más corta, que logre aumentar el acopio de residuos minimizando el costo total de operación.

## 1.4 JUSTIFICACIÓN

Es importante que las empresas recicladoras, tengan un método donde sepan el proceso para recolectar los residuos, con la finalidad de aumentar la cantidad de productos recolectados, su eficiencia y minimizar el costo de operación.

La falta de un proceso que favorezca el retorno de los productos, y al aumento acelerado en la generación de residuos, provoca que al no ser recolectados, su destino sean los rellenos sanitarios y no se les pueda dar el tratamiento adecuado para que puedan ser reutilizados o reciclados para crear nueva materia prima. Esto genera pérdidas en las empresas, también tiene un impacto negativo en el medio ambiente, es necesario crear un modelo que mejore las actividades de recolección en las empresas, para favorecer y aprovechar los recursos que tiene.

El buscar la manera óptima de recolectar los residuos resulta importante y necesario, porque lleva consigo la reducción y beneficio en el costo económico, social y ambiental. Cada vez son más las empresas se están viendo obligadas a desarrollar políticas de sostenibilidad sobre los diferentes impactos causados por sus productos, lo que involucra un nuevo integrante en sus procesos industriales “la conciencia medioambiental”. El encontrar un modelo que resulte efectivo, ayudará a reducir el aumento de la generación de residuos, favoreciendo a los sistemas de recolección, en los estados donde se encuentren las empresas, a reducir la cantidad de residuos a recolectar, aprovechando los recursos con los que cuentan, y el sistema de recolección urbano pueda abarcar áreas, dónde la mayoría de las veces no llegan los servicios públicos.

El proyecto de logística inversa a nivel global se ha convertido cada vez más en una herramienta, que impacta positivamente en la rentabilidad y ayuda a las empresas a alcanzar sus objetivos de sostenibilidad y tener un desarrollo en la calidad de su servicio, minimizando costos de los procesos mediante su aplicación.

Un modelo que tenga como base la Logística Inversa, puede mejorar su proceso de recolección al reducir la ruta que se tiene con la finalidad de abarcar todos los puntos de recolección que determinen las empresas y el tiempo que se invierta sea menor, generando un ahorro en el proceso y se aumente la cantidad de acopio de residuos.

En un número considerable de fuentes, se encuentran diferentes modelos de ruteo aplicados a empresas con diferentes rubros en el área de logística, mejorando considerablemente su desempeño. Debido a la facilidad que tiene para adaptarse a diferentes empresas, y al ser necesario el reducir costos de operación logísticos en el proceso de recolección de residuos, sin dejar a un lado el punto de vista medioambiental que es un problema latente en el mundo, es que se debe implementar un modelo efectivo en la mayoría de las empresas en el país para solucionar el problema que se tiene.

## 1.5 METODOLOGÍA

Para implementar el trabajo se requiere de la identificación del problema para desarrollar la estructura de la metodología que se describe en la siguiente figura 1.1:



FIGURA 1.1: Metodología de la Investigación

Fuente: Elaboración Propia

En la primera etapa, se realiza una revisión de literatura para analizar y determinar los criterios que se utilizan, para dar solución al problema que se plantea, de modo que se identifiquen cuales son las áreas de oportunidad para implementar el modelo propuesto y las herramientas que han ocupado diversos autores. De igual forma se identifican los elementos que se van a involucrar en el modelo para que la herramienta seleccionada abarque y de solución al problema que se plantea.

Con base al análisis de revisión de literatura, en la segunda etapa se seleccionan los métodos y herramientas para obtener datos relevantes, que se adecuan para que el objetivo planteado se cumpla, para ello, se determinan las variables a tomar en consideración y se toman como referencia los modelos propuestos por Mendoza Guamán y Cullay Ashqui (2018) y Albiach *et al.* (2008), que buscan dar una solución al problema que se plantea, relacionado con la recolección de residuos. Por lo que el tipo de problema puede aplicarse un problema de ruteo con capacidad limitada dónde lo que se busca es mejorar el proceso de recolección optimizando el costo de operación al obtener el trayecto más corto que abarque todos los puntos de demanda.

En la tercera etapa, una vez que se determina el modelo y los datos necesarios para aplicar las herramientas que se adaptan al problema, se identifica que la



variante de problema de ruteo con capacidad limitada es aplicable para considerar la capacidad de los vehículos y sirva como restricción para mejorar el proceso de recolección dónde su función objetivo sea el minimizar el costo de operación.

La siguiente etapa se realiza una simulación del modelo propuesto, que permite evaluar y comprobar los datos que se obtengan al aplicar, analizando si se logró el objetivo planteado o en su defecto si se puede mejorar el modelo planteado, generando las conclusiones para futuros proyectos.

De acuerdo al problema planteado, la falta de un proceso logístico que favorezca la recolección de los residuos, que provoca, los materiales que pueden ser aprovechados, no tengan el tratamiento o aprovechamiento que se les puede dar y estos terminen en rellenos sanitarios. El enfoque del presente proyecto es proponer un proceso de logística inversa, que brinde las herramientas necesarias para mejorar el proceso de recolección y así las empresas puedan aplicarlo, brindando no solo beneficios económicos a la empresa, sino dar un valor agregado al servicio que ofrecen, favoreciendo el tiempo que se invierte, y aprovechando los materiales para poder crear nuevos o utilizarlos como materia prima. El modelo que se propone va a permitir analizar las áreas de mejora, y que las empresas adecuen el modelo a las variables y necesidades que requieran para favorecer el proceso de recolección, utilizando el modelo de logística inversa que determine los puntos de recolección, con el fin de aumentar la demanda de residuos con el algoritmo aplicado.

## 1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La investigación se desarrolla conforme a los siguientes capítulos: Como primer capítulo se desarrolla la introducción al tema planteado en la tesis, dando a conocer la problemática que se tiene ante el incremento de residuos y el no contar con un modelo que favorezca su recolección así como el objetivo del caso de estudio.

El capítulo dos se incluyen los antecedentes de logística inversa, los beneficios,

---

barreras y la aplicación al problema planteado. Así como un análisis del estado de arte que nos permita desarrollar todo el marco teórico de manera más adecuada y además se mencionan diversos autores que han llevado a cabo estudios diversos sobre logística inversa. De igual manera, algunos casos de éxito con respecto a la aplicación de la logística inversa.

El capítulo tres corresponde a la metodología la cual contiene el diseño y las etapas del desarrollo de la tesis. Mientras que en el cuatro se presentan los resultados obtenidos haciendo una comparativa de la información obtenida al aplicar el modelo.

Por último en el capítulo quinto se muestran las conclusiones del modelo propuesto, con la finalidad de observar y comprobar los beneficios que se obtuvieron al aplicar el modelo propuesto e identificar las áreas de oportunidad y mejora para investigaciones futuras.

## CAPÍTULO 2

# ANTECEDENTES

---

En la actualidad el consumo de productos se ha elevado de forma significativa provocando que la generación de residuos incremente, afectando directamente al problema medioambiental que se vive. Durante los últimos años las empresas han demostrado mayor interés por el cuidado al medio ambiente, con el fin de proteger y resguardar al mismo, creando políticas y estrategias que reduzcan el impacto ambiental que se genera con los productos que se elaboran, implementando un modelo donde sus productos puedan ser retornados para la reutilización o aprovechamiento de tales productos. Por lo que resulta importante hacer una investigación sobre los diferentes modelos que se han aplicado para dar una solución y conocer cuales son las áreas de oportunidad de mejora para poder aplicar el modelo que se acople a las necesidades de las empresas recicladoras.

En este capítulo se incluirá el origen de la logística inversa, la relevancia que han enfocado las directivas más importantes para la aplicación de la logística inversa, así como las razones para incluir en sus procesos un modelo de logística inversa en las empresas (SEMARNAT, 2017). De lo anterior, se pretende demostrar la viabilidad de aplicar un modelo de cadena logística, con base en la logística inversa, con la aplicación de herramientas, que apoyen a la mejora del proceso logrando aumentar la cantidad de residuo recolectado, y se pueda encontrar la ruta más corta que abarque todos los puntos de recolección, para que se le dé solución al problema que tienen las

empresas, debido a que se trata de un proceso que requiere de una gran inversión, sin embargo los beneficios que se obtienen, así como el valor agregado que resulta en sus productos crea una ventaja competitiva respecto a las demás empresas.

Motivo por el cual esta propuesta de investigación es el enfocarse en definir un método que sirva de utilidad, para que las empresas implementen la logística inversa que sea viable aplicar y puedan recolectar sus productos al final de su ciclo vida y de esa forma puedan ser aprovechados para crear nuevos productos o que sus componentes puedan ser reutilizados, que se adapte a las necesidades de Pymes así como las grandes empresas.

## 2.1 GESTIÓN DE RESIDUOS

La gestión de residuos y la recuperación de los productos es un problema que genera dificultades para tener una correcta planificación, gestión y control de los materiales y productos, por lo que, es importante identificar los elementos que se involucran en torno al problema, para que de esa forma las decisiones que se tomen sean las adecuadas para afrontarlo. Para tomar una decisión a nivel estratégico, se involucran los problemas de localización para determinar los puntos donde va a ser recolectado el residuo y a que planta tratadora se le va a destinar, tomando en cuenta las capacidades de procesamiento de cada planta y el almacenamiento, sin dejar a un lado los costos de operación que se involucran en el proceso.

Ahora para tomar una decisión de carácter operativo, se deben tomar en cuenta la calidad y tamaño de la infraestructura con que se cuenta para el transporte de los residuos, el personal con el que se cuenta, las rutas, entre otros aspectos (Trends, 1998).

En la actualidad la gestión de residuos es un problema que se le debe dar suma importancia, sin embargo resulta complejo poder crear una estrategia que abarque todos los sectores, que integren conceptos ambientales, económicos, institucionales y

sociales. En las denominadas megaciudades, se presentan grandes dificultades para la gestión de residuos, ya que las estrategias que plantean, cuentan con datos que no están actualizados o no existen, creando situaciones en donde la población con escasos recursos sean los que sufren la falta de prestación de los servicios de recolección. Alrededor del 75 % de la población se encuentra en ciudades, con una tendencia de crecimiento elevada, provocando el aumento de generación de residuos.

El gestionar de una forma adecuada los residuos, es necesario para que las ciudades puedan ser sostenibles y habitables ante la cantidad tan elevada de residuos, sin embargo para muchos países es un desafío muy grande ya que la gestión de estos, es costosa y comprende entre el 20 % y 50 % de los presupuestos de cada gobierno, de ahí resulta necesario que los sistemas aplicados sean eficientes, sostenibles y socialmente apoyados (Colomina, 2005).

Es por ello que en la agenda 21 del Manejo Ecológicamente Racional de los Desechos Sólidos, de las Naciones Unidas, se manejan cuatro áreas principales de programas relacionados con: reducción al mínimo de los residuos, aumento al máximo de la reutilización y el reciclado ecológicamente racional de los residuos, promoción de la eliminación y disposición ecológicamente racional de los residuos, ampliación del alcance de los servicios que se ocupan de los residuos (WorldBank, 2022).

El tema del reciclaje no solo es un problema que sea responsabilidad de sólo un sector de la población, es un tema global, es por ello que las empresas, hoy en día buscan crear estrategias y modelos para reducir los residuos que se generan al concluir su ciclo de vida y no terminen en rellenos sanitarios, y a su vez estos puedan ser recolectados con la finalidad de darles un segundo uso. Tal como lo explicó (Rojas Aguilera *et al.*, 2006) en su informe, hoy en día diversos países han implementado estrategias para la recolección de residuos.

En el caso de Alemania se han adoptado medidas de reciclaje en las tiendas de minoristas donde se requiere que recolecten las cajas de cereales en el punto de venta, empezando a involucrar a la sociedad en donde tengan la obligación de vaciar

el contenido en algún recipiente que tengan en casa, para que posteriormente coloquen esas cajas vacías en los contenedores de recolección, por lo que los fabricantes ya no sólo son responsables de la comercialización de su producto, sino que son obligados a responsabilizarse de la gestión del producto una vez que acaba sus vida útil (Rojas Aguilera *et al.*, 2006).

En Dinamarca, los municipios comenzaron a aplicar un impuesto por la cantidad basura generada, lo que ha generado que la población comience a preferir productos que puedan ser reutilizados, o que la basura generada sea la menor cantidad posible, empezando a aplicar la educación ambiental desde una temprana edad y practicando la costumbre de reparar y reutilizar. Algo similar sucede en Estados Unidos, donde el municipio para el manejo de residuos sólidos urbanos aplica un sistema denominado “Pay as You Throw (PAYT)”, el cual consiste en cobrarle a cada hogar la recolección de basura conforme a la cantidad generada, lo que ha provocado que la sociedad se involucre más en temas de educación ambiental y reciclaje para poder aprovechar y darle un segundo uso a los productos que generan.

En Curitiba, Brasil, se ahorraron millones de dólares al implementar una campaña educativa y de trabajo, donde se involucrando a toda la población. En la campaña realizada se inculcó la costumbre de separar los residuos de una forma más simple, entre orgánicos e inorgánicos, de forma paralela, se contrató a mucha gente desempleada para que se encargaran de realizar la recolección y separación de los residuos sólidos urbanos, de materiales reciclables tales como papel, plástico, metales, etc, y de igual forma crearon bonos para el transporte público, por los kilos recolectados de basura, para que la sociedad se integrará de igual forma a la recolección de residuos (Rojas Aguilera *et al.*, 2006).

Desafortunadamente en México a pesar de que se cuentan con programas y un marco normativo para la recolección de los residuos de los cuales no se llevan a cabo por la falta de cultura de reciclaje en el país. En México se generan 102,895 toneladas de residuos diariamente, de los cuales solo se recolectan el 83.93%, en consecuencia

19,377 toneladas de los residuos no son recolectados, y tan solo el 9.63 % de los residuos generados es reciclado (SEMARNAT, 2017).

Del total de los residuos que son recolectados el 31.5 %, puede ser aprovechado y reutilizado, debido a que se tratan de materiales tales como cartón, envases de cartón encerado, hule, latas, papel, plástico, vidrio y PET. De los desechos que se generan diariamente en México, 3,185 toneladas son residuos de PET, de los cuales solo el 60 % es recolectado para su tratamiento.

Es importante implementar medidas de conciencia sobre el reciclaje, el aprovechamiento y gestión de residuos, por lo que la introducción a la dimensión ambiental, se debe realizar dentro de las instituciones educativas, dónde el modelo de educación debe enfocarse en dos elementos, cursos dentro de la escuela y el involucrar activamente a los estudiantes, siguiendo el ejemplo de ciudades tales como Curitiba, Brasil, en donde su modelo aplicado tuvo un impacto positivo en la implementación de una campaña educativa, en donde se mejoró la recolección y el reciclaje de los residuos.

## 2.2 CULTURA DEL RECICLAJE

Debido a los problemas que se enfrenta hoy en día la sociedad, sobre los desechos generados y su tratamiento, es importante involucrar la educación dentro de la sociedad, con el fin de generar conciencia ambiental y hacer entender la crisis ambiental por la cual está atravesando hoy el mundo. Es importante tomar en cuenta a la población para concientizar sobre el aprovechamiento de los residuos y que acciones se pueden realizar con métodos simples, para lograrlo se deben establecer programas de educación, que hagan participar activamente a la sociedad.

El compromiso de gestión de residuos abarca múltiples áreas para su desarrollo en donde se incluyen aspectos como sostenibilidad ambiental, alimentación, salud y población, educación, protección social y desarrollo urbano. En niveles educativos,

que van desde preescolar hasta bachillerato, se ha fomentado el reciclaje, en donde se han obtenido resultados significativos que van más allá del ámbito escolar.

Para que se pueda desarrollar el conocimiento sobre temáticas ambientales y pueda incrementarse, es importante observar los siguientes elementos: la conciencia, la sensibilidad, el conocimiento y entendimiento de la situación que se presenta, así como los desafíos ambientales y actitudes que sensibilicen a la sociedad especialmente los estudiantes para motivarlos a tomar medidas y mejorar la calidad ambiental. Estas habilidades sólo se pueden generar si se involucran activamente a los alumnos y puedan definir el método, bajo el cual ellos, puedan resolver los desafíos ambientales, contribuyendo al cuidado y aprovechamiento de residuos (SEDEMA, 2016).

Es necesario ampliar la información acerca de sus beneficios con mayor fuerza en los procesos educativos de la población, en los niveles básicos, toda vez que está demostrado que el impacto generado en los estudiantes, no sólo impacta positivamente a ellos, sino que esa conciencia llega a sus hogares y la sociedad en general.

El WorldBank (2022) desde el año 2000, ha invertido en programas de gestión de residuos sólidos en seis regiones de participación del Banco Mundial, en Asia Oriental y el Pacífico, concretamente en Indonesia, el Banco realizó un préstamo de 100 millones de dólares, para que se puedan reformar las prácticas de gestión de residuos para 70 ciudades, lo que apoyará el fortalecimiento de políticas e instituciones locales, el cierre y la rehabilitación de vertederos antiguos e informales, y la instalación de sitios de eliminación modernos con mecanismos de recolección.

En Jamaica, gracias a la financiación, mejoraron en 18 comunidades la participación comunitaria y los servicios de recogida basados en los resultados y las inversiones en infraestructura. La inversión realizada de igual forma fomentó a la creación de empleo y contribuyó a la creación de un programa de prevención y reducción de residuos.

En Pakistán se desarrolló un servicio de compostaje en Lahore en el desarrollo del mercado y la venta de créditos de reducción de emisiones en virtud del proto-



colo de Kyoto de la Convención de Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Las actividades resultaron en reducciones de 150.000 toneladas de dióxido de carbono (WorldBank, 2022).

Si bien en México no existe un modelo de educación ambiental, existen iniciativas para que las mismas instituciones desarrollen una conciencia ecológica, a través de esquemas que promuevan acciones para el restablecimiento ecológico. Tal es el caso del “Eco Reto”, un programa de acopio que promueve la correcta gestión de residuos y empaques post-consumo a cargo de “Ecología y Compromiso Empresarial” (ECOCE, A.C.), el cual se llevó a cabo en el estado de Jalisco, en el que participaron 80 escuelas y más de 30 mil alumnos de Guadalajara, en el ciclo escolar 2016-2017. Durante el periodo señalado se logró el acopio de casi 40 toneladas de PET para ser recicladas (García *et al.*, 2020).

La educación ambiental, al ser una práctica educativa abierta en la vida social, puede involucrar a los miembros de la sociedad. Al inculcar una cultura ambientalista, desde edades tempranas, dentro de las instituciones educativas impactará de forma positiva a las leyes, normas y reglamentos emitidos para la regulación del manejo de los residuos sólidos urbanos, así como su reutilización. Hablar de una cultura ambiental, va más allá de solo plantar árboles, o hacer conciencia de los residuos que generamos, implica tener el conocimiento de los tipos de residuos que existen, así como los que son susceptibles de ser reciclados.

### 2.2.1 RETOS EN LA INDUSTRIA DEL RECICLAJE

La generación de residuos sólidos en el mundo está aumentando, en el 2016 se generaron 2,010 millones de toneladas de residuos, esto es aproximadamente 0.74 kilogramos por persona por día. Debido al crecimiento de la población de los países desarrollados y la urbanización, se espera que en el 2050 la generación de residuos aumente a 3400 millones de toneladas (WorldBank, 2022)

Los países desarrollados en comparación con los países en desarrollo, especialmente en las zonas urbanas, se ven afectadas debido a la generación de residuos que se gestionan de forma no sostenible. Los países de bajos ingresos generan más del 90 % de los residuos, de los cuales se eliminan en vertederos no regulados o se queman al aire libre. Estas prácticas crean graves consecuencias para la salud y el medio ambiente (WorldBank, 2022).

Una de las razones para reciclar es el punto económico, debido a que los materiales que son recolectados pasan por un proceso de transformación como una fuente de materia prima barata. El objetivo en el mercado del reciclaje, es agregar valor de marca, al mencionar que sus productos están siendo fabricados con materiales reciclados.

Desde hace varios años el tema del reciclaje se ha venido tratando de distintas formas, es por ello que las empresas comienzan a elaborar productos con la finalidad de lograr una vida más útil, así como determinar el proceso para recolectar sus productos, por esta razón es necesario crear métodos específicos para el reciclaje de estos materiales.

Giraldo (2008) expone que existen 4 destinos para la recolección de residuos que tienen flujos inversos en la cadena de valor, la reutilización, reparación, restauración y canibalización. En la reutilización los residuos son recolectados y sufren un cambio de transformación. En la reparación se busca que los productos al ser recolectados se puedan poner nuevamente en el mercado reparando los componentes dañados, dando la calidad y durabilidad de un producto nuevo. En la restauración, se busca devolver el producto, con el fin de que se conserve la identidad del producto. La canibalización recupera una parte de los conjuntos reutilizables, por ejemplo, poner en funcionamiento un equipo con piezas o partes de otro, de esta manera se aprovechan sin que los equipos sean desechados o desperdiciados por completo.

De acuerdo con el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales, en el país se cuentan con 1060 centros de acopio de materiales reciclables, de los

cuales, no todos son centros de acopio están formalmente constituidos, siendo únicamente contenedores de residuos. Para que puedan ser reutilizados los residuos y realizar una correcta valoración, su destino deben ser las plantas de tratamiento o de aprovechamiento. Lamentablemente el número de plantas disponibles en el país es muy limitado, ya que solo existen 47 plantas de tratamiento, y de las 47 plantas de tratamiento que se tienen en el país, solo en 44 de ellas se realizan procesos de tratamiento o aprovechamiento para la fracción inorgánica y orgánica de residuos sólidos urbanos, dentro de las cuales la selección de residuos reciclables se aplica únicamente en 26 plantas de tratamiento (DBGIR, 2020).

Ante el crecimiento acelerado de generación de residuos sólidos urbanos y al no contar con la adecuada infraestructura en México, desde la recolección, inspección, selección y clasificación, así como la disposición final de los residuos y a pesar de las iniciativas, programas y las normas oficiales, que existen en el país tales como el Programa Nacional Para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, los cuales no han tenido un impacto positivo en el ambiente. Es necesario implementar un modelo que beneficie y comience a dar resultados positivos que puedan ser aplicados, no sólo en plantas de tratamiento, sino en empresas que apliquen un modelo donde puedan recolectar sus productos y resulte eficiente en los procesos de tratamiento, reciclaje y recuperación del valor de los productos.

De los retos más grandes que se enfrenta el país, es la poca administración del destino que tiene la basura, la variedad de productos y materiales existentes, la falta de infraestructura, las redes efectivas de recolección y la separación de los distintos materiales. Es importante que las empresas desde el momento en que diseñan un producto, analicen cómo va a ser su proceso de reciclaje, pensando en los materiales, así como las facilidades para su categorización, con la finalidad de facilitar su recolección y que pasen por el proceso de reciclaje (Tansel, 2017).

Para alcanzar, que un sistema de recolección sea viable económica, medioam-

biental y socialmente, se requiere de una optimización de la estructura y funcionamiento de la cadena de abastecimiento. En donde influyen varios factores tales como el lugar, materia prima, distancias, el proceso que requiere y el material utilizado. Estas consideraciones, provocan que el diseño de las redes de suministro sea más complejo, por lo tanto, es importante que, el diseño de una buena cadena así como el conocimiento de las etapas, se vuelva más importante para identificar las actividades, retos y dificultades.

### 2.2.2 SOLUCIONES ANTE LOS RETOS DE LA INDUSTRIA DE RECICLAJE

Ante los retos que se presentan en la industria de reciclaje, la logística inversa aparece como una herramienta de solución, ya que las empresas encuentran dentro de este proceso la reducción de costos, utilización de nuevas tecnologías y en su aplicación se muestran resultados que favorecen los procesos productivos, ya que la aplicación de este proceso ha favorecido la recolección, inspección, clasificación, recuperación y transformación de los residuos sólidos urbanos.

La logística inversa, tiene como objetivo realizar una adecuada planeación, ejecución, entre cada etapa para poder reducir costos y generar un valor a los productos recuperados. Una vez que se tiene la planeación se debe identificar e implementar mejoras, para que los procesos resulten más eficientes y favorezcan el reuso, recuperación, reciclaje o la eliminación de los residuos, para poder reducir el impacto ambiental que se está generando y se puedan maximizar los beneficios económicos a las empresas. Al aplicar este proceso, lo que se busca es mejorar el aprovechamiento de los productos, para que se pueda minimizar la cantidad de desechos a recuperar por medio de controles de calidad, que mitiguen la cantidad de retornos, o que los mismos terminen en rellenos sanitarios, sin haberles dado el tratamiento adecuado.

Para poder identificar los procesos dentro de la logística inversa se anexa el

siguiente tabla:

Proceso	Descripción
Recolección	En este punto es importante establecer tanto el origen como el destino que van a tener los productos, el material que se va a recolectar y la forma en que va a ser recolectado, para que pueda ser ejecutado el proceso de forma óptima y así poder lograr un proceso eficaz.
Inspección, selección y clasificación de los residuos	Después del proceso de recolección. se debe determinar la calidad del producto o material recolectado, con la finalidad de determinar su estado y posibles usos. Para su clasificación se usan parámetros como tipo de material, destino o posible uso.
Transformación, tratamiento o disposición final	La transformación va desde poder reparar el producto para poder re utilizarlo, o el poder aprovechar los componentes del mismo para poder crear uno nuevo y por último las piezas que no sirvan para ser re utilizadas sean recicladas.
Transporte	La correcta planeación de rutas para poder efficientar costos así como los medios de transporte utilizados.

TABLA 2.1: Procesos en la Logística Inversa

Fuente: Elaboración propia

A continuación se desarrollan las etapas que involucran el proceso de logística inversa:

1. **Recolección:** Consiste en la recogida de los productos y/o residuos desde el lugar de origen de uso (cliente) hasta el punto de origen o recuperación. En este proceso se deben establecer el origen-destino de los productos, el material a recolectar y los medios para realizarlo con el fin de planear, ejecutar y controlar adecuadamente el proceso, debido a lo que es considerado como crítico para lograr un sistema de logística inversa eficiente y eficaz.

2. Inspección: selección y clasificación de los productos recuperados: una vez recuperados los productos por el proceso de recolección, se realiza una inspección de los productos y/o materiales con el fin de determinar la cantidad, procedencia razones devoluciones y tipo de productos. Dentro de la selección se puede determinar la cantidad del producto y/o material recolectado, con el fin determinar su estado y posibles usos. Dentro de la clasificación se dividen los productos por características comunes tales como: tipo de material, destino y uso o disposición tentativa (reuso, remanufactura, reciclaje, eliminación en botadero).

3. Recuperación directa del producto: cuando el producto es recuperado puede ser fácilmente devuelto al mercado o proceso productivo. Los productos pueden ser reusados, revendidos y/o redistribuidos, porque su calidad o causa de inconformidad del cliente son fáciles de solucionar, tales como, pedidos incompletos o con empaques dañados.

4. Transformación, tratamiento o disposición final: se encarga de transformar o tratar los residuos recuperados en productos reusables o remanufacturados para el uso industrial o transformarlos a un estado amigable con el medio ambiente. Dentro de esta transformación se puede comprender los diferentes niveles tales como la reparación total, remanufactura de un producto que es volverlo nuevamente funcional y reutilizable para el cliente. La recuperación es una pieza fundamental para otros productos, el reciclaje es utilizado para nuevos procesos industriales como papel, computadoras, PET, aluminio o botadero de productos.

5. Transporte: para definir el transporte de una manera sencilla, se encarga de mover los productos o residuos entre los puntos de origen o transformación. Se recomienda tener una planeación de rutas con el fin de optimizar los costos y aprovechar adecuadamente los medios de transporte.

6. Almacenamiento: Por otra parte el almacenar mercancías, materiales o residuos de manera temporal o en un determinado tiempo programado y controlado, usualmente son utilizados después de los procesos de recolección, transporte entre los

puntos de origen destino o antes de la transformación o disposición final de producto.

Parte de los procesos deben ser coordinados y complementados entre sí, se buscan gestionar y tratar los productos recuperados de los clientes u otros actores de la cadena de suministro relacionados con las industrias. Es importante considerar un proceso para los productos teniendo en cuenta su ciclo de vida.

### 2.3 LOGÍSTICA INVERSA

El término logística inversa o reversa no solo se utiliza para hacer referencia al papel de la logística en el retorno del producto, sino también a la reducción en origen, reciclado, reutilización de materias primas, sustitución de materiales, eliminación de residuos y desperdicios. Durante los últimos años ha aumentado la destrucción y deterioro del medio ambiente, dando como resultado la contaminación, el cambio climático, la acumulación de residuos generados por las industrias y algunos efectos más graves para el mismo. La logística inversa es una actividad antigua, que busca reciclar objetos para darles una segunda vida, un ejemplo de esto se daba cuando un pueblo era conquistado y las monedas antiguas se tomaban, se fundían y generaban nuevas monedas recicladas. A continuación, se abordarán las definiciones encontradas en la literatura de la logística inversa con el objetivo de identificar su importancia y contribución al mundo empresarial.

Stock (2001) es uno de los principales autores que habla sobre la logística inversa, menciona que las empresas han encontrado una paridad en las cualidades de los productos cómo son; calidad del producto, precios competitivos, duración de ciclos, y los sistemas de entregas. Cuando las empresas logran estos estándares buscan otros factores para poderlos diferenciar, y uno de ellos es lo que se le conoce como logística inversa.

Kopicki *et al.* (1993) menciona que los habitantes se deben de apoyar en tres elementos principales: ser reactivo, proactivos y el valor de la búsqueda. Cuando se

genera un valor en la búsqueda se basa en los programas para reducir los residuos, donde el mejor programa es, la no generación de residuos, como parte de la evolución del ser humano, el consumo genera desechos, de modo que se tiene que buscar capacidades de distribución inversa para aceptar las devoluciones de los clientes y sobre todo en la búsqueda se implementen las 3R, reciclaje, reutilización y las actividades de reducción para obtener mejores prácticas.

Según Rogers y Tibben-Lembke (1999) describen la logística inversa como un proceso de planificación, implementación y control más eficiente en los costos de las materias primas con el fin de obtener el menor costo posible y almacenaje de materiales, inventarios y productos terminados desde el punto de origen hasta el consumidor final, con el propósito de recuperar un valor primario.

Carter y Ellram (1998) explican la logística inversa como un proceso mediante el cual las empresas pueden llegar a ser más eficientes medioambientalmente por medio del reciclaje, la reutilización y la reducción en la cantidad del material que utilizan.

Según Oltra Badenes (2015) la logística inversa comprende las operaciones relacionadas con reutilización de productos y materiales incluyendo todas las actividades relacionadas con la recolección, reutilización y procesos de materiales, productos fuera de eso y/ o sus partes, con el fin obtener recuperación ecológica sostenible.

Con base en las definiciones anteriores se encuentra un factor común, la recuperación para generar valor, es decir, si se tiene un canal inverso con el cual generar una riqueza se consideraría como un objetivo de la logística inversa.

Hoy en día todas las empresas buscan ahorrar costos en materia prima así como el tener una imagen corporativa en donde cuiden sus procesos en pro del medio ambiente, esto se debe a las normativas y las demandas de los consumidores que obligan cada vez más a las empresas a involucrar que sus productos sean recuperados y se les pueda dar un segundo uso.



Para las industrias la logística inversa es clave, no solo por motivos medioambientales, sino también porque está orientada al flujo de productos y materiales desde el punto de consumo con el cliente hacia el punto de origen con el fin de recuperar un valor que todavía poseen dichos productos o materias primas mediante un destino adecuado para los residuos, con la finalidad de reducir los impactos ecológicos y financieros.

### 2.3.1 DIFERENCIA ENTRE LA LOGÍSTICA INVERSA Y LA LOGÍSTICA DIRECTA

La importancia de comprender la diferencia entre las actividades de la logística directa e inversa se deben definir en primer lugar el enfoque de la logística directa, que va a ser la encargada de distribuir sus productos, buscando cumplir la entrega al cliente sin tener fallas en la entrega. Por otra parte, la logística inversa se considera el flujo que tiene desde el cliente hasta el fabricante del producto, con la intención de poder recolectar el material del producto al final de su ciclo funcional para que pueda ser aprovechado o reutilizado. La necesidad de tener un buen sistema de logística inversa surge a partir principalmente en el comercio electrónico para hacer frente a las devoluciones de sus productos, para que la pérdida de la empresa sea la menor posible y en caso de poder aprovechar ese producto a un nuevo usuario se realice o sus componentes sean aprovechados, generando de igual forma un impacto positivo al medio ambiente.

Cabeza (2012), explica que la principal diferencia es que logística directa es la complejidad debido a la entrega eficiente y puntual de una cantidad de producto existente desde la ubicación del producto, hasta el punto donde la demanda existe y la logística inversa se encarga de entregar el producto desde el consumidor hasta el productor. Tal como se observa en la Tabla 2.2.

Después de analizar el cuadro de logística directa y logística inversa, se puede

<b>Logística Directa</b>	<b>Logística Inversa</b>
Busca efectividad entrega de productos	Proceso de gestión de cadena de suministro desde el consumidor hasta el fabricante
No existen costes de reparación y cambio de valor en los libros	Gestión de la demanda más complejo que logística directa
Calidad del producto uniforme	Proceso de almacenamiento más difícil de controlar
Envases uniformes del producto	Incluye Proceso de reciclaje, reparación y re-fabricación
Precio relativamente uniforme	Precio en función de muchos factores
Costos definidos y monitorizados por sistemas de contabilidad	Costos menos visibles y rara vez contabilizados
Gestión de inventario relativamente sencilla	Añade valor al consumidor
Métodos de marketing bien conocidos	Mejor estrategia ante el comercio electrónico

TABLA 2.2: Diferencia entre Logística Directa y Logística Inversa

Fuente: Elaboración propia

observar la importancia que tiene cada una de las actividades que se realizan dentro de la cadena de suministro, jugando un papel importante para la disminución de costos, de modo que se pueda obtener una mayor eficiencia en el tiempo de entrega y para mejorar la calidad. Si bien cada modelo tiene sus aspectos positivos y negativos, la aplicación de logística inversa es la que mejor se adapta al modelo de la mayor parte de pequeñas, medianas y grandes empresas.

La logística inversa para que pueda ser aplicada requiere de una inversión significativa, si tiene un modelo adecuado los beneficios tanto en gastos operativos, como la recuperación de materiales para que puedan aprovecharse y darles un segundo uso, son mayores y agregan valor a la empresa que los aplica.

### 2.3.2 BENEFICIOS DE LOGÍSTICA INVERSA

La logística inversa se ha convertido en una herramienta para dar una mayor eficiencia dentro de los procesos de logística inversa. La cadena de este tipo también es conocida como cadena de suministro circular, cuyo objetivo es mejorar el aprovisionamiento de los productos, servicios e información con el fin de mejorar la cadena de suministro tradicional, reduciendo los costos y el impacto ambiental. A continuación se muestran los beneficios que se tienen en los servicios, en el mercado, costos en la operación y la seguridad ambiental Krikke *et al.* (2003).

Servicios/Mercado	Costos	Seguridad Ambiental
-El servicio de retorno mejora la satisfacción del cliente	-Reducción del riesgo de responsabilidades legales.	
-Reducción del tiempo de investigación y desarrollo (Tiempo de introducción al mercado)	-Recuperación del valor de los materiales y los componentes	-Reduce el impacto ambiental
-Incrementa la disponibilidad de partes de respuesta	-Evita los costos de disposición	-Cumplimiento de las legislación vigentes
-Retroalimentación oportuna a través de recuperación temprana	-Reduce el riesgo por obsolescencia a través de retornos oportunos	-Recuperación mas confiable de productos defectuosos
-Mejora en la calidad del producto a través de la reingeniería	-Mejor producción nueva de partes de respuesta	
-Reparación proactivas imagen "Verde"	-Reducción de retornos	

TABLA 2.3: Beneficios de Logística Inversa

Fuente: Elaboración propia

Al implementar un sistema de logística inversa dentro de la industria, no solo se mejora la calidad del producto, sino que se obtendrán mayores beneficios dentro de la misma, razón por la cual es importante e indispensable introducir un sistema logístico en la empresa para su desarrollo y obtención de los beneficios antes mencionados.

Según Cure Vellojín *et al.* (2006) explican las ventajas y desventajas de la logística inversa. Dentro de las ventajas mencionan el flujo de información, desde el

origen, por lo cual podemos cuantificar las unidades fuera de uso, el reaprovechamiento de algunos materiales, las posibilidades de encontrar nuevos mercados para las empresas, el generar más confianza en aprobar un producto, y que la empresa tenga una mejor imagen.

Una vez que es utilizado y se tiene información sobre el uso y sus términos, las desventajas que se podrían presentar en un nuevo proceso son: rechazo, procesos inexistentes, falta de infraestructura, falta de personal capacitado, mayores costos al integrarlos en el sistema. La razón para implementar una logística inversa va desde el cumplimiento de la legislación ambiental hasta los beneficios económicos los cuales son los siguientes:

- Disminución en los costos de producción, ahorros en la compra de materias primas difíciles de conseguir.
- Servicio al cliente y garantías
- La responsabilidad social
- Servicio al cliente y garantías
- Responsabilidad social
- Genera ventajas competitivas.

Los investigadores de Scattergood (2003), comentan que la logística inversa proporciona ventajas competitivas de manera sostenible. No solo permite controlar los estándares de calidad sino busca identificar las oportunidades de reutilizar productos y disminuir los costos dentro de las empresas.

Luego de conocer las ventajas y desventajas de la logística inversa, se puede analizar que es cada vez más importante, ya que agrega valor, hace posible recuperar y reciclar los embalajes, mejora la gestión de los costos y las empresas pueden tener accesos a nuevos mercados.

### 2.3.3 LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO EN FUNCIÓN AL RECICLAJE

Es fundamental, implementar estrategias de planificación al interior de las organización (Chopra y Peter, 2008) en donde se tomen en cuenta los aspectos y la capacidad de poder recuperar los residuos que el consumidor final deseche.

La Logística ha encontrado, como actividad empresarial, su aplicación en funciones tales como suministro, almacenamiento, producción, distribución y consumo, provocando que de esa forma se involucren otras actividades logísticas para que de esa forma se logren gestiones eficientes y poder hacer frente a las demandas de la sociedad generado por el alto consumo de productos y su inadecuada eliminación (Hesse y Rodrigue, 2004). Es por ello que al día de hoy la logística se orienta hacia la integración de la cadena de suministro considerando el flujo directo y el sentido inverso, es decir el proceso de recuperación se materiales cuando finalizan su vida útil para darles de nueva forma un lugar en la cadena.

Para ilustrar ese proceso en la Figura 2.1 se muestran las etapas que comprenden la logística con la integración de la cadena de suministro (Trends, 1998).

La logística inversa al aplicarla se enfoca en la recolección y reciclaje de los residuos generados por los productos tales como envases, embalajes y residuos peligrosos, ya sea por que los clientes hayan hecho alguna devolución o los productos hayan quedado sin uso alguno.

Algunos autores han establecido definiciones sobre la logística inversa de recolección de residuos, tal es el caso de Fernández (2013) dice que la logística inversa es un conjunto de procesos que tiene como objetivo utilizar los recursos de las empresas y los elementos involucrados en la cadena de suministro.

Rogers y Tibben-Lembke (1999), explican que los procesos de la logística inversa están compuestos por ciertos pasos que permiten el cumplimiento de los objetivos

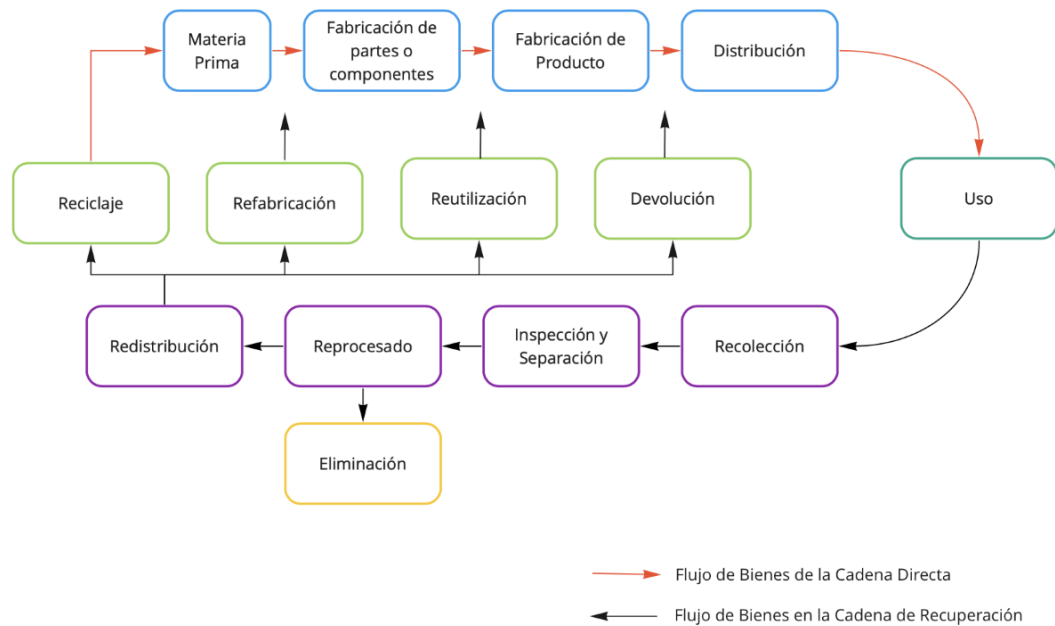


FIGURA 2.1: Ejemplo de una Red Logística Inversa

Fuente: Elaboración propia

a recolectar, inspeccionar (selección-clasificación), almacenar, transportar y transformar y/o tratar de los materiales recuperados y residuos peligrosos

Se puede identificar que estos procesos agregan valor y están involucrados en la transformación física de los materiales y otros residuos que no están involucrados en la transformación, pero comprenden un elemento fundamental como el transporte, almacenamiento, tecnologías de información y la comunicación

Huaca y Salomé (2019) mencionan que los productos tienen diferentes fases, costos variables, impacto medioambiental, para los procesos de logística inversa. Es importante definir el proceso que debe tener cada producto para que pueda ser clasificado y se le pueda dar una segunda vida, con el fin de reducir los daños ambientales y generar ganancias para la empresa.

### 2.3.4 RELACIÓN ENTRE LA CULTURA DEL RECICLAJE Y LA LOGÍSTICA INVERSA

Debido al problema tan grande que se presenta ante la excesiva generación de basura por el consumo de la sociedad, no solo en el país sino en todo el mundo, no sólo la población debe fomentar esa cultura del reciclaje. Al tratarse de un problema global Ciliberti *et al.* (2008) determina que las empresas han comenzado a realizar acciones en donde se denomina como la responsabilidad social empresarial, ante la presión por parte de las autoridades de tratar de regular con normas, así como la presión social por parte de los consumidores han ocasionado que la empresas busquen ese enfoque social responsable en sus prácticas cotidianas.

Para entender mejor a lo que se refiere con la responsabilidad social empresarial, Carroll (1999) define que son las prácticas que llevan a cabo las empresas en donde se crean no sólo beneficios a la sociedad, sino que atienden también el enfoque ambiental, económico, ético, que motive a los consumidores a seguir apoyando sus productos con el consumo diario, entendiendo que la empresa toma medidas para que se involucren con la sociedad, como se mencionó puede ser tanto de forma económica o ambiental. Esto además de ser una estrategia de marketing, le crea beneficios a la empresa ya que la sociedad de cierta forma se motiva a consumir ese tipo de productos, generando mayores ingresos, con pequeñas acciones por parte de las empresas.

Gómez (2005) dentro de su investigación establece cinco categorías, las cuales son concepto de trabajo, valores, procesos laborales, relaciones interpersonales y responsabilidad social. Dónde se debe tener en cuenta que la Responsabilidad social empresarial es parte de la cultura organizacional de la empresa, que define prácticamente el objetivo que va a tener la misma para su crecimiento.

Las empresas han comenzado a establecer procesos de logística inversa en donde lo que buscan es implementar un modelo en donde sus productos puedan tener una

correcta disposición final y que su impacto ambiental sea el menor posible, para poder así reducir este problema que se enfrenta la sociedad. Con prácticas tales como el uso de materiales reciclados en sus productos, la creación de programas en donde involucren a los usuarios para reciclar sus productos han tenido un impacto importante que involucra a la sociedad a ir creando esa cultura y a tener cierta identidad con la empresa.

La Responsabilidad social empresarial puede basarse en una serie de pasos en donde se puedan analizar los posibles riesgos ambientales así como el impacto que van a tener sus productos, cómo se va a implementar el proceso de logística inversa con la creación de estrategias o procedimientos que favorezca la reducción del impacto de sus productos y también impacte a la sociedad con la implementación de dichas políticas. Debido a esta presión muchas empresas han tenido que modificar sus productos o el plan de desarrollo que tenían para poder ser calificadas como empresas socialmente responsables, creando también así un factor competitivo en el mercado.

Palacios y Lacoba (2005) hacen mención que una vez que llega a el fin de su ciclo de uso los productos que genera la empresa el objetivo de la misma debe ser su recuperación de dichos productos, por lo que se deben de analizar en primer lugar si el motivo por el cual el producto se deja de utilizar se debe a que ya no cumple o resulta necesario para lo que requiere el consumidor, si el producto al dejar de ser utilizado puede ser recuperado a través de la aplicación de la logística inversa en donde se le pueda dar algún valor añadido o si con la aplicación de la misma logística inversa se puede dar un nuevo ciclo de vida al producto ya sea por que el mismo aún cuenta con ciclo de vida que pueda ser aprovechado por otro usuario, o porque alguno de sus componentes puedan ser aprovechados o simplemente el material con el que fue construido sirve para la creación de un nuevo material.

De forma conjunta la sociedad y las empresas han empezado a tomar las riendas para crear esa conciencia ambiental que hoy en día se necesita para reducir el impacto



ambiental, las empresas por su parte con la aplicación de la logística inversa durante todo su proceso para poder prevenir, analizar la disposición final de sus productos y observar el ciclo de vida que tienen los mismos y la sociedad ayudando a que esos productos puedan tener el destino que buscan las empresas con la implementación de sus procesos y programas.

En la actualidad, la mayoría de empresas cuentan con el servicio de logística inversa para la devolución de productos, como una parte fundamental de su cadena de suministro. Coca-Cola, ha implementado un modelo de logística inversa de recolección de residuos ha generado y fomentado diversos programas, los cuales buscan que la gestión de sus productos y de los residuos que generan por su actividad sean devueltos para que puedan ser reutilizados, para que el aluminio, el papel o el vidrio puedan ser adquiridos por empresas recicladoras. La compañía de forma paralela ha logrado a través de sus programas convertir el PET en rPET, el cual consiste en un plástico más competitivo alargando la vida útil del mismo a comparación del plástico tradicional PET.

Para lograr un ágil proceso de logística inversa, en donde se involucra la recogida de los productos, se deben implementar estrategias para optimizar las rutas que favorezcan a la empresa, tal es el caso de la empresa Nestlé, la cual es una marca que se caracteriza por tener buenas prácticas logísticas, gracias a la formación con sus programas, ha logrado capacitar a sus distribuidores para lograr una correcta gestión de sus productos, reduciendo así la cantidad de residuos que se generan con sus productos, así como la implementación de logística inversa que se debe llevar a cabo sea en la menor cantidad de operaciones favoreciendo que los recursos utilizados en este proceso se reduzcan (Beetrack, 2020).

Otra de las estrategias, a las que recurren las empresas, donde es aplicada la logística inversa, es la etapa de reacondicionamiento, la cual consiste en volver a comercializar un producto que el cliente ha devuelto. Rent The Runaway, es una empresa norteamericana que alquila vestidos de varios diseñadores en sus página en

línea, su modelo de negocio consiste en recibir los vestidos que devuelven los clientes, para poder así limpiarlos y almacenarlos, para que estos puedan ser alquilados por otro cliente. Aplicando de esta forma la logística inversa y viéndose beneficiada por la renta de estos vestidos, donde son colocados en estanterías de forma temporal para que puedan ser alquilados por otros clientes.

Cosgra es otra empresa que aplica la logística inversa, dentro de su etapa de reparación de productos, en donde su enfoque principal es la reparación de productos averiados, para ponerlos de nuevo en funcionamiento. La compañía distribuidora de componentes para empresas de automoción y electrónica, recolecta productos que son comercializados en Europa, África y América Latina, para que puedan ser reparados y así poder alargar la vida útil de los productos recuperados y almacenados.

Surplus Motos, es una empresa de recambios de motos de ocasión, la cual concentra su modelo de negocio en la canibalización, etapa del proceso de logística inversa, que consiste en la recuperación de una parte de componentes de un producto que ha finalizado su vida útil, por lo que se desmonta el producto que fue utilizado, para que puedan ser inspeccionadas las piezas recuperadas, cumpliendo los estándares de calidad para que estos puedan ser reaprovechados.

La compañía con este modelo logra que la venta de los productos almacenados sea desde un 30 % a un 70 % más económico en comparación con los recambios nuevos.

Se demuestra tal cual que la aplicación de la logística inversa, es una oportunidad competitiva para la empresas, trayendo con ella beneficios no sólo económicos, sino medioambientales, beneficiándose en darle una segunda vida a sus productos, recuperando su valor o realizar una correcta eliminación. Para ello es importante contar con un buen diseño para la aplicación de este proceso, para que este resulte eficiente y sea de beneficio para las empresas y para crear un impacto en el medioambiente (MECALUX, 2021).

### 2.3.5 BARRERAS DE LA LOGÍSTICA INVERSA

Dentro de la logística inversa existen dificultades para su implementación, debido a que se trata de un proceso complejo, que depende de la eficiencia en los procesos y actividades por parte de la empresa.

Cuando las industrias deciden implementar un sistema de logística inversa, se enfrentan al desconocimiento de las áreas dentro de la empresa en su aplicación. Los sistemas no suelen adaptarse, por lo tanto, los costos de logística inversa son generalmente superiores a los de la logística directa.

López Parada (2010), expone el grado de dificultad que enfrentan las empresas al adaptarse a nuevos objetivos para cumplir con las normativas y poder ofrecer productos ecológicos. Esto se debe a que resulta complejo la aplicación de un modelo de logística inversa, provocando que la cantidad de reducción de residuos no sea la esperada, por lo que se busca mejorar el proceso de aplicación para disminuir los errores en las devoluciones y desechos a lo largo de la cadena de suministro, reducir los riesgos ambientales, buscar alternativas dentro de los sistemas de proceso y por último buscar alternativas que conlleven a una mejora continua (Ninlawan *et al.*, 2010).

Por su parte Thierry *et al.* (1995) señalan que las empresas únicamente se enfocan en fabricar sin tener la responsabilidad de lo que sucede con sus productos después de que el cliente los utiliza, esto se debe a que las empresas creen que los costos de incorporar una logística inversa no es una inversión que genere los beneficios suficientes a la empresa y los clientes no están dispuestos a pagar un precio extra por productos ecológicos para mejorar el ciclo de vida. Los costos que genera el tratamiento de residuos se han elevado de forma exponencial y los gastos deben ser cubiertos por el presupuesto de los gobiernos o en caso de no ser suficiente, por la ciudadanía para que los productos sean transportados a un relleno sanitario o para su incineración.

Para implementar un modelo de logística inversa que resulte eficiente, se debe tener en consideración las principales barreras que se enfrentan las empresas en su aplicación, tales como la gestión de residuos, la recuperación de materiales para su reciclaje y recuperación de productos para poder darles un nuevo uso, o simplemente la redistribución de productos. Se debe tomar en cuenta las decisiones de carácter estratégico y operativo para aplicar de forma adecuada el modelo, debido a que la mayoría de las veces se desarrollan de forma aislada. Fleischmann *et al.* (1997).

En la figura 2.2 se ilustran los problemas que se han identificado dentro de la logística inversa, en donde se involucran procesos de gestión, de transporte, de ruta que en muchos casos es una combinación de las mismas.

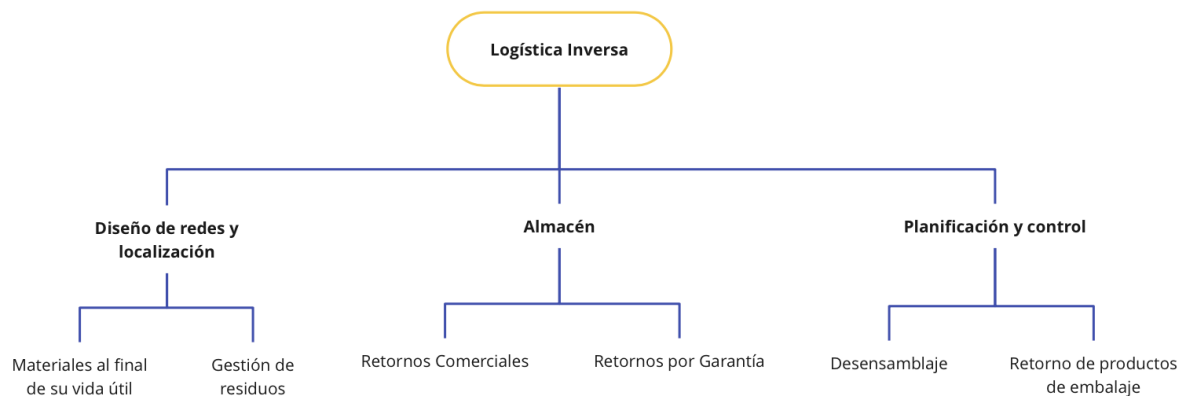


FIGURA 2.2: Barreras abordados en la Logística Inversa

Fuente: Elaboración Propia

En primer lugar, para comprender más sobre los problemas que se enfrentan al implementar la logística inversa, debemos hablar sobre la localización de instalaciones, y los aspectos que se toman en cuenta para el diseño de la logística inversa. Dentro de los modelos se toman aspectos importantes como cuantas instalaciones son necesarias, así como la ubicación de las mismas para el tratamiento de los residuos, el determinar el uso o no de los puntos de recolección y el aspecto económico.

En Estados Unidos la aplicación de el Facility Siting Credo, 1990, se enumeran condiciones y pasos a seguir para adoptar una decisión locacional y poder obtener un resultado aceptable para todos sin adicionar algún problema.

Kunreuther *et al.* (1993) establecen que es necesario crear un mecanismo donde la participación por parte de la sociedad cree ese vínculo de confianza, para que los participantes en ella realmente se involucren en la misma, con el apoyo de compensaciones económicas que se les ofrezcan.

Du y Evans (2008) plantea un modelo de logística inversa, con el fin de minimizar los costos totales y reducir el retraso en el tiempo del ciclo de atención al consumidor, para lograr diseñar una red de logística inversa, tratándose de un servicio de reparación postventa, en donde su principal objetivo y enfoque es conocer el número de instalaciones que son necesarias, para poder disminuir el tiempo de respuesta con los clientes tomando en consideración la capacidad operativa de las plantas.

Listeş (2007) utiliza un modelo para el análisis de redes de logística inversa, en actividades de remanufactura, donde los factores a considerar son los ingresos que se tienen, así como los costos para poder reducirlos de manera significativa. Para lograrlo se realizan posibles escenarios de demanda y retornos de manera conjunta estableciendo probabilidades de ocurrencia.

## 2.4 HERRAMIENTAS PARA EFICIENTAR EL PROCESO DE RECOLECCIÓN

Establecer una cadena logística dentro de las empresas, es importante para eficientar los procesos que se realizan dentro de la misma y poder atender las demandas generadas por el consumo acelerado, así como el tratamiento y recolección de los residuos generados. Ante la falta de sistemas de recolección adecuados, así

como el costo elevado de operación que se requiere para el acopio de dichos materiales, resulta necesario utilizar herramientas que favorezcan a las empresas para poder aumentar la generación de materia prima.

Dentro de la literatura se pueden identificar métodos de solución, sistemas de recolección de residuos, modelos de localización, métodos de planeación de rutas y métodos de recolección de datos. Diversos autores han aplicado estas herramientas, sin obtener un método adecuado que aporte una solución óptima que pueda ser aplicada. De la investigación realizada, se encontraron diversas herramientas que pueden ser aplicadas al problema planteado, las cuales para tener un mayor entendimiento, su clasificación y división se muestran en la Figura 2.3.

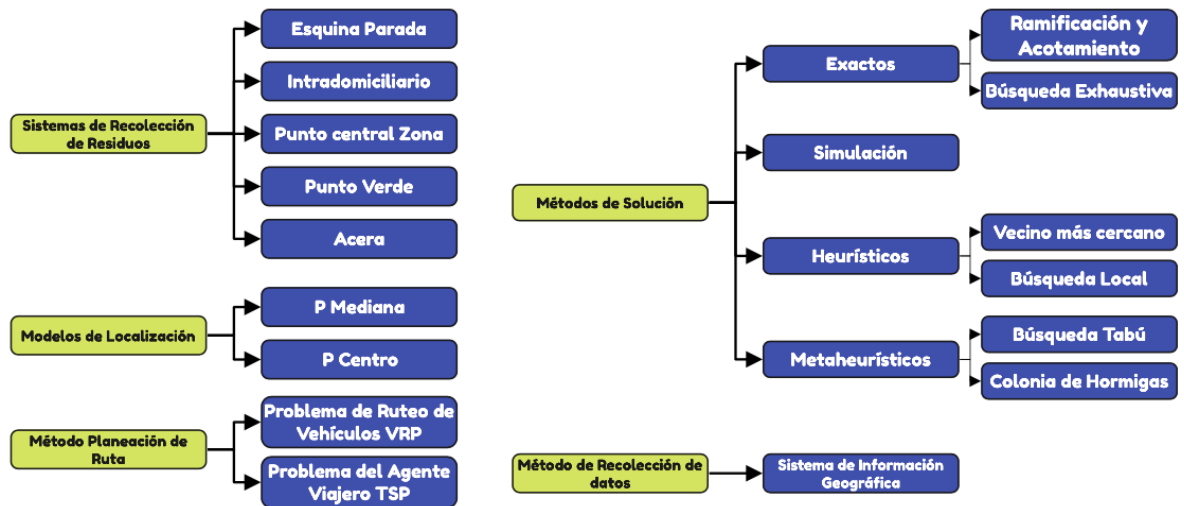


FIGURA 2.3: Herramientas del proceso de recolección de residuos

Fuente: Elaboración Propia

A pesar de haber múltiples modelos de solución al problema planteado, estos tienen algunas generalidades tales como: su objetivo, que es cómo se va a maximizar o minimizar lo que se requiere; variables, son los elementos que vamos a encontrar al aplicar el modelo en específico que están ligadas en función al objetivo; Restricciones, en algunos modelos no se admiten algunos valores de variables, por lo cual el modelo se limita a una posible solución u objetivo. Según Winston y Goldberg (2004), un modelo con estas características, su principal objetivo es encontrar el valor que

optimice un objetivo y pueda satisfacer las restricciones que se tienen mediante la aplicación de estos modelos.

## 2.5 SISTEMAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS

Angelelli y Speranza (2002), detallan varios sistemas para la recolección de los residuos en función de la ubicación de los contenedores. En dónde se involucra la participación de la sociedad, teniendo en cuenta cuál es su comportamiento en torno al reciclaje, y la disposición que tienen de recorrer cierta distancia para depositar su basura, porque son quienes intervienen de manera directa para que su aplicación sea efectiva.

Uno de los métodos se denominan como Sistema de Carga Lateral, este sistema consiste en que la población debe depositar sus residuos en contenedores localizados en puntos cercanos, por ejemplo al ubicar un contenedor por colonia, la población se va a beneficiar al tener la libertad de depositar sus residuos cuando quieran, los vehículos recolectores se encargará de levantar los contenedores para verter su contenido y posteriormente otro camión realizará la desinfección, favoreciendo la reducción de costos y mano de obra.

Otro método que hacen mención es el sistema de carga lateral y carrocería desmontable, este método funciona de forma similar al anterior con la diferencia de que el camión recolector llega con un contenedor limpio, llevando el contenedor lleno.

Racero Moreno y Pérez Arriaga (2006), hacen mención de otro método denominado de esquina o de parada fija, el cual se destaca por que no cuenta con una localización de contenedor, la función de contenedor la realiza el vehículo recolector fijando puntos estratégicos y horarios en los cuales los usuarios pueden ir a dejar sus residuos, si bien no es un método convencional, beneficia la reducción de costos.

El método de llevar y traer o también conocido como intradomiciliario, en

diferencia con el método acera, consiste en que el recolector entra hasta el domicilio por los contenedores de basura teniendo que regresarlos al sitio donde los tomaron, sin embargo este método resulta muy costoso incluso más que el método acera ya que implica que el recolector deba ingresar al domicilio, ocasionando también con ello un aumento en el tiempo de recolección.

González-Torre y Adenso-Díaz (2005) hacen referencia a tres formas de ubicación de contenedores, los cuales son: Punto Central de Zona, Método de Punto Verde y Método de acera.

El método central de zona (ver Figura 4.7), se enfoca en ubicar los contenedores a lugares estratégicos que logren abarcar los mayores puntos de demanda, con este método se puede crear un equilibrio entre la participación de la población, el costo que implica la recolección de los residuos, de forma que no sea tan costosa su operación como los otros métodos identificados y que la cobertura que se pueda abarcar sea mayor de forma conjunta con la participación social.

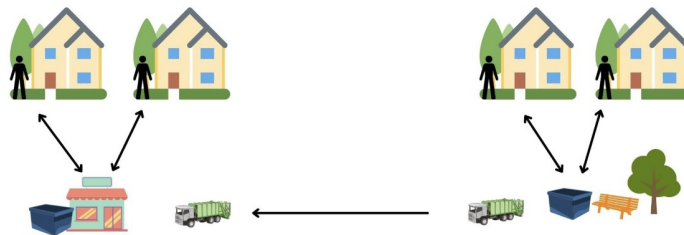


FIGURA 2.4: Método Punto Central Zona

Fuente: Elaboración Propia

El método de punto verde (ver Figura 2.5), trata de minimizar el número de contenedores ubicándolos en lugares transitados tales como supermercados, plazas, de forma que la población pueda llevar sus residuos a cambio de algún incentivo, o que motiven a realizar este tipo de acción. Es el método que genera menos gastos de operación, toda vez que minimiza los puntos de recolección, sin embargo es la forma menos efectiva para lograr una recolección mayor, ya que la población es quien afronta ese gasto de ir a depositar los residuos en alguno de los contenedores.



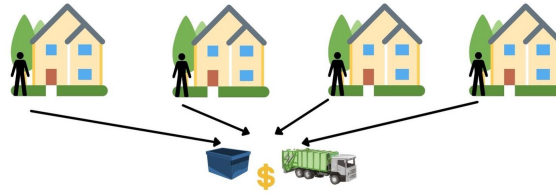


FIGURA 2.5: Método Punto Verde

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente el método de acera (ver Figura 2.6), resulta ser el más costoso en gastos operativos de recolección, ya que consiste en ubicar un contenedor afuera de cada hogar, donde la población deposite sus residuos para que estos puedan ser recolectados, por horario determinado y día, que es usualmente el sistema aplicado en cada ciudad para la recolección de basura. Al ser más costoso ocasiona que no pueda desarrollarse una mayor inversión en instalaciones que se dediquen a la separación de residuos y estos puedan ser aprovechados dándoles un segundo uso.

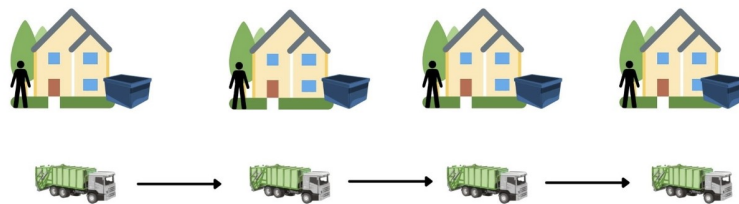


FIGURA 2.6: Método Acera

Fuente: Elaboración Propia

### 2.5.1 MODELOS DE LOCALIZACIÓN

Para poder entender cómo son aplicados los modelos de localización dentro del proceso de logística inversa debemos entender a estos, como el conjunto de procedimientos matemáticos que buscan solucionar problemas, de donde localizar los centros de servicios, con el fin de que el usuario optimice el tiempo a la hora de utilizar dicho servicio (Bosque Sendra *et al.*, 1995).

Los problemas de localización, tienen un rol muy importante para determinar la ubicación geográfica de las instalaciones. Los modelos de localización tienen la finalidad de establecer lugares geográficos exactos para cumplir con la demanda, ahorrar costos de traslado entre ubicaciones, con el fin de disminuir tiempo o distancias entre el traslado del mismo. En términos generales la localización de instalaciones, nos referimos a cualquier tipo de instalación que deseemos ubicar.

Los modelos de localización se diferencian por características, es decir, la estructura de modelo se adecúa dependiendo de las restricciones en función de los criterios. Los modelos de localización pueden caracterizarse de acuerdo a su estructura, los modelos deterministas recolectan información de datos y los parámetros de entrada. Por ejemplo, si se introducen los mismos datos con los mismos parámetros, siempre producirán la misma salida. Los problemas básicos se consideran de carácter discreto y se dividen en dos grupos: modelos de localización, modelos de centros y cobertura (Revelle *et al.*, 2008).

Church y ReVelle (1974) introducen el modelo de localización máxima cobertura. Los problemas de cobertura tienen como objetivo maximizar el total de personas cubiertas de una distancia con un determinado número de instalaciones.

### 2.5.2 MODELOS CLÁSICOS DE LOCALIZACIÓN

P-mediana: Es conocido como un problema de asignación de almacenes, consiste en determinar el número de instalaciones ubicadas  $P$  para que minimice la distancia ponderada por la demanda de servicio a todos los clientes, al menor costo posible.

Uno de los resultados más destacables en el estudio del problema de la p-mediana, establece que la búsqueda del conjunto óptimo de las  $p$  medianas se puede limitar a los usuarios de la red (Hakimi, 1986).

El método ha sido utilizado para ubicar fábricas, almacenes por mencionar algunos, para poder determinar la ubicación de estos, y poder atender las necesidades de los usuarios. Sin embargo existe un problema con este método, es que no se puede determinar, predecir el comportamiento o las necesidades que van a requerir los usuarios, únicamente se tiene una estimación (Darós y Arce, 1998).

Gautam y Kumar (2005) utilizaron un modelo clásico de  $p$  mediana para minimizar la distancia desde los puntos obtenidos hasta el contenedor más cercano. El objetivo se cumplió ya que ningún residente tenía que recorrer más de 250 m para llegar a un contenedor y los autores analizaron que entre más cerca los contenedores los residentes tenían más accesibilidad de reciclar.

Este método localiza  $p$  instalaciones, para minimizar la distancia total entre las demandas de los usuarios y sus instalaciones más cercanas (Daskin, 1983). Para ello representa como objetivo el poder satisfacer la demanda de todos los usuarios que se tienen contemplados a un mínimo costo. Como restricción establece que cada usuario debe ser atendido por un servidor, por lo que se deben instalar  $p$  localizaciones. En caso de que un usuario no se localice dentro del rango de la localización, ningún otro puede atender a dicho usuario, así estableciendo un dominio a las variables.

Luce y Raiffa (1954), dieron una clasificación a los datos deterministas, conservadores e inciertos, misma que al día de hoy se mantiene:

1. Es el caso de lo cierto el cual establece que la probabilidad es igual a la unidad y es la única forma que se puede presentar el problema.
2. El caso aleatorio, el cual establece que únicamente el problema se puede conocer en términos de probabilidad, y
3. Caso total de incertidumbre, no se pueden conocer las variables ni probabilidades ante los problemas que se puedan presentar.

Existen modelos utilizando este método con datos deterministas, mismos que

han sido estudiados a lo largo de los años, sin embargo, en modelos donde esta variante se deriva de alguna investigación de mercado, o no se tienen datos históricos, debido a que influyen muchas variantes dentro del modelo que no puedan ser determinadas, se podrá conocer el resultado conforme pase el tiempo. No obstante, si se requiere, que al aplicar este modelo, Gajardo *et al.* (2010) señala que, los datos sean lo mayor posible apegados a la realidad, ya que en caso de ser erróneo y se tenga que realizar cambio principalmente repercute en una decisión de carácter estructural, lo que implicaría un costo bastante elevado para corregir el error.

P-centros: El problema del p-centro es un método de localización, de aproximación en tiempo polinomial cuando la demanda de cada usuario es igual a 1. Hakimi (1986) demostraron que colocar p instalaciones y que cada instalación atienda a diferente número de clientes, estableciendo el punto, para minimizar la distancia entre el cliente y la instalación. Según Hakimi (1986), existen dos variaciones en el modelo, que es el Vértice, el cual restringe el conjunto de posibles ubicaciones de instalaciones a los nodos de la red, y la Absoluta, que va a permitir ubicar en cualquier lugar las instalaciones a lo largo de la red.

Este modelo tiene su aplicación por ejemplo en la localización de unidades de urgencias, estaciones de policías, bomberos por mencionar algunos, en donde lo que se busca es acortar el tiempo de respuesta ante cualquier evento y donde cobra relevancia el poder determinar la ubicación entre la zona de demanda y su instalación. Uno de los trabajos más significativos para el problema del p centro, Elloumi *et al.* (2004) propone una reformulación del problema basado en los radios de cobertura, proponiendo una metodología de solución con un enfoque exacto.

Al respecto Kao *et al.* (2010), utilizaron un modelo (SSL) de ubicación de servicio más corto, asignaron puntos de recolección y compararon los resultados con otros modelos. El objetivo es minimizar la distancia promedio entre cada hogar y el depósito de reciclaje más cercano utilizando un modelo clásico de localización de P centro. Las variables consideradas son el promedio del servicio, la relación

entre los hogares que reciben un servicio y los residentes que reciben el servicio a una distancia aceptable. Se aplicó un sistema de información geográfica (SIG) en la ciudad de Hsinchu, Taiwán, los datos utilizados en el modelo son la población, área y mapas aéreos.

Se pueden clasificar los problemas de localización en redes por: la localización de los establecimientos, se restringe a los vértices, la demanda de los establecimientos que se requieren y finalmente los objetivos que se buscan como minimizar costos de servicio y cobertura. Su aplicación resulta eficiente siempre y cuando la distancia que se busca cubrir, sea corta, y el umbral para el radio de atención a los clientes o usuarios que se busca atender puedan ser cubiertos utilizando no más de una instalación, en caso de no ser así, se puede aumentar el umbral, pero resulta que este método no es eficiente, y su algoritmo no es capaz de resolver cuando se trate de distancias largas. Se han tratado de presentar métodos de solución que resuelvan la problemática para aumentar el umbral y dicha fórmula sea capaz de atender distancias largas, sin embargo los métodos propuestos, no reportan soluciones de calidad a este método en un tiempo razonable (Quevedo Orozco, 2014).

Máxima Cobertura: Los problemas MCLP, están enfocados en maximizar la cobertura dado a un número de zonas de demandas cubiertas en un determinado número de instalaciones en una distancia máxima (Jiménez López, 2019). Los modelos de cobertura son el conjunto de puntos de demanda, a los cuales se les puede asignar una ponderación de acuerdo a las condiciones del problema. Sin embargo los tipos de instalaciones requieren ciertos criterios dependiendo de la distancia, media o promedio, entre la población y las instalaciones.

## 2.6 MÉTODOS DE PLANEACIÓN DE RUTAS

Para poder destinar los residuos generados por la población y que estos lleguen a las plantas recicladoras es importante analizar los modelos de ruteo para poder

definir el método que se adecue al problema planteado. Se deben de considerar las variables que se involucran en el proceso, tales como la capacidad de transporte, la ruta, el tiempo, distancia y costos que se generen para el transporte de los residuos. Para poder obtener el resultado óptimo se debe considerar el uso de estas herramientas que favorezcan el análisis de todos estos datos, para que las empresas determinen las estrategias a aplicar que les beneficien con rutas más cortas y eficientes que reduzcan los costos de operación.

Dentro de la revisión de literatura se han encontrado distintas herramientas para la planeación logística de la red de transporte, así como métodos de soluciones que determinen el proceso a seguir. Para comprender los métodos que permiten llegar a una posible solución, se deben de tener en cuenta la variedad de modelos que se han analizado, con el fin de comparar los resultados al aplicar estas herramientas.

### 2.6.1 VRP (VEHICLE ROUTING PROBLEM)

En la actualidad las PYMES llevan a cabo un diseño de sus rutas de manera empírica (Hernández y Pérez, 2016). Por ello es importante que las empresas optimicen sus rutas mediante la aplicación de herramientas que se adapten a la problemática que presentan o mediante un modelo matemático. Los problemas de ruteo de vehículos tienen la finalidad de resolver problemas de cómo hacer llegar los productos a los clientes, con la finalidad de encontrar la ruta más óptima, partiendo desde el depósito, de modo que se visiten todos los clientes satisfaciendo su demanda y el vehículo regresa al depósito. Los problemas de distribución se refiere al servicio en un periodo de tiempo, con un conjunto de clientes y vehículos, el cual se realiza por los conductores utilizando una red de carreteras. El problema del VRP facilita un conjunto de rutas, la cual se realiza por un único vehículo que inicia y termina en su propio almacén, con el fin de satisfacer las necesidades de los clientes, las restricciones operaciones y reducir los costos de transporte (Goel y Maini, 2017).

Para planear y elaborar una ruta que resulte efectiva, se deben considerar ciertas limitaciones en su operación, como las características del vehículo, los puntos de recolección, el tipo de material a recolectar así como la capacidad tanto vehicular como del depósito. Algunas limitación de operación que se encuentran son: el vehículo cuenta con cierta capacidad de carga la cual no puede excederse a lo largo de la ruta; la cantidad a recolectar puede variar en cada punto de recolección por algún cambio de circunstancias donde aumente o disminuya; únicamente se cuente con determinado tiempo para poder recolectar los residuos en cada punto, o el periodo de trabajo del operador del camión.

Los problemas de distribución o mejor conocidos como problemas del ruteo de vehículos VRP (por sus siglas en inglés Vehicle Routing Problem), se refiere a aquellos problemas de optimización donde un conjunto de clientes son atendidos por grupo de vehículos disponibles (Goel y Maini, 2017). El objetivo es encontrar una asignación para los camiones a las estaciones de servicio, con el fin de satisfacer las demandas y la distancia recorrida por la flota de camiones. Este problema tiene diferentes restricciones, parámetros y situaciones en objetivos en particular.

El origen del Problema de ruteo de vehículos fue aplicado por Dantzig y Ramser (1959), proponiendo una fórmula matemática la cual fué aplicada a un caso real de entrega de combustible en estaciones de servicio, sirviendo como base para poder formular posteriormente un algoritmo que permita aumentar el número de variables y restricciones. Fue hasta 1964 en donde Clarke y Wright lograron formular correctamente el algoritmo de VRP (Maguiña Agurto, 2016).

Para poder ir mejorando los procesos logísticos en las empresas es muy utilizado el problema de VRP, el cual determina una serie de rutas para un vehículo o un conjunto de vehículos, para determinar cierto número de ubicaciones o clientes geográficamente. Por lo que en su aplicación se toman criterios tales como la cantidad de vehículos con los que se cuentan, la capacidad de recolección que tienen, cuales van a ser los puntos donde tienen que llegar, así como la demanda que se va

a requerir. De acuerdo al tipo de problema al que se ha ido aplicando este modelo, se han elaborado variantes de VRP. Las variantes más utilizadas son de capacidad limitada, con distancia restringida, tiempo ventana o con retorno (Gutiérrez Mite *et al.*, 2019).

## 2.6.2 CVRP PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS CAPACITADOS

El problema de ruteo de capacidad limitada o por sus siglas CVPR, fue desarrollada por Dantzing y Ramses, la diferencia en su aplicación es que se concentra en que los vehículos van a contar con las mismas características. En este problema cada uno de los vehículos tiene una capacidad determinada y no se puede cargar el vehículo por encima de la capacidad, el objetivo es satisfacer la demanda de los clientes a través de un conjunto de rutas que comienzan y terminan en un almacén común, los vehículos cuentan con una capacidad limitada para satisfacerla. La función objetivo del CVRP es minimizar el costo total para abastecer a todos los consumidores (Jansen, 1993).

La demanda depende de los consumidores, todos los vehículos son iguales, tienen la misma capacidad y salen desde los centros de distribución. Las cantidades de demanda de los clientes se determinan y se determinan entre el número de vehículos sin exceder la capacidad o fraccionar la demanda de los clientes. El CVRP consiste en encontrar la cantidad exacta de rutas, cada una asignada a un vehículo, con el mínimo costo posible, con el fin de satisfacer a todos los clientes. Una de las restricciones que presenta el CVRP, cada ruta debe empezar y terminar en el centro de distribución, cada uno de los clientes debe ser visitado por una sola vez y la suma de las demandas no debe superar la capacidad del vehículo. Las características del CVRP son:

- Cada vehículo tiene una ruta asignada, inicia y finaliza en el depósito.



- Cada uno de los clientes pertenece a una sola ruta.
- La demanda de los clientes es menor a la capacidad de los vehículos.
- La suma de las demandas de los clientes visitados no debe ser mayor que la capacidad total del vehículo.

### 2.6.3 DCVRP PROBLEMA DE RUTEO VEHÍCULAR CON RESTRICCIÓN DE CAPACIDAD Y DISTANCIA

Toth y Vigo (2002) La variante con distancia restrictiva DCVRP al igual que la de capacidad limitada, los vehículos van a tener las mismas características solo que a diferencia de la anterior, el problema se va a enfocar en la distancia a recorrer teniendo un máximo de distancia permitida. En este problema se deben considerar las restricciones de capacidad del vehículo y las distancias máximas son obligatorias (el tiempo). Para cada ruta no se debe exceder la distancia establecida en el problema del DCVRP.

### 2.6.4 VRP CON VENTANAS DE TIEMPO VRPTW

Otra de las variantes realizadas al VRP es la de ventana de tiempo o VRPTW, en su aplicación entra un elemento al que se va a enfocar la problemática que es el tiempo que se va a ocupar, en el instante en el que los vehículos que salen del CEDIS, se les da un tiempo de recorrido para cada arco y un tiempo de servicio adicional para cada consumidor. En este problema se debe encontrar una cantidad de recorridos con el mínimo costo, cada centro de consumo es visitado solamente por una ruta, la suma de las demandas de los centros de consumo es visitado por una sola ruta y n debe exceder su capacidad del vehículo, el servicio de consumo comienza dentro de la ventana de tiempo y el vehículo se detiene por instantes de tiempo. El

objetivo de esta variante es satisfacer la demanda de los clientes en un determinado tiempo. El vehículo debe cumplir con los parámetros de tiempo determinados, en caso de que en algún punto termine antes de lo esperado. Las ventanas de tiempo son definidas de manera que todos los vehículos que salen del CEDIS en un tiempo cero (Rocha Medina *et al.*, 2011).

El CVRP tiene restricción en cual se considera el espacio de tiempo límite conocido para atender a cada uno de los clientes, el cual el cliente está disponible para recibir la visita del vehículo. Es decir los vehículos de recolección únicamente estarán en cada punto a visitar un tiempo limitado o estará restringido a determinado horario es por ello que toma el nombre de tiempo ventana. El servicio de cada consumidor debe comenzar dentro de la ventana de tiempo y el vehículo debe parar en el centro de consumo por un determinado tiempo (Taillard *et al.*, 1997).

### 2.6.5 VRPB CON DEVOLUCIONES

El problema VPRB, consiste en contrar la cantidad de recorridos con un costo mínimo, los consumidores pueden demandar o retornar sus productos a cada centro de consumo por lo que es necesario considerar los bienes que los consumidores devuelven al vehículo repartidor. Los centros de distribución son visitados por una sola ruta, las cantidades distribuidas y recogidas son fijas y es importante conocerlas con anticipación. El problema se divide con dos restricciones; la primera contiene  $n$  centros de consumo de recorrido (linehauls), son los que requieren una cantidad de productos para que sea entregada y el segundo contiene  $m$  centros de consumo con recorrido de retorno, se le conocen como (backhauls), estos requieren de una cantidad de productos que debe ser recogida. La restricción más importante entre linehaul y backhaul, es cuando la ruta puede servir al mismo tiempo los consumidores todos los centros con linehauls se deben atender antes de que algún centro de consumo con backhaul (Toth y Vigo, 2002).

### 2.6.6 VRP CON MÚLTIPLES DEPÓSITOS MDVRP

El MDVRP con múltiples depósitos está diseñado para encontrar un conjunto de rutas con un conjunto de clientes que requieren de una demanda determinada. Una flota de vehículo atiende cada una de las demandas, de modo que cada ruta inicia y finaliza en el mismo depósito, los clientes deben ser atendidos en una sola visita de un vehículo, la demanda requerida por los clientes al depósito no debe superar la capacidad del mismo. El VRP con múltiples depósitos es un problema de ruteo de vehículos con varios depósitos que están ubicados en diferentes puntos, con el fin de satisfacer la demanda de todos los clientes. El problema de MDVRP se divide en dos subconjuntos; el primer conjunto de clientes debe ser atendido y el segundo conjunto de depósitos obtenidos. Para satisfacer la demanda de todos los clientes ya asignados, no va hacer posible separarlos de forma que queden cerca del depósito.

Flood (1956), planteó un problema de VRP el cual fue denominado como problema de agente viajero o TSP (Travelling Salesman Problem). Se describe problema de agente viajero ya que se debe recorrer determinado número de ciudades buscando que la ruta a recorrer sea la más óptima para disminuir la distancia terminando en el punto de origen.

### 2.6.7 TSP (TRAVEL SALESMAN PROBLEM)

El problema del agente viajero o conocido por sus siglas TSP “Traveling Salesman Problem”, ha sido estudiado y aplicado a lo largo de los años, fue definido por Hamilton (2013) en el siglo diecinueve, este problema radica básicamente en que un viajante tendrá que recorrer determinado número de ciudades, comenzando su recorrido en determinada ciudad, recorriendo las demás por una sola ocasión debiendo terminar en la ciudad de origen (Lin, 1965). Este problema está considerado como un problema clásico, el cual tiene la facultad de optimizarse en dos casos, el primero

en poder definir cómo se van a estructurar las tareas y el segundo, es el problema de ruteo para poder definir cual es el recorrido óptimo de los vehículos aplicado al ramo de la logística.

El problema del TSP puede ser aplicado al proceso de recolección de residuos ya que se adapta a los problemas del agente viajero en donde se busca recolectar en distintos puntos reduciendo tiempo, distancia y recursos . Lo que se busca es poder determinar la ruta óptima, en la cual el viajero al recorrerla en el orden que se establezca reduzca la distancia (uno de los puntos a destacar de este problema), el tiempo y el costo que genera el traslado (Morán Bermúdez *et al.*, 2015).

Dentro del problema del agente viajero (TSP), se pueden encontrar datos que van a generar diversos valores, creando un número significativo de combinaciones, provocando que el número de soluciones se incremente, debido a estas variables, lo cual resulta complicado poder encontrar una solución acertada en un tiempo que sea favorable (Penna *et al.*, 2014). Como se mencionó en la definición, así como varios investigadores han encontrado soluciones dentro del problema TSP los cuales se enfocan en el tiempo de recorrido, distancia y costo de traslado.

Para representar el problema del Agente Viajero (TSP) este puede ser modelado como un grafo (véase Figura 2.7), el cual va a estar conformado por los puntos de recolección, el recorrido que realiza, punto inicial y punto final. Para comprender un poco más sobre los términos que se utilizan en este modelo. Se definirá lo que es “el tour”, que es el recorrido que realiza el agente viajero buscando minimizar su distancia recorrida. Las aristas, son los posibles caminos que puede seguir el agente viajero para visitar los “nodos”. Los nodos, son los puntos que deberá visitar el agente viajero. El algoritmo al ser aplicado va a simular la combinación de recorridos pasando una sola vez por cada punto, que deba realizar el camión recolector, determinando cual es la mejor ruta, dónde se acorte la distancia, el tiempo que se requiere para la recolección y se disminuyan los recursos que se necesitan por parte de la empresa.

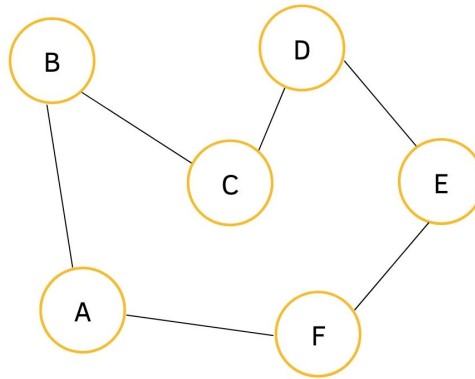


FIGURA 2.7: Representación modelo de Agente Viajero

Fuente: Elaboración Propia

Uno de los problemas que se encuentra al aplicar un TSP, es que, cuando la cantidad de información aumenta empieza a complicarse el proceso debido a que el tiempo se eleva con el tamaño de datos que se van a utilizar. Por ello resulta necesario combinar un método ya establecido con alguna variante que trate de solucionar el conflicto que se tiene al aumentar el número de variables, para ello se debe de tomar los fundamentos del sistema TSP. A lo largo del tiempo varios autores han intentado dar una solución a este problema, sin que se haya encontrado el método adecuado. Para la solución que se presenta dentro del agente viajero (TSP) se han aplicado diferentes métodos de solución entre los cuales destacan los métodos exactos y heurísticos, el crear una lista de soluciones que arroja el problema para poder compararlas y poder determinar cual es el resultado óptimo o los métodos heurísticos de los cuales se obtienen soluciones efectivas reduciendo el tiempo en que es procesada esta información aunque es variable la solución que puede arrojar (Penna *et al.*, 2014).

A continuación se explica cómo diversos autores han aplicado el problema del agente viajero y los resultados que se han obtenido de la aplicación de este método de planeación de ruta, también con ello se demuestran los problemas que se presentan al momento de aplicar este modelo y el porqué se necesita de un método de solución de problemas para poder obtener los resultados óptimos que se desean al aplicar este

modelo.

Miller *et al.* (1960), desarrollan el TSP múltiple o m-TSP, con el objetivo de determinar m-rutas que tendrá que recorrer cada vehículo para que los usuarios sean atendidos, asignando uno por cada visita. Respetando el principio básico del TSP finalizando en el punto de origen. De esta problemática en donde el vehículo asignado tiene cierta capacidad para cubrir la demanda se destaca la importancia de contar con un ruta óptima dando origen al problema del agente viajero (TSP).

Tillman (1969), aplica el TSP probabilístico o PTSP, con el fin de determinar el recorrido con el menor costo utilizando algoritmos de probabilidad para poder encontrar si los servicios van a ser utilizados o no de esa forma se evita realizar un viaje a un punto donde no es necesario visitar.

Albiach *et al.* (2008), propuso un modelo de Agente Viajero en donde fueron consideradas ventanas de tiempo, que se toma en consideración costos de viaje con relación al tiempo, para obtener datos más precisos de problemas de enrutamiento dentro de poblaciones importantes, las cuales entra el factor de tránsito local, por que avenidas resulta viable circular dependiendo de la hora del día. En comparación con las demás investigaciones y tratar de resolver este problema considerando dichas variables, se tuvo que transformar los elementos del TSP ocupando así el problema de enrutamiento general mixto. En el caso de aplicación se obtuvo que en cuestiones que involucren el tiempo en relación a la distancia resultan complejos de resolver debido a la variante planteada, sin embargo con la aplicación de procedimientos heurísticos y exactos se ha demostrado que se pueden aplicar para obtener buen desempeño en los resultados en un tiempo considerable para aplicarlo.

Yang *et al.* (2020) Se demostró que el algoritmo de seno coseno (SCA) es superior a algunos algoritmos de optimización tradicionales existentes debido a su principio de optimización único. Sin embargo, todavía existen desventajas, como la baja precisión de la solución y la pobre capacidad de búsqueda global. Teniendo como objetivo las deficiencias del algoritmo seno coseno, en este artículo se propo-

ne un algoritmo SCA multiestrategia multigrupo (MMSCA). El algoritmo ejecuta varias poblaciones en paralelo y cada población ejecuta una estrategia de optimización diferente. La información se intercambia entre las poblaciones a través de la comunicación intergeneracional. Usando 19 tipos diferentes de funciones de prueba, se prueba el rendimiento de optimización del algoritmo. Los resultados experimentales numéricos muestran que el rendimiento del algoritmo MMSCA es mejor que el del algoritmo SCA original y también tiene algunas ventajas sobre otros algoritmos inteligentes. Por último, se aplica para resolver el problema de enrutamiento de vehículos capacitados (CVRP) en el transporte. El algoritmo puede obtener mejores resultados, y también se prueba la viabilidad y factibilidad del algoritmo. A través de experimentos numéricos sobre la función de prueba, el algoritmo MMSCA tiene una cierta mejora en la precisión y velocidad de convergencia del algoritmo SCA original. Finalmente, este documento aplica con éxito el algoritmo MMSCA para resolver CVRP (Problema de enrutamiento de vehículos capacitados) y obtiene mejores resultados, lo que confirma aún más la viabilidad y efectividad del algoritmo. La próxima dirección de investigación continuará mejorando el algoritmo y aplicándolo a problemas de ingeniería más prácticos.

Basuki *et al.* (2019) Para la actividad de distribución definen que es una parte de la gestión de la cadena de suministro y un componente muy importante. Puede mejorar la empresa de beneficios con una disminución en el coste del transporte. Esta actividad tiene muchos problemas, como la capacidad del vehículo, la diferencia de la demanda del consumidor y la diferencia de ubicación del consumidor. Estos problemas deben manejarse determinando la ruta para minimizar el coste de distribución. La investigación es que la empresa dedicada al servicio de impresión donde se ha impreso el producto se enviará a varios clientes con diferentes ubicaciones. Para determinar la ruta se utilizarán la matriz de ahorro y el método de entropía cruzada. El propósito de ellos es formar una ruta óptima donde el método de matriz de ahorro se procesa manualmente y el método de entropía cruzada por el software Matrix Laboratory. El resultado obtenido mediante el cálculo del método Saving Matrix son

cuatro subrutas y el método Cross Entropy son tres subrutas. La comparación de dos métodos utilizados es el método de entropía cruzada un 5,81 % más eficiente que el método Saving Matrix basado en el coste total de transporte

Mendoza Guamán y Cullay Ashqui (2018), plantea un método de agente viajero para encontrar la ruta más óptima para la recolección de residuos, con el fin de minimizar los costos de operaciones logísticas. El caso de estudio se aplicó en una empresa recicladora GIDSA, en la cual se analizó la situación actual que se tenía de las 5 rutas para la recolección de residuos y al contar con demasiados puntos de recolección no alcanzaban a cubrir toda la ruta trayendo como consecuencia el aumento en los costos logísticos y de transporte. Para tratar de encontrar la solución a este problema se aplicó un método exacto para el problema del agente viajero para encontrar la ruta más óptima y se utilizó un método de solución ACO (algoritmo de colonia de hormigas) dentro del problema del agente viajero. Para tener un resultado más factible y rápido, se utilizó el software MATLAB, el cual al aplicar modelo matemáticos, la velocidad con la que son procesados es menor a comparación de otros, brindando soluciones a los problemas planteados. Los resultados obtenidos al aplicar todas estas herramientas favorecieron el sistema de recolección al reducir las distancias y generar ahorros en el proceso de recolección. Para resolver el problema del agente viajero, se tuvo que desarrollar un algoritmo que tomo elementos de la colonia de hormigas (ACO) mismo que al ser aplicado en el software MATLAB se encontraron rutas más cortas y redujo el tiempo de respuesta.

Margain *et al.* (2017) buscan que minerales metálicos y no metálicos producidos por el Estado de Puebla, por conveniencia, se pueden transportar en contenedores en tren a una carga portuaria exportada a otros países; para transportar minerales por ferrocarril, debe analizar cuál es la ruta más óptima para llevar el producto, teniendo en cuenta los diversos factores involucrados a través de cada ruta con el fin de obtener un mayor beneficio para el transporte de minerales Comparan dos algoritmos metaheurísticos aplicados al problema de enrutamiento de vehículos con restricción de capacidad (CVRP), con el fin de determinar qué algoritmo ofrece mejores solu-



ciones de optimización que le ayuden a hacer la mejor ruta para la transferencia. Como resultado final, la implementación de un algoritmo de optimización ACO tuvo más éxito en el tiempo de ejecución que en el algoritmo genético; porque es lento encontrar una solución óptima entre todas las generaciones.

Faiz *et al.* (2014) El problema de enrutamiento de vehículos condensados (CVRP) es un problema de optimización bien conocido aplicado en numerosas aplicaciones. Consiste en entregar artículos a algunos clientes geográficamente dispersos utilizando un conjunto de vehículos que operan desde un solo depósito. Como se sabe que el CVRP es de los métodos duros y aproximados funcionan bien al generar soluciones subóptimas prometedoras en un tiempo de cálculo razonable. Desarrollan un Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones (DSS) para resolver el CVRP que integra un Sistema de Información Geográfica (SIG) enriquecido por un módulo de búsqueda Tabu (TS). Con el fin de demostrar el rendimiento del DSS propuesto en términos de tiempo de ejecución de la CPU y distancia recorrida minimizada, lo aplicamos en un caso real de gran tamaño. Los resultados se resaltan en formato cartográfico utilizando Google Maps.

Kallehauge (2008), realiza un análisis detallado de solución para los problemas de ruteo de vehículos, aplicando ventanas de tiempo. Se tomó en cuenta el problema del agente viajero utilizando sus principios de dicha solución del TSP que son la formulación del arco, la formulación del arco-nodo, la formulación del árbol de expansión y la formulación del camino. La aplicación de problemas exactos y el uso de elementos fundamentales del TSP en la formulación tuvo un gran éxito, toda vez que de dicha investigación y de la aplicación del algoritmo con dicha optimización para el problema de ruteo con ventana de tiempo, tiene varias aplicaciones que no sólo funciona y se obtienen resultados en problemas con ventana de tiempo, sino que pueden ser aplicados con otro tipo de problemas adecuando el algoritmo a cada caso concreto.

## 2.7 MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

A lo largo del tiempo se han investigado soluciones a diversos métodos que presentan ciertos problemas al momento de su aplicación, debido a que no se obtienen los resultados óptimos que se desean, por lo cual resulta necesario la aplicación de diversos criterios que favorezcan a obtener una solución, que resulte eficiente ante los problemas planteados.

A lo largo del tiempo se han tratado de aplicar diferentes criterios para optimizar los resultados obteniendo así una clasificación general de este tipo de métodos de solución de problemas clasificándose en Métodos exactos, de simulación, heurísticos y metaheurísticos.

A continuación se presenta una Tabla 2.4 mostrando las ventajas y desventajas de cada herramienta para la toma de decisiones.

Método	Aspectos Positivos	Aspectos Negativos
<b>Exacto</b>	Suele dar una solución adecuada al problema. Es muy viable que se encuentre la solución que se busca con este método a comparación de los otros	Lleva demasiado tiempo el proceso de la información y su respuesta
<b>Simulación</b>	Se puede adaptar fácilmente. Se puede experimentar de forma rápida	No suele dar el resultado que se busca. las pruebas que se tienen son aisladas por lo cual no garantiza un buen resultado
<b>Heurístico</b>	Resuelven problemas con muchas variables, Recomendados para el diseño de micro-rutas. Resulta precisa a un tiempo considerable no resulta complicado de aplicar y es flexible.	No da la certeza de obtener la ruta óptima. Debe ser comparado para poder tener certeza de su efectividad.
<b>Metaheurístico</b>	Abordan temas complejos. Es rápido y de fácil proceso.	Durante la aplicación de este método no se puede conocer una aproximación del resultado de solución. No garantiza la solución óptima. Resultan complejos.

TABLA 2.4: Métodos de Solución de Problemas

Fuente: Elaboración propia

### 2.7.1 MÉTODOS EXACTOS

Este tipo de método su particularidad es el poder obtener una solución adecuada a los problemas que se presentan respecto a cuestiones de localización ya sea aplicando la logística inversa o de localización dinámica. La ventaja de este tipo de modelo es que en su aplicación suele proporcionar la solución óptima, lamentablemente para poder obtener el resultado óptimo su principal desventaja es que para poder ejecutarlo requiere mucho tiempo para poder procesar toda la información, teniendo como resultado que no sea viable en problemas de mediano o gran tamaño. Como consecuencia de lo anterior, ha sido necesario desarrollar variantes que solucionen los problemas que se encuentran al aplicar este tipo de herramienta. El método de búsqueda exhaustiva y el de ramificación y acotamiento en su aplicación han logrado mejorar el tiempo en que se procesa la información por lo que se citan a continuación (Morán Bermúdez *et al.*, 2015).

#### 2.7.1.1 BÚSQUEDA EXHAUSTIVA

Algo que caracteriza a los métodos exactos es la flexibilidad que tiene para poder ser aplicados a problemas con variables muy extensas con resultados óptimos, aunque el tiempo de resolución suele ser muy extenso (Nievergelt, 2000), indica que este método continúa la misma base de un método exacto, con la salvedad que resulta muy efectivo en problemas pequeños. Para que sea efectivo en problemas de mayor magnitud de variables, se debe tener claro el método para poder generar los resultados al problema planteado y el continuar realizando la búsqueda, porque de lo contrario el poder procesar las múltiples variables con esta metodología, llevaría mucho tiempo de procesamiento resultando inviable poderlo aplicar. De igual forma al momento de resolver los problemas que se le plantea, al ser demasiados los resultados arrojados no se tiene la certeza de cual sea el idóneo para su resolución.

Este método logra encontrar una fórmula para que pueda ser aplicado en pro-

blemas de menor magnitud y si bien puede ser aplicado aún en problemas con mayor número de variables el resultado que se pueda obtener de éste no siempre resultará el óptimo, es por ello que el siguiente método ha cobrado mayor relevancia.

### 2.7.1.2 RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO

Demeulemeester y Herroelen (1992), desarrolla el algoritmo de ramificación y acotamiento o también conocido como Branch and Bound, el cual se ha demostrado que es efectivo para obtener resultados óptimos. Su principal característica es el tiempo de solución que le lleva poder procesar la información, para obtener el resultado que se busca utilizando un gran número de variables. Su metodología se basa en ir delimitando el espacio de búsqueda, en donde se tenga la certeza que se va a encontrar el resultado óptimo, e ir desechando los espacios donde no se van a obtener resultados positivos, utilizando los recursos de procesamiento en espacios efectivos. Esta delimitación se puede ir aplicando durante el transcurso del proceso para favorecer el tiempo que se lleva el procesar toda la información.

Si bien estos métodos han ido solucionando los problemas de tiempo que se lleva el procesar la información, resultan menos efectivos o se generan nuevos problemas al aplicarlos. De ahí es que el estudio de otro tipo de métodos resulta necesario cuando se tratan de aplicar problemas de mayor magnitud.

### 2.7.2 MÉTODOS DE SIMULACIÓN

Los métodos de simulación se basan en la representación matemática, en donde pueden ser ingresados los datos y ser moldeados mediante el uso de un software. Se encuentra una relación entre la optimización y la simulación, porque en ambos casos el objetivo es determinar cómo se aplica en la toma de decisiones, bajo dicho contexto usualmente se soluciona al optimizar modelos matemáticos. Este método

no se ocupa con mucha frecuencia debido a la falta de resultados y estudio que se tiene del mismo, si bien esta herramienta se adapta a un gran número de problemas que se le plantean, la falta de investigación en el mismo no da la certeza de que el resultado que se obtenga de este método sea la correcta, caso contrario de los métodos heurísticos que han resultado ser los que mayor se adaptan a los problemas que se le plantean y las soluciones que aportan son en un tiempo bastante considerable resultando que las empresas empleen este tipo de métodos heurísticos (Boschetti *et al.*, 2009).

### 2.7.3 MÉTODOS HEURÍSTICOS

Los modelos heurísticos, como se hizo mención en líneas anteriores usualmente son utilizados cuando se trata de resolver problemas de mayor magnitud en un tiempo razonable. Este tipo de modelo es utilizado cuando lo que se busca es eficientar el tiempo de resolución del problema, a comparación de los métodos exactos, que al tratar de resolver problemas que contienen un mayor número de variables o de magnitud se requiere de bastante tiempo para ser procesado y resuelto.

Ortega Mier (2008) explica que el motivo por el cual este tipo de modelo ha tenido bastante aplicación a la solución de problemas es su versatilidad para brindar soluciones adecuadas en un menor tiempo, a comparación de los modelos exactos. Otra de las principales razones para que este modelo sea aplicado se debe a que no se conoce o se llega a la solución del problema al aplicar un método exacto, por lo que al aplicar este modelo, suele encontrar un número considerable de soluciones que beneficien al momento de tomar una decisión. La flexibilidad para poder ir adecuando el modelo a las variables que se van presentando facilitan que pueda ser resuelto el problema que se plantea y en donde los modelos exactos no pueden encontrar una solución viable.

Para poder comprobar que la solución que encuentra este modelo es la idónea,

se pueden comparar los resultados conocidos como óptimos al aplicar algún otro modelo, y así poder comparar si la propuesta que arroja el modelo heurístico es la mejor solución que se puede obtener en comparación con el resultado óptimo que se tiene de otras investigaciones. Otra forma que se suele realizar en la práctica es comparar el resultado con los modelos exactos, y ver si la solución que se propuso mejora al resultado de dicho modelo, también es muy común que se compare con otros modelos heurísticos para ver si la aplicación de determinado modelo heurístico es el que mejor se adecua al problema. Dentro de este tipo de método existen variables que han sido utilizadas para la resolución de problemas, destacando entre ellos el método de vecino más cercano y el método de búsqueda local los cuales se explican.

### 2.7.3.1 VECINO MÁS CERCANO

El método heurístico más aplicado para encontrar soluciones al problema del TSP es el del vecino más próximo, el cual consiste en salir de un punto de origen trazando la ruta al punto más cercano siguiente, así hasta visitar todos los puntos que se requieren y finalizar en el punto de origen.

Según Cunquero (2003) propone que para poder identificar y analizar el método se deben aplicar los siguientes pasos: a) Definir un punto inicial, b) identificar el punto más cercano al punto visitado, siempre y cuando el punto más próximo no haya sido recorrido, c) repetir el inciso anterior hasta recorrer todos los puntos.

Uno de los problemas al aplicar este método de solución, es la denominada miopía del procedimiento, ya que al determinar los puntos más próximos se deja de observar que en los puntos finales la conexión entre un punto y otro no sea la más corta ocasionando que el resultado sea negativo.

### 2.7.3.2 BÚSQUEDA LOCAL

Voudouris y Tsang (1999), aplicaron el algoritmo de búsqueda local, el cual consiste en poder realizar una división en un sector donde se calcule que se va a encontrar la solución al problema y dividirlos en sectores más pequeños, aplicando una variable binaria que pueda determinar si dicho sector o punto señalado se encuentra activo o no, para que no se realice algún esfuerzo de localización en los puntos que no se encuentran activos. Al ir avanzando el número de puntos que permanezca activo será menor, lo cual beneficia el tiempo en el que se procesa la información al no realizar dicho proceso en puntos, que no tiene sentido aplicar algún esfuerzo al encontrarse inactivos. A lo largo de la aplicación de este método han surgido algunas variantes de este algoritmo conocidas como Hill-Climbing, Simulated Annealing, Threshold Accepting y Late Acceptance Hill-Climbing.

A pesar de que existen variaciones dentro de los métodos heurísticos para poder solucionar los problemas de tiempo de procesamiento de información, y que usualmente brindan resultados bastante fiables es por ello que resulta su aplicación en un gran número de ocasiones, al tratar de problemas de mayor magnitud empieza a complicar la búsqueda de algún resultado fiable, por lo que el uso de métodos metaheurísticos resulta necesario.

### 2.7.4 MÉTODOS METAHEURÍSTICOS

Este tipo de modelo es utilizado usualmente en problemas que requieren de un gran número de variables que resulta complejo. Como se señaló, en algunos casos el método exacto no suele encontrar la solución óptima al problema por lo que al aplicar el modelo metaheurístico, reduce el tiempo en el que procesaría la información un modelo exacto y se adecua al sistema empleado.

Sait (1999) define al modelo metaheurístico como un algoritmo que en combinación con otros modelos heurísticos tradicionales crea estrategias en las variables aplicadas. Dentro de este modelo encontramos técnicas que se han ido desarrollando, en donde las que han arrojado mejores resultados son el método de búsqueda tabú, colonia de hormigas, GRASP, recocido simulado y la búsqueda scatter por mencionar algunos.

Cada modelo tiene sus ventajas de aplicación, también tiene sus desventajas, durante la aplicación de este modelo no se cuenta con información alguna que pueda indicar si el modelo aplicado nos va a arrojar una solución óptima al problema planteado. De igual forma, al no tratarse de un modelo exacto, las soluciones que arroja son aproximadas, tal y como lo podemos observar de los siguientes modelos y cómo basan su metodología para obtener el resultado que se desea.

#### 2.7.4.1 BÚSQUEDA TABÚ

Glover y Laguna (1997), introdujeron la búsqueda Tabú, la cual consiste en realizar una búsqueda histórica para evitar enfrascarse en desarrollar una solución a un problema antes planteado, identificando aplicaciones anteriores y enfocándose en encontrar la solución al problema para reducir el tiempo de procesamiento de información.

#### 2.7.4.2 COLONIA DE HORMIGAS

El algoritmo de colonia de hormigas por sus siglas en inglés (ACO), es un método metaheurístico, el cual consiste en simular el comportamiento que tienen las hormigas al realizar la búsqueda de su alimento, trazando diferentes rutas para llegar a la fuente de alimento regresando a la colonia, dejando una sustancia química llamada feromona, que servirá para que las demás hormigas puedan seguir el rastro,



en donde si la ruta es larga el rastro de la feromona se irá perdiendo, provocando que las hormigas busquen nuevas rutas en donde puedan seguir el rastro más fuerte de esta sustancia.

Drigo (1996) propuso este método para poder localizar el camino más corto, se realizó observando cómo se comportan las hormigas y la forma en que buscaban el camino, para poder llegar a la fuente de donde obtienen su alimento hasta la colonia. A primera instancia las hormigas realizan el recorrido, sin tener un camino fijo que los lleve del punto de comida a la colonia, a su paso van dejando rastro para que este pueda ser detectado por las demás hormigas. Si el camino resulta muy extenso este rastro de feromona va desapareciendo por lo que las demás hormigas dejan de seguir ese rastro al resultar largo el camino, y comienzan a seguir el rastro que detecten por lo que se concluye que el recorrido que esa hormiga realiza es el más corto a comparación de los que desaparece el rastro.

Deneubourg *et al.* (1990) realizaron un estudio analizando el comportamiento de las hormigas de los cuales concluyeron que si bien es cierto que se obtienen diversas rutas al seguir el rastro de la feromona de la hormiga que llega a la fuente de alimento, tienden a seguir el camino más corto, las rutas más largas comienzan a desaparecer junto con el rastro de la feromona y las hormigas al final habrán determinado cual es la ruta más corta para poder llegar al destino que se tienen. Para poder aplicar este algoritmo funciona de forma similar a la feromona que emite la hormiga, la cual es el medio por el cual se comunica la hormiga rastreadora junto con las demás, por lo que si se pierde el rastro en la aplicación del algoritmo resultara que la ruta seguida no es la óptima.

Stützle y Hoos (1996) concluye que de la aplicación del método ACO, beneficia a poder resolver problemas que abarquen un gran número de variables en un menor tiempo, arrojando resultados que favorezcan a obtener soluciones efectivas aplicando este método metaheurístico. Para mejorar el proceso es necesario ir adecuando y delimitando el método, se implementaron tres variantes al modelo de colonia de

hormigas: el Sistema de Hormigas elitista (EAS), Sistema de Hormigas Max-Min (MMAS) y Sistema de Colonia de hormigas (ACS).

El sistema de hormigas max-min (MMAS) tienen la finalidad de que se pueda obtener un resultado correcto en un tiempo menor a comparación del modelo original. Por lo que se determinó que este método, al poder delimitar el rastro de feromona y al permitir que durante el proceso se pueda ir modificando tal límite para poder obtener los resultados que se buscan mejorando de esa forma el proceso.

Dentro del algoritmo de colonia de hormigas, se manejan términos tales como, feromona, hormiga, recorridos y visibilidad los cuales para un mayor entendimiento se explican como van a ser representados al caso de aplicación. El modelo consiste en simular el comportamiento que realizan las hormigas, que serán simulados por los camiones recolectores. En la aplicación del algoritmo, se van a simular los recorridos que hacen los vehículos recolectores, los cuales van a abarcar un punto de recolección a otro hasta llegar al destino que se desea. Para que los demás camiones puedan continuar el recorrido del primer camión y determinar si el resultado está siendo el óptimo, la feromona artificial, será la referencia para los demás camiones recolectores si el rastro del primer camión se conserva o se va perdiendo con el objetivo de ir encontrando la ruta más corta en cada iteración que se intenta. Otro término importante a considerar es la visibilidad que únicamente es un parámetro de funcionalidad del algoritmo, el cual permite determinar si la ruta que se está realizando es la más corta o no.

Cesar Ponce *et al.* (2014), explica los elementos del algoritmo Colonia de Hormigas (ACO) los cuales son: El grafo, que tal y como se mostró en la figura del problema del agente viajero, está conformada por los puntos de recolección, el recorrido que debe realizar y la trayectoria que se realiza. La suma del recorrido se realizará conforme se vaya visitando los puntos de recolección.

Resulta importante tener el conocimiento y particularidades de los métodos antes descritos, ya que han demostrado tener buenos resultados, y si bien cada tipo

de modelo tiene su particularidad y el enfoque que se le da, dependiendo del tiempo y tipo de información que se vaya a procesar, que resulte ser aplicable a determinado problema, es importante definir lo que se busca eficientar en el proceso para que se cree la estrategia a seguir para la resolución del problema y el resultado que se obtenga sea el óptimo.

## 2.8 CASOS DE ESTUDIO

La Tabla 2.5 que a continuación se muestra, se elaboró tomando en cuenta los autores cuyos casos de aplicación tuvieran similitud, aplicando un mecanismo de búsqueda con palabras clave, para poder definir y seleccionar los métodos o herramientas utilizadas. En la tabla se resume los autores que aplicaron diferentes métodos de solución tanto exactos, heurísticos y metaheurísticos, en problemas de ruteo, aplicación de logística inversa, recolección y manejo de residuos. De acuerdo a la revisión de literatura realizada, se puede observar que los métodos exactos como los metaheurísticos son los que obtienen resultados favorables para dar solución a los problemas que plantean, en dónde el objetivo deseado se cumple. Por lo que de tal revisión así como de un análisis realizado, complementa la idea de aplicar un modelo de logística inversa con el uso de herramientas y métodos que favorezcan el poder encontrar una ruta que favorezca la recolección de residuos y se aumente la cantidad.

Los principales problemas que encontraban los autores al aplicar un modelo exacto, es que al incrementar los datos que se debían analizar, el tiempo para procesarlo se incrementaba demasiado para poder encontrar una solución. Por tal motivo buscaban obtener resultados con la aplicación de modelos heurísticos y metaheurísticos, siendo estos últimos los de mayor relevancia para el problema planteado, debido a que no solo los resultados obtenidos fueron favorables, sino que el tiempo para encontrar la solución se redujo significativamente.

De la investigación realizada y las herramientas que fueron aplicadas por los diferentes autores, se puede resumir con la siguiente tabla:

	Autor	Enfoque	MÉTODOS DE SOLUCIÓN		
			Exactos	Heurísticos	Metaheurísticos
1	Flood, 1956	Logística inversa recolección residuos	x		x
2	Dantzig y Ramser, 1959	Problema de ruteo	x		
3	Miller et al., 1960	Programación Interna	x		x
4	Lin, 1965	Problema de ruteo	x		
5	Demeulemeester y Herroelen, 1992	Planeo de ruta	x		
6	Drigo, 1996	Recolección de Residuos			x
7	Glover y Laguna, 1997	Recolección de Residuos			x
8	Vouduris y Tsang, 1999	Planeo de ruta	x		x
9	Chang y Wei, 1999	Manejo de Residuos			
10	Nievergelt, 2000	Planeo de ruta			
11	Toth y Vigo, 2002	Aplicaciones de metodos logística inversa	x	x	x
12	Cunquero, 2003	Logística inversa recolección residuos			x
13	Gautam y Kumar, 2005	Residuos			
14	Kallenhaage, 2008	Problema de ruteo	x	x	x
15	Albiach et al., 2008	Problema de ruteo	x	x	
16	Ortega Mier, 2008	Logística inversa			x
17	Bozejko y Wodecki, 2009	Logística inversa recolección residuos	x	x	x
18	Armon et al., 2010	Problema de ruteo	x	x	
19	Medina et al., 2011	Problema de ruteo	x	x	x
20	Penna et al, 2014	Logística Inversa	x		x
21	Morán Bermúdez et al., 2015	Logística inversa recolección residuos	x	x	x
22	Hernandez y Pérez, 2016	Distribución de productos			
23	Goel y Maini, 2017	Problema de ruteo	x	x	x
24	Edrees et al., 2017	Logística Urbana			
25	Endara Aguilar, 2017	Logística inversa recolección residuos			
26	Mendoza Guamán y Cullay Ashqui, 2018	Logística inversa recolección de residuos	x		x
27	Gutierrez Mite et al., 2019	Problema de ruteo	x		
TOTAL			17	8	15

TABLA 2.5: Tabla de antecedentes

Fuente: Elaboración propia

El motivo por el cual se presenta la tabla anterior es para poder apreciar que métodos serían factibles de considerar para que pueda ser aplicado al problema que

se plantea, en dónde el objetivo sea utilizar un modelo para aumentar la recolección de residuos, con el uso de herramientas y métodos que ayuden a encontrar una ruta que favorezca la recolección de residuos.

De la Tabla 2.5 cabe destacar el proyecto desarrollado por Mendoza Guamán y Cullay Ashqui (2018), que plantean un método de agente viajero para encontrar la ruta más óptima para la recolección de residuos, con el fin de minimizar los costos de operaciones logísticas. El caso de estudio se aplicó en una empresa recicladora GIDSA, en la cual se analizó la situación actual que se tenía de las 5 rutas para la recolección de residuos y al contar con demasiados puntos de recolección no alcanzaban a cubrir toda la ruta trayendo como consecuencia el aumento en los costos logísticos y de transporte. Para tratar de obtener la solución a este problema se aplicó un método exacto para el problema del agente viajero para encontrar la ruta más óptima junto con su variante ATSP ya que se adaptan al problema que plantean. Sin embargo se presentaron dificultades para obtener el resultado que se desea al aplicar los modelos, debido a la magnitud de los datos, ocasionando que el tiempo sea un factor negativo para encontrar una solución. Por tal razón para poder lograr una solución que no llevara tanto tiempo de procesar se utilizó un modelo metaheurístico basado en el algoritmo de colonia de hormigas.

Al realizar un cuadro comparativo los autores determinaron que el método de solución ACO (algoritmo de colonia de hormigas) era la opción viable para aplicarse, debido a la capacidad que tiene para resolver problemas con alto nivel de complejidad. Los resultados que se obtuvieron al aplicar todas estas herramientas favorecieron el encontrar rutas que mejoraron el trayecto generando ahorros en el proceso de recolección de residuos. A pesar de que se encontraron rutas que redujeron la distancia que tenía la empresa recolectora, el porcentaje de mejora fue de un 1 % a un 3 %. Esto se debe a que la base de su modelo fue sobre la variante de ATSP y no sobre el ACO, lo cuál se hubiera reflejado en obtener resultados más favorables. El modelo que proponen tiene áreas donde se puede mejorar así como el poder involucrar datos tales como, la capacidad que tienen las empresas para resguardar el

material recolectado, la frecuencia con la cual se deben realizar los viajes dependiendo de el uso de estos materiales y la capacidad de recolección de los vehículos que determinen cuantos viajes se deben realizar para cubrir los puntos que se requieren, acortando no sólo distancias sino costos al proceso.

Cruz-Rivera y Ertel (2009), aplicó un caso de estudio en México, desarrollando un modelo logística inversa con la finalidad de maximizar la recolección de los vehículos al final de su ciclo de vida.

El modelo fue desarrollado por medio de un algoritmo de problema de localización, utilizando el software STATION. Se consideraron 3 puntos importantes para desarrollar el modelo, que es el número de puntos de recolección, el costo operativo de recolección y la capacidad para poder almacenar los vehículos en cada centro de recolección. Al implementar el modelo se encontraron con dificultades para su desarrollo, debido a que el tiempo que llevaría procesar toda la información sería extenso, para poder obtener un resultado viable. Para encontrar una solución plantean tres posibles escenarios, para poder conocer el número de instalaciones que se van a utilizar así como la ubicación de las mismas, para poder recolectar los residuos, cuya variación va entre un 100, 90 y 75 por ciento del total de vehículos que serán requeridos, para obtener un beneficio económico e implementar un método de solución que beneficie la recolección. De los resultados obtenidos, se concluye que a pesar de haber obtenido un análisis del costo de transporte como factor determinante para poder implementar el modelo, es necesario diseñar un modelo con herramientas cuantitativas, con base en la logística inversa para poder encontrar una solución al problema de recolección que se tiene dentro del país. Con la implementación de los modelos cuantitativos se podrá lograr establecer y adecuar el modelo a las diferentes regiones del país, atendiendo las necesidades de cada empresa.

Bożejko y Wodecki (2009) presenta un algoritmo de TSP con la finalidad de poder analizar e investigar la ruta óptima con tiempos de viaje, procesamiento y fechas de vencimiento. Para que de este algoritmo se pueda obtener resultados via-

bles, proponen el uso de una herramienta metaheurística debido a que se trata de un problema NP-hard. Para la aplicación del modelo propuesto, en donde el algoritmo por sus siglas en inglés (PBM) Population-based metaheuristics, fué simulado en Microsoft visual. Para verificar que el modelo propuesto fuera efectivo y arrojara resultados aceptables, en un promedio de mejora de 48 % en tiempo, los resultados de las pruebas fueron analizadas con la biblioteca TSP-Library (TSPLIB) utilizando los mejores resultados comparados con los que se obtuvieron, en donde fue posible encontrar soluciones adecuadas en donde el tiempo de cálculo fue mucho menor. El comparar los resultados con el benchmark fue clave para comparar el porcentaje de mejora en el proceso de recolección a comparación del uso de métodos exactos. De lo cual se concluye que la aplicación de un TSP con fechas de vencimiento, y el uso de una herramienta metaheurística, se puede resolver de forma óptima con la aplicación de estos métodos de solución en un tiempo razonable.

Armon *et al.* (2010), desarrolla la variante de un modelo de agente viajero, con el objetivo de minimizar la distancia recorrida por todos los usuarios, minimizar la distancia máxima que un usuario debe recorrer y reducir el tiempo de entrega. Para lograr obtener los resultados que desean, se consideraron combinaciones al modelo de un TSP clásico para poder resolver los casos de aplicación, en dónde con algunas situaciones se podrían obtener resultados correctos en un tiempo considerable y en los casos dónde resultara complejo aplicar este modelo al tratarse de un problema NP-Hard, se aplicarían aproximaciones con la salvedad que los resultados que se obtuvieran no fueran correctos. Para realizar la simulación aplicaron un PTAS que tiene su aplicación en cualquier espacio euclidiano de dimensión fija, por lo que la proporción de aproximación se asemeja al resultado óptimo. Sin embargo, a pesar de obtener diversos resultados, se concluyó que el aplicar estos métodos de simulación no favorece el alcanzar el objetivo que se desea en la recolección de residuos. Lo cual deja la ventana a nuevas investigaciones en donde pueda ser mejorada la aplicación de los algoritmos para obtener resultados en su mayoría óptimos.

Fermani *et al.* (2020), propone el uso de herramientas computacionales para me-

jorar la eficiencia del sistema y disminuir los costos asociados, para lograrlo utilizaron una herramienta metaheurística, el algoritmo de recocido simulado, para poder diseñar la ruta de los vehículos de recolección de residuos. Al tratarse de un problema de ruteo de vehículo (VRP) fue necesaria la aplicación del algoritmo de recocido simulado, para resolver este problema complejo NP-Hard. El caso de estudio fue aplicado en escenarios reales de logística de recolección de residuos sólidos urbanos de Bahía Blanca. Para comprobar la efectividad del modelo se comparó con otros métodos como el de LNS por sus siglas en inglés Large Neighborhood Search y un algoritmo genético, así como el uso de Benchmarks para comparar los resultados obtenidos. De la investigación realizada se obtuvo que la aplicación del algoritmo de recocido simulado así como de la metaheurística LNS, que fueron superior en la obtención de resultados comparado con el algoritmo estándar y modelo exacto, por lo que se concluye que la aplicación de este tipo de algoritmos redundan la obtención de resultados que favorezcan la solución al problema que se les plantea de recolección de RSU. Para poder mejorar este modelo se propone continuar con problemas de mayor complejidad que prueben si son efectivos este tipo de algoritmos.

De los artículos anteriores se concluye que la aplicación de un modelo basado en la logística inversa requiere el apoyo de herramientas metaheurísticas para que el resultado que se desea obtener, es el recolectar residuos al final de su ciclo de vida, de modo que se pueda incrementar la cantidad recolectada. De igual forma se aprecian las áreas de mejora a los modelos que plantean los distintos autores, con la finalidad que la mayoría de casos de aplicación el resultado que se obtenga sea favorable para las empresas recicladoras. Por lo que resulta viable valorar continuar con esta línea de investigación. para poder aplicar un modelo que se adapte al problema planteado.

## 2.9 CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se presentó el problema que existe actualmente sobre el manejo de residuos, a pesar de contar con normas que impulsan tanto a las empresas,



como a la sociedad en general, de poder crear una conciencia social al problema que se presenta en el país, no se ha tenido el impacto que se desea o las proyecciones a tales iniciativas. Se hizo mención de la falta de infraestructura que se tiene en el país, para que los residuos recolectados puedan ser separados, analizados y reutilizados para darles un segundo uso a los mismos. De manera conjunta con la falta de infraestructura que se tiene en el país, el proceso de recolección de residuos resulta costoso, y si a esto se le añade que no se tiene la estrategia óptima para que en el proceso de recolección sean destinados los residuos a las plantas tratadoras, provoca que estos no puedan ser aprovechados y terminen en rellenos sanitarios.

Con la aplicación de un modelo basado en la logística inversa, se va a obtener un mayor acopio, mejorando el proceso de recolección, al obtener una ruta que sea mas corta, mejorando el tiempo, costo y la cantidad de residuo recolectada, para poder darle a los productos un segundo uso, o sean reciclados para la creación de materia prima sea realizado y beneficie a las empresas en un mejor proceso dentro de su producción, económico y ambiental como ventaja competitiva. De igual forma se presentaron los modelos de ubicación y localización clásicos, los cuales sirven como herramientas para la investigación y determinación de establecimientos, buscando la menor distancia entre ellos y atendiendo o anticipando las necesidades que se pueden presentar de dichos usuarios. Por lo que sí tenemos que el problema de recolección de residuos es costosa, y el destino que tiene el acopio de dichos residuos no es la adecuada, con la aplicación de un método de solución exacto y metaheurístico tomando como base el proceso de logística inversa, se utilizará una herramienta que beneficie al problema planteado, reduciendo así el impacto ambiental, en donde se vea un ahorro en este proceso y sea creada materia prima de dichos residuos para beneficio de las empresas recicladoras.

En los siguientes capítulos se desarrollará el diseño e implementación de técnicas de solución aplicando el modelo formulado, así como la validación del mismo y el análisis de los resultados obtenidos.

## CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍA

---

En este capítulo se desarrolla la descripción metodológica aplicada al desarrollo de la presente investigación. Dividiendo el capítulo en etapas sobre las cuales se va a explicar la estructura del modelo que se plantea, explicando los elementos que se consideran para poder implementarlo.

### 3.1 ENFOQUE METODOLÓGICO

Es importante encontrar una solución al problema planteado, debido a que mayoría de las empresa recicladoras no cuentan con un proceso de recolección para el retorno de sus productos, y al aplicar un modelo no resulta efectivo, para recolectar la cantidad que se desea de los residuos lo cual genera que el costo de operación no sea favorable para las empresas. Por tal motivo, en la presente investigación se determinó aplicar un enfoque metodológico de carácter mixto, debido a que considera el uso de técnicas de investigación tanto cualitativas como cuantitativas poder realizar un correcto desarrollo del modelo, y poder determinar las herramientas que son necesarias para su implementación, se debe realizar una investigación rigurosa del uso de diferentes enfoques metodológicos y diseños de investigación relacionados con el problema que se plantea. De igual forma es necesario contar con la información que pueda medir el rendimiento y desempeño del modelo propuesto, para poder evaluar

y asegurar la efectividad del proceso.

## 3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El aumento acelerado que se tiene de los RSU y la falta de un modelo que favorezca su recuperación ha provocado un impacto negativo en el medio ambiente, que ha obligado a las empresas a tomar medidas para retornar sus productos y darles un segundo uso o aprovechamiento. Esta investigación surge de la necesidad de establecer una red de recolección que sea favorable para las empresas recicladoras, con el fin de mejorar el proceso de recolección de residuos. El proceso de recolección conlleva realizar una inversión importante para poderse implementar, por lo que la reducción de costos en el proceso resulta indispensable para que las pequeñas y medianas empresas puedan aplicarlo y beneficie el proceso de recolección. De igual forma al tratarse de pequeñas y medianas empresas, el tamaño del problema resulta importante analizar debido a que de ahí se determina la importancia de que tipo de método de solución de problemas debe ser aplicado. .

La aplicación de la logística inversa crea oportunidades a las empresas para poder aumentar los beneficios que se obtienen al recolectar sus productos, dentro de sus ventajas se encuentra la reducción de costos al volver a utilizar o fabricar materiales nuevos con los productos recolectados, la reducción del consumo de recursos, el cuidado al medio ambiente por mencionar algunas. A pesar de ser un sistema que crea múltiples beneficios, de la investigación realizada, se determinó que en la mayoría de aplicaciones de este proceso, suelen fallar las empresas provocando que incrementen sus costos. Por tal motivo es en la etapa de recolección de residuos del proceso de logística inversa, donde se va a optimizar. Para comprender el enfoque del proceso y el área de oportunidad de mejora se presentan las etapas de la logística inversa.

Del problema planteado, se requiere la implementación de un modelo enfocado

en la etapa del proceso de recolección de la logística inversa de residuos, su principal objetivo es el recolectar, reciclar y tratar los productos o desechos que se generan por el consumo de la sociedad, con la finalidad de aprovechar los elementos que componen el producto, para poder darles un nuevo valor, poniéndolos de nuevo al mercado o con la creación de materias primas. Para que el método resulte efectivo y la planeación de rutas sea la indicada, la capacidad del vehículo o vehículos utilizados en el proceso se debe considerar para que se pueda determinar cuántas rutas son necesarias y cuantos viajes deben ser realizados así como su frecuencia.

### 3.3 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

En el presente capítulo se va a desarrollar la estructura metodológica, con el fin de explicar las herramientas que serán utilizadas para lograr el objetivo que se plantea y poder analizar, comparar y estructurar los resultados, con la finalidad de obtener una solución al problema que se plantea. De modo que las empresas puedan implementar el modelo planteado basado en la logística inversa en su proceso de recolección, que sea viable y puedan recolectar sus productos al final de su ciclo de vida para ser aprovechados creando nuevos productos o reutilizando sus componentes.

En la Figura 3.1 se ilustra de manera gráfica el desarrollo de la metodología.

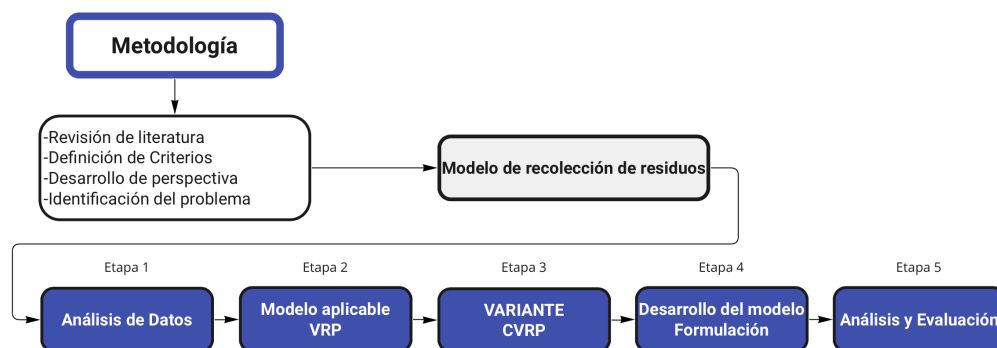


FIGURA 3.1: Diagrama de proceso de metodología

Fuente: Elaboración propia

Una vez definidos los criterios y elementos que se consideraron en la investigación realizada, la revisión de literatura, identificación del problema y después de haber desarrollado la perspectiva teórica de los métodos y herramientas que han aplicado diversos autores, para tratar de dar una solución al problema de ruteo que tienen las empresas para recolectar los residuos, se desarrollan las etapas de la metodología planteada, mismas que serán divididas en 5 etapas para que se comprenda de forma correcta el método planteado y de esa forma puedan ser aplicables y adaptadas a cada empresa.

### 3.3.1 ETAPA 1: ANÁLISIS DE DATOS

De acuerdo a la revisión de literatura realizada, se determinó que un método mixto es el que tiene un enfoque más completo para poder integrar las herramientas y técnicas de investigación adecuadas para evaluar y abarcar los datos necesarios para desarrollar de forma correcta la metodología. El método mixto utiliza la perspectiva cuantitativa y cualitativa en un mismo estudio, con el objetivo de darle profundidad al análisis de la investigación. Para poder realizar una evaluación al problema que se plantea, se recolectará información de investigaciones realizadas al problema de recolección de residuos, con el apoyo de artículos, revistas, informes, libros, casos de estudio, los métodos y herramientas aplicadas, así como el enfoque al sector de la población que se considera al aplicar este tipo de modelos. Por lo que del método mixto un enfoque cualitativo resulta aplicable para poder realizar un análisis, en donde se obtenga el conocimiento de los principales elementos que forman parte del problema.

De la revisión de literatura se analizó los aspectos más importantes que los autores consideraron para determinar los parámetros, variables, restricciones, que fueron utilizados y aplicados para problemas similares en donde el resultado obtenido fue el óptimo por lo que para diseñar el modelo planteado en esta investigación consideró la información investigada para poder aplicar. Para poder realizar una

correcta planificación en el proceso de recolección, como primer punto se debe considerar la capacidad de los vehículos, debido a que es uno de los elementos principales para poder determinar cuántos puntos de recolección puede recorrer dependiendo de su capacidad y que tanto puede abarcar antes de regresar al punto de origen. Otro punto importante a tomar en cuenta es la frecuencia y horario de recolección, es importante considerar de igual forma debido a que es donde representa el mayor impacto en la minimización de costos. La frecuencia de recolección debe de considerar en su planeación la capacidad que tiene la empresa de almacenar el residuo y la disposición final que tiene esta, con la finalidad de no exceder la capacidad y se realice un gasto innecesario en la recolección. Las fuentes de producción de residuos, que tendrá incidencia en la decisión de qué puntos de recolección serán seleccionados. Se demostró que las escuelas en nivel primaria y secundaria han mostrado gran interés en el cuidado por el medio ambiente, así como para recolectar residuos. Por lo que se determinó que los puntos de recolección serán las escuelas a nivel primaria y secundaria para incrementar la cantidad de residuos recolectados.

Para que la ruta pueda ser planeada de forma correcta tanto en su diseño, planeación así como el control de la misma se debe considerar lo siguiente:

Una vez definidos los aspectos para la planificación, será recolectada la información necesaria de la empresa, esto con la finalidad de determinar con datos reales como se requiere que sea elaborada la ruta, para que al momento de aplicar el modelo se pueda analizar con una comparación de resultados se pueda observar si se mejoró o no la ruta de recolección y la cantidad de residuo aumentó de forma considerable.

El enfoque cuantitativo del método mixto se utilizará al momento de probar las teorías e hipótesis para realizar la medición correcta del rendimiento y desempeño de los resultados que se obtengan para poder realizar un análisis correcto y verificar si la metodología propuesta funciona.

Una vez hecho el análisis de datos, en la siguiente etapa se explica el modelo que resulta aplicable al problema de recolección de residuos, el motivo por el cual

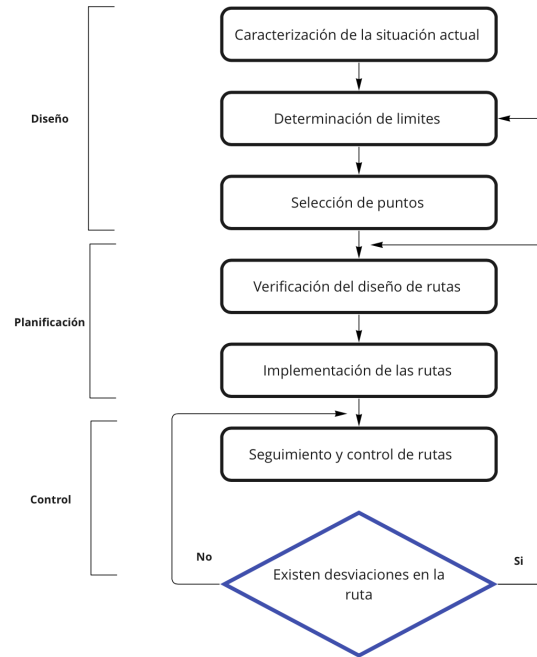


FIGURA 3.2: Diagrama de proceso de metodología

Fuente: Elaboración propia

fue seleccionado y lo que se espera obtener de su aplicación.

### 3.3.2 ETAPA 2: MODELO APLICABLE AL PROBLEMA

Para cumplir con el objetivo de aumentar el acopio de residuos, y al momento de planear la ruta de recolección sea considerado la capacidad del vehículo, es necesario aplicar un modelo que pueda establecer una ruta que abarque todos los puntos de recolección que se establecen y así se pueda incrementar la cantidad recolectada. Debido a la complejidad que se tiene para poder garantizar una solución, que sea favorable al problema de ruteo, el modelo que se adecua para encontrar la ruta que beneficie el proceso de recolección de residuos, tomando en consideración la capacidad del vehículo es el Problema del VRP. A continuación se explica el desarrollo de los modelos y los principales elementos de cada uno.

### 3.3.2.1 PROBLEMAS DE RUTEO DE VEHÍCULOS (VRP)

El problema del VRP es uno de los más utilizados en problemas de ruteo, lo que se plantea es poder encontrar la solución óptima tomando en consideración las restricciones que se presentan en el problema como número de vehículos, la capacidad que tienen, los puntos de recolección, costos, distancia máxima de recorrido entre otras. Este tipo de formulación conlleva un número amplio de variables y diversos parámetros (Correa Trujillo y Jaramillo Medina, 2019). El VRP ha tenido gran impacto para la logística urbana, debido a sus variantes y actualizaciones que ha tenido, por lo que al momento de estructurar se han ido identificando las restricciones aplicables al modelo y con ello se han ido aplicando variantes al VRP.

El modelo se distingue por los elementos del problema, es decir, se conforma por una red de  $(n)$  nodos tomando en cuenta a la empresa como depósito, los puntos que se deben visitar para cumplir con la demanda que se desea, de un punto a otro, utilizando  $K$  cantidad de vehículos, asociándolo a un costo  $c$  que será generado por el recorrido de la ruta  $(i, j)$ , con el objetivo de aumentar la recolección, minimizando la distancia de la ruta recorrida.

### 3.3.2.2 ETAPA 3: VARIANTE

De la revisión de literatura se encontraron diversas variantes para cada tipo de problema de VRP, según Mena Méndez (2019) dependiendo del problema que se requiera dar solución se debe aplicar un tipo de ruta en específico, empleando y verificando las diferentes restricciones que se tienen. Por tal motivo y el objetivo que se tiene en el presente problema la variante del problema de ruteo que tiene aplicación es la de restricción de capacidad o lo que se conoce como CVRP (Capacitated Vehicle Routing Problem o Problema de ruteo de vehículos restringidos por capacidad).

Para que el modelo propuesto pueda ser desarrollado y adaptado a cada pro-



blema que se plantea, es importante identificar los parámetros del modelo que se propone. Los elementos básicos que conforman el problema del VRP son el grafo, debido a que tiene la función de identificar los puntos de recolección que se deberán visitar, el número de grafos tendrá variación dependiendo de las necesidades de cada empresa, es decir que si una empresa tiene contemplado determinado número de puntos de recolección el modelo se puede adaptar al ingresar los datos para que determine el total de grafos con los que deba realizar la simulación. Como propuesta de mejora, con la finalidad de reducir los puntos de recolección y se mejore el desarrollo del modelo, se deberán determinar los puntos de recolección estratégicos para la empresa para que puedan ser establecidos en el algoritmo.

Para ello, se propone un modelo de punto central de zona, donde su principal característica es el establecer puntos estratégicos de recolección cercanos en torno al centro de recolección o empresa para que puedan ser considerados, mismos que pueden delimitarse en un radio de distancia máximo y mínimo entre cada punto y cercanía con la empresa, para acortar la cantidad de los mismos. Al delimitar los puntos no sólo reducen la cantidad de puntos de recolección sino que puede favorecer el acopio de los residuos. Para que este método funcione se debe considerar la participación que tiene la sociedad, ya que tiene un impacto directo para que resulte efectivo, por lo que el considerar un sector poblacional que tenga un mayor índice de conciencia medioambiental resulta indispensable para crear la estrategia en torno a determinado sector de la población.

Otro de los parámetros importantes a tener en cuenta es la cantidad de camiones con los que se planea realizar el recorrido y su capacidad no hay un máximo o mínimo de camiones a utilizar esto dependerá de la empresa donde se vaya a aplicar, este dato resulta importante en la implementación del algoritmo, debido a que ese dato se aplica dentro del algoritmo para ver con cuántos agentes artificiales será probado el algoritmo, que serán las hormigas que realizarán los recorridos encontrando la ruta más corta ya que guarda la información de los recorridos que realizan, de igual forma el algoritmo está diseñado para que pueda ser adaptado a cada situación

y al realizar su proceso de simulación funcione tanto con 1 agente artificial, así como con varios.

### 3.3.3 ETAPA 4:DESARROLLO DEL MODELO

Para el desarrollo de este modelo, se identificaron cinco puntos principales:

1. Con la implementación del algoritmo, se logrará calcular las distancias recorridas entre cada uno de los puntos de recolección y del centro de acopio o empresa recolectora.
2. La función que tiene el algoritmo es desarrollar el resultado de una forma más rápida, el algoritmo realizará el recorrido considerando la capacidad del vehículo, dependiendo del número total de vehículos disponibles se irá trazando la o las rutas con la finalidad de aumentar el acopio y reducir el costo de recolección al obtener la ruta más corta.
3. Se deberá determinar el número total de puntos a visitar, así como los vehículos con los que cuenta disponibles la empresa para aplicar el proceso de recolección.
4. Una de las limitaciones al aplicar el algoritmo, es la capacidad del vehículo por lo que al realizar el trazado se considerará si se han cubierto todos los puntos a cubrir o si se debe utilizar un vehículo más.
5. La demanda de cada punto es importante determinar para calcular y elaborar la ruta, toda vez que dependiendo de la capacidad del vehículo podrá abarcar n cantidad de puntos de recolección

Para una mayor representación de cómo funciona el algoritmo, se presenta en el siguiente diagrama 3.3:

Para que el algoritmo funcione de la forma antes establecida se aplicó la fórmula del CVRP está conformada de la siguiente manera.

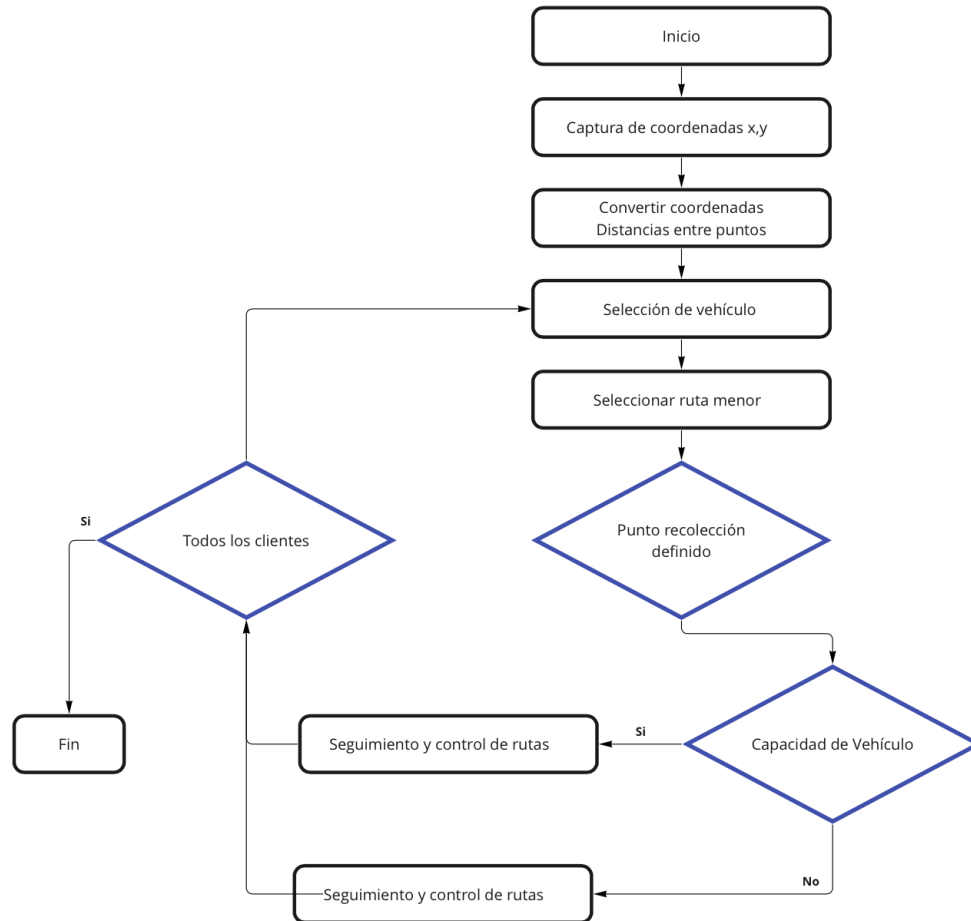


FIGURA 3.3: Diagrama de proceso de metodología

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3.1 FORMULACIÓN DEL MODELO

Para poder dar solución al problema se requiere de la formulación del modelo que se plantea. En la revisión de literatura se muestran un número variable de formulaciones para el CVRP, que podemos distinguirlas en tres grupos, la primera, en variables binarias que son asociadas con cada enlace del (G) grafo para poder determinar si cada vehículo se encuentra dentro de la solución óptima o no, las variables que son asociadas con los arcos y que representan el flujo de residuo dentro de los caminos recorridos. Para comprender la formulación básica del CVRP, se emplean variables binarias subindicadas, es decir,  $x_{ij}$  toma el valor 1 si en el enlace

$(i, j)$  es atravesado por un vehículo en la solución óptima, o en su defecto toma el valor de 0 si no es la solución óptima. El número de variables es del  $O(n^2)$ , si se trata de un problema de ruteo que deba atender  $n$  puntos de recolección.

1.  $G=(V,X)$  un grafo mostrando la ubicación y ruta del punto de recolección
2.  $V=0,1, \dots, n$  es el conjunto de nodos. El nodo que representa la empresa es 0 y los nodos que representan los puntos de recolección van del 1 a  $n$
3.  $X$  es el conjunto de vértices que conectan con cada nodo  $x_{ij} = (i,j)$  Parámetros
4.  $K=1,2, \dots, -K-$ : Vehículos
5.  $i$ = inicio
6.  $j$ =punto de destino
7.  $q$ = demanda de cada punto  $i$
8.  $Q$ = Máxima capacidad del vehículo (Todos los vehículos tienen la misma capacidad  $Q$ )
9.  $C_{ij}$ : Costo entre cada punto  $i$  y  $j$  (distancia entre  $i$  y  $j$ )

Definición de decisión de variables

Si un vehículo  $k$  ha visitado o no la ruta  $e_{ij}$   $X_{Kij} = 1$  tomo el punto / 0 no se tomo el punto

La función objetivo es minimizar la suma de costos asociado al proceso de recolección, al trazar la ruta más corta de todos los vehículos utilizados para que el resultado deseado pueda ser obtenido es necesario aplicar unas condicionales a la fórmula tales como:

- Sólo un vehículo puede visitar cada punto de recolección

- Regresar al punto de origen
- La capacidad del vehículo  $K$  no puede ser excedida

El CVRP para ser formulado como un problema de programación lineal entera (IP) se representa de la siguiente manera:

(1)

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in X} C_{ik} \chi_{ij}^k$$

(2)

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V, i \neq j} \chi_{ij}^k = 1 \quad \forall j \in V \setminus \{0\}$$

(3)

$$\sum_{j \in V \setminus \{0\}} \chi_{0j}^k = 1 \quad \forall k \in K$$

(4)

$$\sum_{i \in V, i \neq j} \chi_{ij}^k - \sum_{i \in V} \chi_{ij}^k = 0 \quad \forall j \in V, \forall k \in K$$

(5)

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V \setminus \{0\}, i \neq j} q_j \chi_{ij}^k \leq Q \quad \forall k \in K$$

(6)

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in S, i \neq j} \chi_{ij}^k \leq |S| - 1 \quad S \subseteq V \setminus \{0\}$$

(7)

$$\chi_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in E$$

### 3.3.3.2 PARÁMETROS

La función objetivo, es minimizar el costo del viaje de todos los vehículos, tomando en cuenta los valores entre 0 y 1. La restricción 2 cada vehículo visita todos los nodos. La restricción 3 es para cada uno de los vehículos debe salir una sola vez del depósito. La restricción 4 todos los vehículos salen del depósito deben regresar al punto de origen. La restricción 6 los vehículos no deben exceder su capacidad máxima. La última restricción sirve para eliminar la presencia de los subtour no deseados que pueden aparecer.

### 3.3.3.3 VARIABLE DE DECISIÓN

- Restricción de variables; esta variable toma el valor de 1, si el arco (i,j) E A es utilizado por el vehículo K, de lo contrario toma el valor de 0.

Las variables se adaptaron de acuerdo al modelo y al problema planteado, sirviendo como apoyo a la revisión de literatura realizada en donde se observó las restricciones y los resultados aplicados a casos similares en donde su funcionamiento favoreció a encontrar el resultado que se buscaba dándole solución al problema de ruteo planteado.

### 3.3.4 CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio fue aplicado en una empresa recicladora de plástico y desperdicios industriales ISIPLAST, S.A de C.V, es una empresa mexicana originaria en el Estado de México, brinda servicios de recolección, transporte y disposición de residuos de manejo especial. Actualmente la empresa recolecta residuos de diferentes industrias y les da un tratamiento a los desperdicios dentro de sus instalaciones, enfocándose principalmente en el acopio de PET, la cual es procesada y como resultado se obtiene materia prima para la fabricación de diversos productos sustentables.

Actualmente la empresa participa en campañas dentro de las instituciones educativas, para fomentar el reciclaje. ISIPLAST, cuenta con un programa para la recolección, involucrando a instituciones educativas sin embargo, el principal problema que se enfrenta la empresa es que no cuenta con una ruta logística para el acopio de los residuos que determine los puntos que puede visitar considerando la capacidad de sus camiones, en dónde ahorren recursos de la empresa y se disminuya el costo del proceso de recolección y se logre aumentar la cantidad recolectada al abarcar todas las instituciones consideradas para la presente campaña. Por lo que en el caso de estudio lo que se busca es definir la ruta logística para el acopio de materiales reciclables con distintas escuelas. La ruta deberá ser la más óptima y corta en distancias para el traslado de los residuos al centro de distribución y se pueda minimizar el costo del proceso de recolección.

Para dicho proceso la empresa cuenta con 22 camiones destinados para la recolección de residuos y cuenta con una capacidad de almacenamiento de 10 toneladas. El tiempo de proceso de recolección destinados es de tres horas, no pudiendo excederse de este tiempo. Actualmente la empresa tiene destinados 30 puntos de recolección donde la distancia acumulada recorrida es de 226 km en donde son recolectados 31 toneladas de residuos. Sus recorridos solamente cuentan con una parada, es decir van del punto A al punto B y regresan al punto A, situación que genera que el costo de recolección sea elevado. El mínimo de recolección para poder programar una salida es de 1 tonelada. Una vez que se programan las salidas son asignados los vehículos disponibles los cuales tienen una capacidad de 10 toneladas (COSTO)

ISIPLAST recolecta los residuos de la siguiente manera: La ruta comienza desde el CEDIS, visita el punto establecido, se carga los residuos al camión y regresa al punto inicial. (Gráfica proceso actual)

Con la finalidad de aumentar el alcance, donde se abarque más puntos de recolección, se busca crear una estrategia donde los puntos definidos favorezcan el incremento de los residuos para el beneficio de la empresa, estableciendo una estrategia donde se reduzca el costo del proceso, se establezcan las rutas y sea aprovechado el camión recolector atendiendo su capacidad. La empresa actualmente tiene participación en campañas de reciclaje para fomentarlo en las instituciones educativas, ya que son los principales factores para que el residuo deseado llegue a estos puntos. Es por ello que las instituciones educativas servirán como puntos de recolección debido a que de estudios realizados se demostró que los estudiantes tienen una mayor conciencia sobre el reciclaje y cuidado al medio ambiente. Después de haber realizado un análisis de los modelos utilizados para resolver este tipo de problemas, los métodos exactos de solución son los que mejor se adecuan para resolver el problema planteado, debido que a pesar de ser un problema lineal su tamaño, puede ser resuelto en un tiempo de procesamiento factible donde el resultado que se obtenga resuelva los puntos que se plantean.



Para la presente investigación se han considerado las instituciones educativas en la zona del Estado de México.

Se consideraron las siguientes instituciones como proveedores iniciales para la ruta considerando a cada institución que se encuentre dentro de un rango no mayor a 35 km de distancia dando como resultado las siguientes instituciones:

1. Angela Peralta Elementary School
2. Colegio Nobel
3. Colegio Morelos
4. Colegio del Bosque
5. Colegio Libertad
6. Elementary School Gabino Barreda
7. Escuela Alfredo del Mazo Velez
8. Escuela Amado Nervo
9. Escuela Ignacio Manuel Altamirano
10. Escuela Pablo Damian Gonzalez
11. Escuela Primaria “Guadalupe Victoria”
12. Colegio Nueva España
13. Escuela Primaria “Rosario castellano”
14. Escuela Primaria Amgel Maria Garibay Kintana y Luz
15. Escuela Primaria Benita Galeana
16. Escuela Primaria Carmen Serdan
17. Escuela Primaria Federalizada “Laura Méndez de Cuenca”

18. Escuela Primaria Federalizada “Melchor Ocampo”
19. Escuela Primaria Felipe Villanueva
20. Escuela Primaria Fernando Orozco y Berra
21. Escuela Primaria Heriberto Enriquez Rodriguez Seiem
22. Escuela Primaria Insurgentes
23. Escuela Primaria Julio Hernández
24. Escuela Primaria Prof Rafael Ramirez
25. Escuela Primaria Siervo de la Nación
26. Escuela Primaria Victoria Granados Basurto
27. Escuela Simon Bolivar
28. Ignacio Allende Elementary School
29. Juan de Dios Rodriguez Heredia
30. Simón Bolívar Elementary School

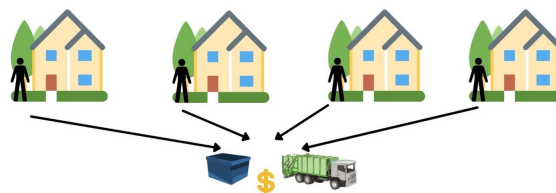


FIGURA 3.4: Método Punto Verde

Fuente: Elaboración Propia

La finalidad del caso de estudio es desarrollar un modelo que considere la capacidad de los vehículos de recolección, el total de puntos a tomar en cuenta, que la ruta obtenida sea menor a la que actualmente tienen en el proceso de recolección y se pueda minimizar el costo de recolección. Por lo que el problema de ruteo con

capacidad limitada va a ser aplicado para encontrar la solución en dónde considere los elementos mencionados y se proponga la ruta que aumente el acopio de residuos. El recorrido por las 30 escuelas es con el fin de aumentar la demanda, cada escuela tiene una capacidad limitada para la recolección de los residuos, por lo que es necesario tener un punto de equilibrio de volumen de residuos recolectados para que sea posible trazar la ruta. Para medir los resultados del caso de estudio se debe considerar los gastos de combustible, el tiempo de recorrido por ruta y el salario de los transportistas.

### 3.3.5 CONCLUSIÓN DE CAPÍTULO

En este capítulo se presentó la descripción de la metodología propuesta para la presente investigación, considerando todos los modelos aplicados por los distintos autores, para darle solución al problema planteado. Razón por la cual se determinó que el uso del VRP con su variante de CVRP es la que mejor se adecuaba para mejorar el proceso de recolección y así aumentar el acopio de residuos.

En las primeras etapas se describió la forma en que será recolectada la información, la forma en que se determinó el modelo que mejor se adecuaba a dar una solución al problema que se le planteaba tomando en consideración los parámetros que involucran al proceso tales como tiempo, costo, distancia y capacidad de recolección, para que pueda ser aplicado por las empresas, se genere un beneficio y resulte eficiente dentro de su proceso de recolección.

Posterior a ello se describió el desarrollo de la metodología de solución, explicando el enfoque en el proceso de recolección. En el siguiente capítulo se aplicará el modelo propuesto a un caso de estudio en una empresa recicladora analizando los resultados para poder identificar mejoras del mismo y validar si los resultados obtenidos fueron los deseados.

## CAPÍTULO 4

# ANÁLISIS Y RESULTADOS

---

En este capítulo se presenta el análisis y evaluación de resultados obtenidos, producto del modelo propuesto, con el objetivo de realizar una comparación si se obtuvo una mejora en comparación al modelo que aplicaba la empresa o si hay una posibilidad de mejora en el modelo y de esa forma poder realizar una conclusión con las herramientas utilizadas, para evaluar su funcionamiento.

Al ver el costo que generaba cada recorrido comparado con el beneficio obtenido del material recolectado, era casi nulo. De ahí la necesidad de mejorar parte del procedimiento enfocándose en obtener una mejor ruta para poder optimizar los recursos utilizados por parte de la empresa, generando un menor costo en el proceso de recolección y de esa forma beneficiando a la empresa. Para mantener el mismo parámetro se limitó el tiempo de recolección de 3 horas.

En la siguiente tabla 4.1 se muestra el recorrido que hacía cada vehículo, desde su origen, hasta sus puntos de recolección y su destino final. La empresa no consideraba la capacidad máxima que tienen los vehículos, el tiempo para la recolección de los residuos y la distancia total para atender todos los puntos de recolección.

Ruta	Vehiculos	Recolección	Paradas	Tiempo	Distancia
Ruta A	ISI 1	2	2	12 min	2.17 km
Ruta B	ISI 2	2	4	1:09 hr	20.94 km
Ruta C	ISI 3	1.6	3	0:51 min	12.10 km
Ruta D	ISI 4	1.7	3	1:39 hr	33.54 km
Ruta E	ISI 5	2	6	1:11 hr	22.94 km
Ruta F	ISI 6	2	3	2:21 hr	40.92 km
Ruta G	ISI 7	4	1.7	1:47 hr	45.33 km
Ruta H	ISI 8	5	2	1:48 hr	39.26 km
Ruta I	ISI 9	4	1.7	1:38 hr	33.63 km
Ruta J	ISI 10	6	1.8	2:36 hrs	45.01 km

TABLA 4.1: Resultados del Proceso de recolección

Fuente: Elaboración propia.

El proceso de recolección que tenía anteriormente la empresa, la distancia total era de 295.84 km, de los cuales únicamente se utilizaban 10 vehiculos de los 22 disponibles para la recolección. De las 10 rutas que se recorrían se recolectaron solamente 18.5 toneladas de residuos.

Para presentar el trazado de la ruta con apoyo del Sistema de Información Geográfica (SIG) se obtuvo el siguiente trazado:

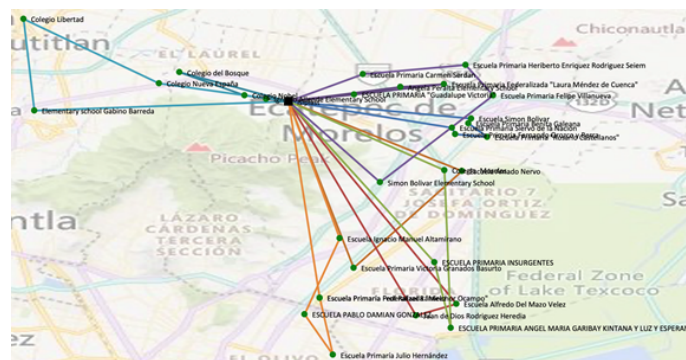


FIGURA 4.1: Representación modelo de Agente Viajero

Fuente: Elaboración Propia

## 4.1 RESULTADOS

Para determinar que el modelo propuesto y las rutas que fueron encontradas son las que menos costo generan, beneficiando así el aumento de recolección de residuos para la empresa. Fueron evaluados y analizados los resultados obtenidos, así como se establecieron los camiones que fueron utilizados de acuerdo a su capacidad, distancia máxima de recorrido y tiempo para determinar las diferentes rutas y atender a todos los puntos de recolección determinados, con la restricción de que deben volver al mismo punto de origen, respetando la capacidad máxima del vehículo y el tiempo asignado, para poder desarrollar mejor los resultados obtenidos se muestra la siguiente tabla 4.2.

Ruta	Vehículo	Recolección	Paradas	Tiempo	Distancia
Ruta A	ISI 1	9.3	12	2:37	60.60
Ruta B	ISI 2	7.5	7	1:40	35.44
Ruta C	ISI 3	9.9	8	3:00	45.62
Ruta D	ISI 4	4.3	7	1:47	35.04

TABLA 4.2: Resultados Obtenidos

Fuente: Elaboración Propia

Tomando en cuenta los resultados que se obtenidos, se encontraron 4 rutas, las cuales fueron asignados 4 vehículos de los 22 disponibles que se tiene para la recolección, dónde cada uno tiene una capacidad de 10 toneladas. Ahora bien de las 4 rutas la distancia total recorrida fue de 176.7 km, que fueron distribuidos entre las 4 rutas, comparando los resultados con el anterior proceso que tenía la empresa, dónde la distancia recorrida únicamente abarcaba 26 puntos de recolección de los 30 recorriendo una distancia total de 235 km resultando con una mejora del 24 % al abarcar todos los puntos y recorriendo menor distancia.

De igual forma la cantidad de residuo recolectada fue un total de 31 toneladas a comparación de su anterior proceso la empresa únicamente recolectaba la cantidad de 26 toneladas por lo que de igual forma se obtuvo un 19% de mejora la cantidad recolectada beneficiando así a la empresa al contar con mayor cantidad de material recolectado para su tratamiento. La cantidad de recolectar los residuos, se determinó por parte de la empresa, en promedio en cada punto de recolección se recolecta no mayor a 2 toneladas de PET

Por cada ruta individual no hubo problema respecto al tiempo que se tiene asignado al proceso de recolección que es de 3 horas, debido a que en cada uno de los cuatro trayectos realizados no se superó ese límite de tiempo siendo la Ruta C la que mayor tiempo ocupó para realizar el recorrido sin embargo fue la ruta que mayor cantidad de residuo recolectó.

El costo total generado del proceso de recolección fue de \$26,786.5 si consideramos que antes el costo total generado era de \$34,737.64 se obtuvo un ahorro de \$7,951.14 por lo que de la función objetivo del modelo se mejoró un 22.8% el costo de recolección.

Los puntos de los centros de recolección fueron representados por un SIG el cual sirvió para poder desarrollar y analizar los resultados y rutas que se obtuvieron quedando de la siguiente manera.

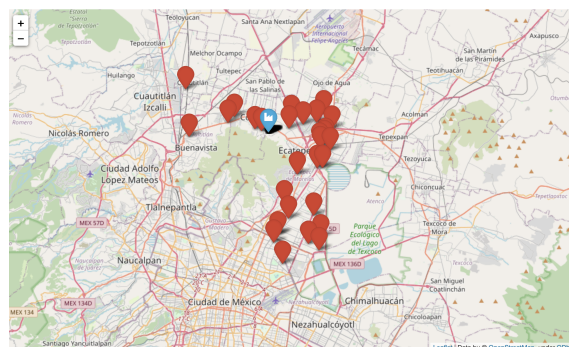


FIGURA 4.2: Mapa de los puntos de recolección en las Instituciones Educativas

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 4.3 se muestran los puntos de recolección y con el punto azul se identifica el centro de recolección, en este caso la empresa recolectora así como las instituciones educativas, se obtuvieron con la implementación del paquete Folium al ingresarlos en Python por lo que fue necesario desarrollar las coordenadas de cada punto de los centros educativos asignados y del punto inicial. Una vez asignados los puntos y puesto las restricciones que fueron determinadas, se encontraron las siguientes rutas en el mapa.

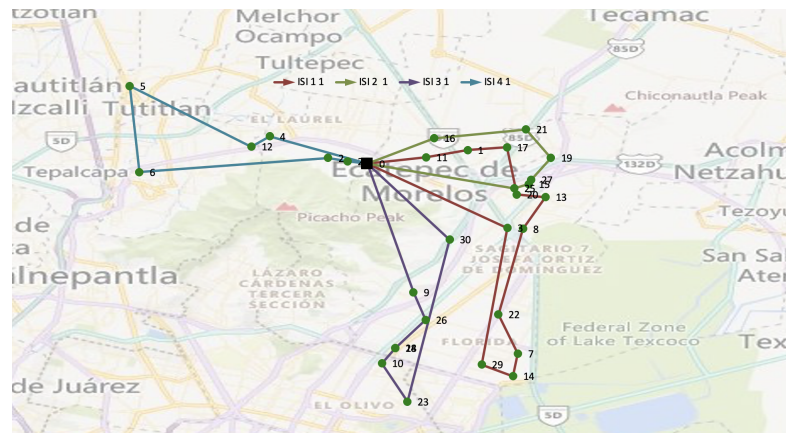


FIGURA 4.3: Ruta de recolección actual

Fuente: Elaboración propia



En la tabla 4.3 se explica el recorrido de cada vehículo, desde su puntos de origen, los puntos visitados y su punto final, así como las distancias y tiempo en cada punto, cumpliendo en cada uno de los recorridos la restricción de capacidad máxima del vehículo, así como el tiempo asignado a el proceso de recolección. El tiempo inicial del recorrido fue en la mañana debido a que es el horario en el que facilita el proceso de recolección dentro de las instituciones educativas aunque en algunos casos se vió afectado el recorrido por cuestiones de tráfico, bloqueos o algún accidente vial.

<b>Vehículo</b>	<b>Ubicación Inicial</b>	<b>Puntos de Recolección</b>	<b>Ubicación final</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Tiempo (hrs)</b>
<b>ISI 1</b>	Isiplast	3-29-14-7-22-8- 13-20-17-1-11	Isiplast	60.60	2:37
<b>ISI 2</b>	Isiplast	25-15-27- 19-21-16	Isiplast	35.44	1:40
<b>ISI 3</b>	Isiplast	9-26-24-18- 10-23-30	Isiplast	45.62	3:00
<b>ISI 4</b>	Isiplast	4-12-5-6-2-28	Isiplast	35.04	1:47

TABLA 4.3: Recorrido de las rutas obtenidas para cada vehículo

Fuente: Elaboración propia

Dada la capacidad del vehículo no sería posible cubrir por completo todos los puntos de recolección con un solo vehículo. En la ruta 1, el primer vehículo pudo visitar 12 de las 30 escuelas, recolectó 9.3 toneladas de PET, con una distancia de 60.60 kilómetros, en un tiempo de 1:44 hrs, saliendo desde el depósito, visitando cada uno de los puntos de recolección y retornando a la empresa, considerando la demanda en cada uno de los puntos y la capacidad del vehículo.

Ubicación	Distancia	Carga	Tiempo de Trabajo
Isiplast	0.00	0	0:00
3	9.66	1	0:24
29	24.11	1.4	0:43
14	25.86	2.3	0:50
7	27.76	3.8	0:57
22	31.84	4.1	1:07
8	38.93	5.2	1:21
13	42.14	6.3	1:31
20	43.93	7.5	1:38
17	50.29	8.6	1:59
1	52.67	9.1	2:09
11	57.28	9.3	2:23
Isiplast	60.60	9.3	2:37

TABLA 4.4: Capacidad del vehículo 1

Fuente: Elaboración propia

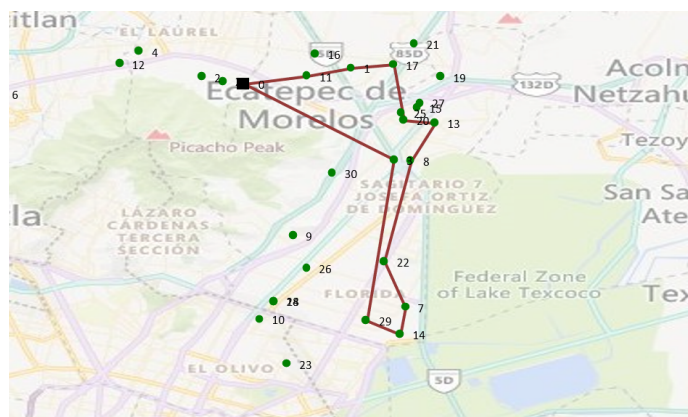


FIGURA 4.4: Recorrido de la Ruta 1

Elaboración propia

Para la ruta 2 se ocupó otro vehículo el cual visitó 7 escuelas, recolectó un total de 7.5 toneladas de PET, con una distancia de total de 34.55 kilómetros, en un tiempo de 42 minutos.

Ubicación	Distancia	Carga	Tiempo de Trabajo	Ubicación
0	Isiplast	0.00	0	0:00
1	25	8.34	1.3	0:26
2	15	9.23	3	0:31
3	27	9.92	4.4	0:35
4	19	14.13	6.4	0:51
5	21	22.02	7.1	1:04
6	16	30.89	7.5	1:22
7	Isiplast	35.44	7.5	1:40

TABLA 4.5: Capacidad del Vehículo 2

Fuente: Elaboración propia



FIGURA 4.5: Recorrido de la ruta 2

Fuente: Elaboración propia

La ruta 3 se hizo visitaron 8 puntos de recolección de cuales se recolectó un total de 9.9 toneladas de PET, con una distancia total de 45.62 kilómetros en en 1:01 hrs.

Ubicación	Distancia	Carga	Tiempo de Trabajo
Isiplast	0.00	0	0:00
9	12.74	0.7	0:40
26	15.82	2.4	0:55
24	18.32	4.5	1:02
18	18.32	6.1	1:02
10	19.59	7.9	1:06
23	23.30	9.4	1:24
30	37.23	9.9	2:21
Isiplast	45.62	9.9	3:00

TABLA 4.6: Capacidad del vehículo 3

Fuente: Elaboración propia

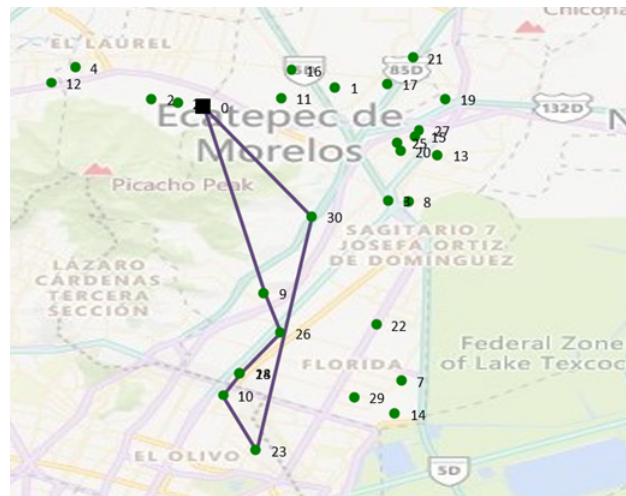


FIGURA 4.6: Recorrido de la ruta 3

Fuente:Elaboración propia

Para la ruta 4 y última se visitaron 7 puntos de recolección, solo se recolectó 4 toneladas de PET, en un tiempo de 1:52 hrs.

Ubicación	Distancia de Carga	Tiempo de Trabajo	Tiempo
Isiplast	0.00	0	0:00
4	6.26	0.8	0:25
12	7.83	1.8	0:29
5	16.13	2.5	0:53
6	23.34	2.8	1:09
2	33.06	4	1:34
28	33.98	4.3	1.41
Isiplast	35.04	4.3	1.47

TABLA 4.7: Capacidad del vehículo 4

Fuente: Elaboración propia

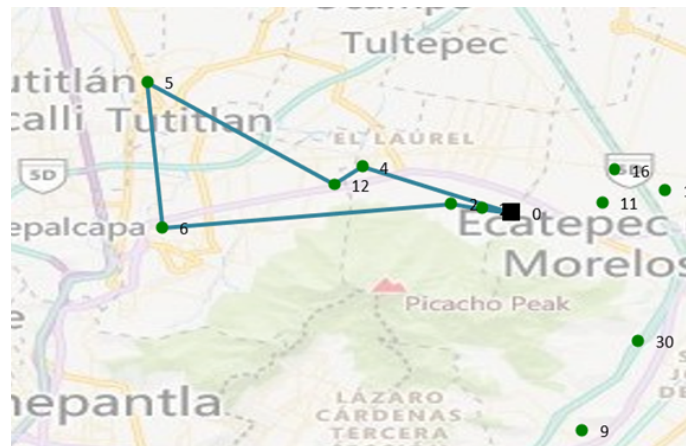


FIGURA 4.7: Recorrido de la ruta 4

Fuente: Elaboración propia

De los resultados obtenidos al correr el modelo propuesto arrojó 4 rutas de las cuales favoreció la reducción de residuos al haber abarcado los 30 puntos de recolección, en donde se comprobó el ahorro en el proceso de recolección de un 19%

hasta un 24 %, esto se debe a que el trazado de ruta logró distribuir los camiones, de modo que sólo se utilizarán los necesarios para su recolección, tomando en cuenta la capacidad del vehículo

Para poder obtener los resultados fue formulado el modelo, desarrollando la implementación en Python del CVRP. Para lo cual se creó el nodo de la red con los parámetros indicados en la metodología. De igual forma fue utilizado el optimizador CPLEX, el cual funciona para resolver problemas de programación lineal la cual en su versión 3.9 y con apoyo de la librería docplex se definió la función para poder generar la instancia del CVRP. El tiempo de procesamiento del modelo fue de 12:32 minutos.

El costo total del proceso de recolección es otro de los elementos que se esperan obtener y haya una ahorro en pro de la empresa. Para realizar un correcto análisis serán comparados los resultados con los datos recolectados de la empresa, y observar si de la base de datos que tenían, con qué porcentaje de mejora fue resuelto el problema o en su defecto si el resultado no favorece el proceso y se acorte la distancia recorrida.

## 4.2 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

De la aplicación del modelo propuesto CVRP, se pudo dar una solución al problema planteado, ya que la empresa no contaba con una red logística para recolectar los residuos. Se obtuvieron las rutas que minimizaron el costo de operación, que deben realizar los vehículos recolectores, en la zona de cobertura definida, para obtener la cantidad necesaria de residuos que requiere la empresa, atendiendo la capacidad del vehículo, para generar materia prima que sirva como ingreso adicional y se contribuya al cuidado del medio ambiente. Resultó viable la aplicación del problema de ruteo con capacidad limitada, debido a que se compararon los recursos utilizados por la empresa para el proceso de recolección dónde además de utilizar los recursos necesarios, se redujo la distancia recorrida, abarcando la totalidad de los puntos y de esa forma impactó en el aumento del acopio de residuos. De igual forma se observó que al considerar un mayor número de puntos el tiempo de solución del modelo se resuelve en un tiempo significativamente mayor lo cual da la pauta a futuras investigaciones de mejora del modelo aplicando algún método de solución heurística o metaheurística el cual reduzca el tiempo de procesamiento.

El costo y rentabilidad asociados con la implementación de este tipo de herramientas deberán considerarse desde un enfoque financiero en su relación costo-beneficio, de manera que puedan cuantificar los beneficios no sólo económicos, sino sociales, ambientales.

## CAPÍTULO 5

# CONCLUSIONES

---

En este capítulo se presentan las conclusiones encontradas con la implementación del modelo propuesto para la recolección de residuos, se sugiere recomendaciones para mejorar el modelo, con la finalidad de procesar el modelo en un menor tiempo, se integró un sistema de información geográfica (SIG) para representar los puntos de recolección y el trazo de las rutas.

### 5.1 CONCLUSIONES GENERALES

Para la presente tesis se propuso un modelo de recolección de residuos, para llevar a cabo dicho modelo, se basó en recolectar residuos en las instituciones educativas, con el objetivo de mejorar el proceso de recolección estableciendo una ruta que optimice los costos de transporte y aumentar el acopio de los residuos. Con el uso del modelo propuesto CVRP se mejoró el proceso de recolección ya que se ajustó a los parámetros, restricciones y recursos, para que las empresas implementen la logística inversa que sea viable de aplicar y puedan recolectar los residuos al final de su ciclo de vida, con el fin de que sean aprovechados para crear nueva materia prima y se adapte a las necesidades de las Pymes.

Para darle una solución al problema que se plantea, se desarrolló una investi-



gación que se profundizó en temas de cómo establecer una cadena logística inversa, saber los procesos que se realizan dentro de la misma, los beneficios, identificar los problemas de enrutamiento de vehículos, el plantear una red logística de transporte, saber cómo recolectar los residuos y el poder destinar los residuos generados por la población, de modo que lleguen a las empresas recicladoras y se puedan tratar estos residuos. Se analizaron distintos casos de estudio de empresas recicladoras con el fin de determinar qué variables consideraban y poder alcanzar el objetivo planteado.

La metodología se estructuró de acuerdo al problema planteado, al diseñar la red de logística inversa se tuvo un mayor beneficio para la recolección de residuos, ya que se pudo eficientar el proceso de recolección de residuos, se identificaron las variables utilizadas para el caso de estudio y se resolvió el CVRP. La eficiencia de un software permite hacer un análisis para darle una solución al problema planteado, se realizó un estudio en el área de recolección de residuos, este logró aumentar la demanda de los residuos y obtener la ruta para la recolección de los mismos.

De acuerdo al problema planteado se formuló el modelo matemático, que permite desarrollar el análisis de datos de las restricciones aplicadas así como la función objetivo que es el minimizar el costo de operación. al haber aplicado el modelo al caso de estudio en una empresa recicladora permitió generar las rutas de acuerdo a los parámetros establecidos, en donde su aplicación, se obtuvo una mejora significativa del proceso logístico en su etapa de recolección, mejorando el proceso de recolección que tenía la empresa, hasta en un 24 % aprovechando los recursos con los que cuenta la empresa siendo aplicable para cualquier empresa que desee implementar una red logística de recolección, garantizando un aprovechamiento de recursos. De acuerdo a los resultados de la experimentación, se obtuvo que el costo de operación del proceso de recolección se redujo un 22.8 % con lo cual podemos concluir que la función objetivo del modelo planteado se cumple satisfactoriamente en donde beneficia a la empresa, la creación de una estrategia para minimizar el costo de operación.

El modelo dio como resultado 4 rutas asignadas a 4 de los 22 vehículos dis-

ponibles, además de que el recorrido total fue de 176.6 km mejorando un 24% la ruta que se tenía abarcando los 30 puntos de recolección a comparación de los 26 anteriores que se tenían contemplados.

La cantidad recolectada por los 4 vehículos se logró recolectar 31 toneladas de residuo a comparación de su antiguo proceso, en donde solo se recolectaba 26 toneladas, dónde beneficio a la empresa al obtener mayor cantidad de materia prima, para poder darle una segunda a los materiales recolectados.

## 5.2 CONTRIBUCIONES

El acopio y reciclaje hoy en día es muy común y es una fuente de ingresos no solo para la población, sino para las empresas, por lo que es importante que las empresas cuenten con un método para recolectar estos residuos y fabricar nueva materia prima. Es sobresaliente el impacto que está teniendo las campañas de reciclaje por parte de las empresas, ya que los niños pueden identificar como reciclar y separar adecuadamente la basura para beneficiar a las personas que lo recolectan y sobre todo mejorar el medio ambiente. Los beneficios que brinda el reciclar debe ser a partir del consumidor y que las empresas continúen con el proceso, ya que deben hacer énfasis en mejorar los procesos logísticos y no solo enfocarse por mejorar el medio ambiente, sino como llevar a cabo este tipo de prácticas, ahorrar y mejora continua. El integrar un sistema de información geográfica favorece a que el modelo propuesto al momento de realizar la simulación pueda procesar la información de manera más rápida al obtener las distancias entre los puntos y sea menor el tiempo de procesamiento.

### 5.3 TRABAJO A FUTURO

El diseñar una red logística inversa puede ser adaptado para recuperar otro tipo de residuo, como madera, recolección de llantas, tapas, etc. Para darle una solución al problema se puede desarrollar a través de otro tipo de programación, buscando mejorar los tiempos de solución. Al resolver el problema se pudo analizar que se puede resolver con un método heurísticos y metaheurísticos, son herramientas que han servido de apoyo para simular y acortar el tiempo de procesamiento, esto dependiendo la complejidad del problema.

En esta investigación se consideró solamente 30 puntos de recolección, sin embargo un siguiente paso consistiría en aumentar la cantidad de puntos para recolectar residuos, ya que es importante experimentar con instancias de mayor tamaño mediante los métodos de solución como las heurísticas y metaheurísticas, de modo que se pueda comparar los resultados de dicho método. La empresa pretende incluir más escuelas en la ruta, sin embargo, esto dependerá de los resultados obtenidos conforme vaya avanzando el proyecto.

APÉNDICE A

ESTE ES UN APÉNDICE

---

# BIBLIOGRAFÍA

---

- ALBIACH, J., J. M. SANCHIS y D. SOLER (2008), «An asymmetric TSP with time windows and with time-dependent travel times and costs: An exact solution through a graph transformation», *European Journal of Operational Research*, **189**(3), págs. 789–802.
- ANGELELLI, E. y M. G. SPERANZA (2002), «The application of a vehicle routing model to a waste collection problem: two case studies», en *Quantitative Approaches to Distribution Logistics and Supply Chain Management*, Springer, págs. 269–286.
- ARMON, A., A. AVIDOR y O. SCHWARTZ (2010), «Cooperative tsp», *Theoretical Computer Science*, **411**(31-33), págs. 2847–2863.
- BASUKI, M., M. HIDAYAT, F. AJI *et al.* (2019), «Application of saving matrix methods and cross entropy for capacitated vehicle routing problem (CVRP) resolving», en *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, tomo 462, IOP Publishing, pág. 012025.
- BEETRACK (2020), «Logística Inversa en la Cadena de Suministro», <https://www.beetrack.com/es/blog/logistica-inversa-cadena-suministro>.
- BOSCHETTI, M. A., V. MANIEZZO, M. ROFFILLI y A. BOLUFÉ RÖHLER (2009), «Matheuristics: Optimization, simulation and control», en *International Workshop on Hybrid Metaheuristics*, Springer, págs. 171–177.
- BOSQUE SENDRA, J., S. FRANCO MAASS *et al.* (1995), «Modelos de localización-

- asignación y evaluación multicriterio para la localización de instalaciones no deseables», *Serie Geográfica*.
- BOŻEJKO, W. y M. WODECKI (2009), «Solving permutational routing problems by population-based metaheuristics», *Computers & Industrial Engineering*, **57**(1), págs. 269–276.
- CABEZA, D. (2012), *Logística inversa en la gestión de la cadena de suministro*, Marge books.
- CARROLL, A. B. (1999), «Corporate social responsibility: Evolution of a definitional construct», *Business & society*, **38**(3), págs. 268–295.
- CARTER, C. R. y L. M. ELLRAM (1998), «Reverse logistics: a review of the literature and framework for future investigation», *Journal of business logistics*, **19**(1), pág. 85.
- CESAR PONCE, J., A. RECIO, A. OCHOA, A. HERNANDEZ, F. ORNELAS, A. PADILLA y A. TORRES (2014), «Algoritmo de colonia de hormigas en CUDA para la optimización de rutas de distribución», *Komputer Sapiens*, **3**(6), págs. 25–32.
- CHOPRA, S. y M. PETER (2008), *Administración de la cadena de suministro*, Pearson educación.
- CHURCH, R. y C. REVELLE (1974), «The maximal covering location problem», en *Papers of the regional science association*, tomo 32, Springer-Verlag, págs. 101–118.
- CILIBERTI, F., P. PONTRANDOLFO y B. SCOZZI (2008), «Investigating corporate social responsibility in supply chains: a SME perspective», *Journal of cleaner production*, **16**(15), págs. 1579–1588.
- COLOMINA, A. F. (2005), «La gestión integral de los residuos sólidos urbanos en el desarrollo sostenible local», *Revista Cubana de Química*, **17**(3), págs. 35–39.

- CORREA TRUJILLO, J. A. y M. A. JARAMILLO MEDINA (2019), «Diseño de rutas escolares considerando elementos sociales.», .
- CRUZ-RIVERA, R. y J. ERTEL (2009), «Reverse logistics network design for the collection of end-of-life vehicles in Mexico», *European journal of operational research*, **196**(3), págs. 930–939.
- CUNQUERO, R. M. (2003), «Algoritmos heurísticos en optimización combinatoria», *Valencia: Universidad de Valencia. Retrieved*, **11**(01), pág. 2012.
- CURE VELLOJÍN, L., J. C. MEZA GONZÁLEZ y R. AMAYA MIER (2006), «Logística Inversa: una herramienta de apoyo a la competitividad de las organizaciones», *Ingeniería y desarrollo*, (20), págs. 184–202.
- DANTZIG, G. B. y J. H. RAMSER (1959), «The truck dispatching problem», *Management science*, **6**(1), págs. 80–91.
- DARÓS, M. C. y M. M. ARCE (1998), «Técnicas de optimización robusta Aplicadas al problema de la p-mediana en condiciones de incertidumbre», *Actas de VI Jornadas de la Asociación Española de Profesores Universitarios de Matemáticas para la Economía y la Empresa, Santiago de Compostela*.
- DASKIN, M. S. (1983), «A maximum expected covering location model: formulation, properties and heuristic solution», *Transportation science*, **17**(1), págs. 48–70.
- DBGIR (2020), «Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos», <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>.
- DEMEULEMEESTER, E. y W. HERROELEN (1992), «A branch-and-bound procedure for the multiple resource-constrained project scheduling problem», *Management science*, **38**(12), págs. 1803–1818.
- DENEUBOURG, J.-L., S. ARON, S. GOSS y J. M. PASTEELS (1990), «The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant», *Journal of insect behavior*, **3**(2), págs. 159–168.

- DRIGO, M. (1996), «The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B*, **26**(1), págs. 1–13.
- DU, F. y G. W. EVANS (2008), «A bi-objective reverse logistics network analysis for post-sale service», *Computers & Operations Research*, **35**(8), págs. 2617–2634.
- ELLOUMI, S., M. LABBÉ y Y. POCHET (2004), «A new formulation and resolution method for the p-center problem», *INFORMS Journal on Computing*, **16**(1), págs. 84–94.
- FAIZ, S., S. KRICHEN y W. INOUBLI (2014), «A DSS based on GIS and Tabu search for solving the CVRP: The Tunisian case», *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, **17**(1), págs. 105–110.
- FERMANI, M., D. G. ROSSIT y A. A. TONCOVICH (2020), «Una Metaheurística de Recocido Simulado para Resolver un Problema de Ruteo de Vehículos en la Recolección de Residuos», .
- FERNÁNDEZ, M. A. (2013), «2<sup>o</sup> Congreso Venezolano de Ciencia Tecnología e innovación», *Locti-Peii*, **1**(1), págs. 5–411.
- FLEISCHMANN, M., J. M. BLOEMHOF-RUWAARD, R. DEKKER, E. VAN DER LAAN, J. A. VAN NUNEN y L. N. VAN WASSENHOVE (1997), «Quantitative models for reverse logistics: A review», *European journal of operational research*, **103**(1), págs. 1–17.
- FLOOD, M. M. (1956), «The traveling-salesman problem», *Operations research*, **4**(1), págs. 61–75.
- FULLERTON, D. y T. C. KINNAMAN (1995), «Garbage, recycling, and illicit burning or dumping», *Journal of environmental economics and management*, **29**(1), págs. 78–91.



- GAJARDO, A. B., E. P. VILLALOBOS, R. O. BURGOS y C. O. SAN MARTÍN (2010), «Algoritmo basado en discriminación por distancias con búsqueda global aplicado al problema de la p-mediana», *Revista Ingeniería Industrial*, **9**(1).
- GARCÍA, A., N. VELÁZQUEZ, A. TREJO SÁNCHEZ y J. B. TOBÓN GARCÍA (2020), «Cultura de reciclaje en México: La educación ambiental.», *Boletín Científico INVESTIGIUM de la Escuela Superior de Tizayuca*, **6**(11), págs. 24–32.
- GAUTAM, A. y S. KUMAR (2005), «Strategic planning of recycling options by multi-objective programming in a GIS environment», *Clean Technologies and Environmental Policy*, **7**(4), págs. 306–316.
- GIRALDO, J. (2008), «Utilización de la Teoría de la Logística Inversa, en el reciclaje, sustitución y re-uso de materiales y la disposición de desperdicios», *Revista Ingeniería de Mercados, Universidad Autónoma de Bucaramanga*, **2**(4).
- GLOVER, F. y M. LAGUNA (1997), «Tabu search kluwer academic», *Boston, Texas*.
- GOEL, R. y R. MAINI (2017), «Vehicle routing problem and its solution methodologies: a survey», *International Journal of Logistics Systems and Management*, **28**(4), págs. 419–435.
- GÓMEZ, M. C. P. (2005), «Descripción de la cultura organizacional y los valores de convivencia y responsabilidad social en un call center en Bogotá (Colombia)», *Psicología desde el Caribe*, (15), págs. 51–73.
- GONZÁLEZ-TORRE, P. L. y B. ADENSO-DÍAZ (2005), «Influence of distance on the motivation and frequency of household recycling», *Waste management*, **25**(1), págs. 15–23.
- GUIDE, J. V. y L. N. VAN WASSENHOVE (2002), «The reverse supply chain.», *Harvard business review*, **80**(2), págs. 25–26.
- GUTIÉRREZ MITE, R. A. *et al.* (2019), *Diseño de ruteo vehicular con ventanas de tiempo aplicando el algoritmo Clarke & Wright para una empresa que comercializa insumos y dispositivos médicos*, B.S. thesis, ESPOL. FCNM.

- HAKIMI, S. L. (1986), «p-Median theorems for competitive locations», *Annals of operations research*, **6**(4), págs. 75–98.
- HAMILTON, W. R. (2013), «Problema del viajante», *Wikizer*.
- HERNÁNDEZ, F. S. y E. S. PÉREZ (2016), «20 Aplicación del modelo VRP (Vehicle Routing Problem) para la optimización de una red de distribución», *Estudios Iberoamericanos en Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística*, pág. 306.
- HESSE, M. y J.-P. RODRIGUE (2004), «The transport geography of logistics and freight distribution», *Journal of transport geography*, **12**(3), págs. 171–184.
- HUACA, C. y D. SALOMÉ (2019), *Logística Inversa aplicada en la gestión de residuos generados por la empresa FlexoFilm, fabricante de fundas plásticas, en la ciudad de Ibarra*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica Estatal del Carchi.
- JANSEN, K. (1993), «Bounds for the general capacitated routing problem», *Networks*, **23**(3), págs. 165–173.
- JIMÉNEZ LÓPEZ, B. A. (2019), *Problema de localización de instalaciones en respuesta a situaciones de emergencia considerando indicadores de accesibilidad.*, Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- KALLEHAUGE, B. (2008), «Formulations and exact algorithms for the vehicle routing problem with time windows», *Computers & Operations Research*, **35**(7), págs. 2307–2330.
- KAO, J.-J., L.-M. WEN y K.-H. LIU (2010), «Service Distance and Ratio-Based Location-Allocation Models for Siting Recycling Depots», *Journal of Environmental Engineering*, **136**(4), págs. 444–450.
- KOPICKI, R., M. J. BERG y L. LEGG (1993), «Reuse and recycling-reverse logistics opportunities», .

- KRIKKE, H., H. LE BLANC y S. VAN DE VELDE (2003), «Creating value from returns», *Center for Applied Research working paper, Tilburg University, The Netherlands*.
- KUNREUTHER, H., K. FITZGERALD y T. D. AARTS (1993), «Siting noxious facilities: A test of the facility siting credo», *Risk Analysis*, **13**(3), págs. 301–318.
- LIN, S. (1965), «Computer solutions of the traveling salesman problem», *Bell System Technical Journal*, **44**(10), págs. 2245–2269.
- LISTEŞ, O. (2007), «A generic stochastic model for supply-and-return network design», *Computers & Operations Research*, **34**(2), págs. 417–442.
- LÓPEZ PARADA, J. (2010), *Incorporación de la Logística Inversa en la Cadena de Suministros y su influencia en la estructura organizativa de las empresas*, Universitat de Barcelona.
- LUCE, R. D. y H. RAIFFA (1954), «A Survey of the Theory of Games», *Informe técnico*, Columbia Univ New York Bureau of Applied Social Research.
- LUTTWAK, E. (1971), «Dictionary of modern war (p. 680)», *New York, NY: Gramercy*.
- MAGUIÑA AGURTO, L. L. (2016), «Implantación de VRP-Solver aplicando la heurística de Clarke Wright para el ruteo del transporte terrestre en el área de distribución caso de estudio: industrias alimentarias», .
- MARGAIN, L., E. CRUZ, A. OCHOA, A. HERNÁNDEZ y J. RAMOS LANDEROS (2017), «Simulation and Application of Algorithms CVRP to Optimize the Transport of Minerals Metallic and Nonmetallic by Rail for Export», en *International Conference on Swarm Intelligence*, Springer, págs. 519–525.
- MECALUX (2021), «Logística Inversa para gestionar devoluciones con éxito», <https://www.mecalux.es/blog/logistica-inversa-ejemplos>.

- MENA MÉNDEZ, E. (2019), *Diseño de la ruta de recolección de residuos sólidos urbanos de la zona comunal# 11 del municipio de Santa Clara*, Tesis Doctoral, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Ingeniería . . . .
- MENDOZA GUAMÁN, E. F. y S. J. CULLAY ASHQUI (2018), *Optimización de las operaciones logísticas, en las rutas urbanas de recolección de desechos sólidos en la empresa pública Municipal GIDSA Ambato.*, B.S. thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- MENESES REQUENA, S. (2021), «Determinantes económicos de los tiraderos clandestinos: efectos heterogéneos de la recolección de residuos», .
- MILLER, C. E., A. W. TUCKER y R. A. ZEMLIN (1960), «Integer programming formulation of traveling salesman problems», *Journal of the ACM (JACM)*, **7**(4), págs. 326–329.
- MORÁN BERMÚDEZ, N. *et al.* (2015), «Desarrollo y aplicación del algoritmo PSO al problema TSP», .
- NIEVERGELT, J. (2000), «Exhaustive search, combinatorial optimization and enumeration: Exploring the potential of raw computing power», en *International Conference on Current Trends in Theory and Practice of Computer Science*, Springer, págs. 18–35.
- NINLAWAN, C., P. SEKSAN, K. TOSSAPOL y W. PILADA (2010), «The implementation of green supply chain management practices in electronics industry», en *World Congress on Engineering 2012. July 4-6, 2012. London, UK.*, tomo 2182, Citeseer, págs. 1563–1568.
- OLTRA BADENES, R. F. (2015), «La Logística Inversa: concepto y definición», *Universitat Politècnica de València*.
- ORTEGA MIER, M. Á. (2008), *Utilización de métodos cuantitativos para el análisis de problemas de localización en logística inversa*, Tesis Doctoral, Industriales.

- PALACIOS, T. M. B. y S. R. LACOPA (2005), «Sistemas de logística inversa en la empresa», *Dirección y Organización*, (31).
- PENNA, A. F. *et al.* (2014), «Problema del agente viajero», *XIKUA Boletín Científico de la Escuela Superior de Tlahuelilpan*, **2**(3).
- QUEVEDO OROZCO, D. R. (2014), «Optimización del problema del p-centro capacitado.» , .
- RACERO MORENO, J. y E. PÉREZ ARRIAGA (2006), «Optimización del sistema de rutas de recolección de residuos sólidos domiciliarios (Ecoeficiencia)», en *X Congreso de Ingeniería de Organización*.
- REVELLE, C. S., H. A. EISELT y M. S. DASKIN (2008), «A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science», *European journal of operational research*, **184**(3), págs. 817–848.
- ROCHA MEDINA, L. B., E. C. GONZÁLEZ LA ROTA y J. A. ORJUELA CASTRO (2011), «Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución», *Ingeniería*, **16**(2), págs. 35–55.
- ROGERS, D. S. y R. S. TIBBEN-LEMBKE (1999), ««Reverse logistics»: stratégies et techniques», *Logistique & Management*, **7**(2), págs. 15–25.
- ROJAS AGUILERA, J. P., R. SALAZAR, M. Á. AHUMADA SEPÚLVEDA, M. SEPÚLVEDA y I. SANTELICES Malfanti (2006), «Residuos sólidos domiciliarios: logística, una herramienta moderna para enfrentar este antiguo problema», *Revista Ingeniería Industrial*, **5**(1).
- SAIT, S. M. (1999), «Iterative Computer Algorithms with Applications in Engineering-Solving Combinatorial Optimization Problem», *The IEEE Computer Society*.
- SCATTERGOOD, D. (2003), «Supply Chain Management in the Localization Industry ‘Automating The Digital Pipeline’», .

- SEDEMA (2016), «Inventario de Residuos Sólidos», <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/IRS-2016.pdf>.
- SEDEMA (2020), «Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos», <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>.
- SEMARNAT (2017), «Residuos Sólidos Urbanos», <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu>.
- STOCK, J. R. (2001), «Reverse logistics in the supply chain», *Revista Transport & Logistics*, **44**.
- STÜTZLE, T. y H. H. HOOS (1996), «Improving the Ant System: A detailed report on the MAX-MIN Ant System», *FG Intellektik, FB Informatik, TU Darmstadt, Germany, Tech. Rep. AIDA-96-12*.
- TAILLARD, É., P. BADEAU, M. GENDREAU, F. GUERTIN y J.-Y. POTVIN (1997), «A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows», *Transportation science*, **31**(2), págs. 170–186.
- TANSEL, B. (2017), «From electronic consumer products to e-wastes: Global outlook, waste quantities, recycling challenges», *Environment international*, **98**, págs. 35–45.
- THIERRY, M., M. SALOMON, J. VAN NUNEN y L. VAN WASSENHOVE (1995), «Strategic issues in product recovery management», *California management review*, **37**(2), págs. 114–136.
- TILLMAN, F. A. (1969), «The multiple terminal delivery problem with probabilistic demands», *Transportation Science*, **3**(3), págs. 192–204.
- TOTH, P. y D. VIGO (2002), *The vehicle routing problem*, SIAM.
- TRENDS, R. L. (1998), «Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices», *Reverse Logistics Executive Council*.

- UNESCO (2017), «Educación para los Objetivos de Desarrollo Sostenible», <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000252423>.
- VOUDOURIS, C. y E. TSANG (1999), «Guided local search and its application to the traveling salesman problem», *European journal of operational research*, **113**(2), págs. 469–499.
- WINSTON, W. L. y J. B. GOLDBERG (2004), *Operations research: applications and algorithms*, tomo 3, Thomson Brooks/Cole Belmont.
- WORLD BANK (2022), «Manejo de Residuos Sólidos», <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management>.
- YANG, Q., S.-C. CHU, J.-S. PAN y C.-M. CHEN (2020), «Sine cosine algorithm with multigroup and multistrategy for solving CVRP», *Mathematical Problems in Engineering*, **2020**.

# RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

---

Carmen Alexia Gonzalez Lagunas

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

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

APLICACIÓN DE LOGÍSTICA INVERSA PARA EL APROVECHAMIENTO  
DE MATERIALES RECICLADOS

Carmen Alexia Gonzalez Lagunas es originaria del estado de México, nació el 24 de abril de 1998 en Ecatepec de Morelos, estado de México. Sus padres son Francisco Garay Tapia y Mirella Lagunas Reséndiz. Es licenciada en Comercio Exterior y Derecho Aduanero egresada de la Universidad Madero Puebla, Puebla en 2020, consiguió sus estudios gracias a una beca deportiva del 100%. Carmen es maestra en logística y cadena de suministro, fue becaria CONACYT y represento al equipo de basquetbol de tigres.