

# UACM

Universidad Autónoma  
de la Ciudad de México

---

*Nada humano me es ajeno*

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE TRANSPORTE URBANO

**Optimización del Sistema de Recolección de Residuos Sólidos Domiciliarios mediante la  
Aplicación de Técnicas de Programación Lineal en las Colonias Juventino Rosas y  
Ramos Millán de la Delegación Iztacalco**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE TRANSPORTE URBANO

PRESENTA

**LEO ADRIAN MUÑOZ BECERRA**

DIRECTOR

**M. en I. Francisco Gerardo Alvarado Arias**

Ciudad de México, Septiembre 2019

## SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

### RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

### DERECHOS RESERVADOS<sup>©</sup>

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

## Dedicatoria

Primero y antes que nada, a Dios, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido soporte y compañía durante toda mi vida.

A mi admirable Mamá Silvia a mi admirable Papá Armando, linda hermana Alejandra, guapa sobrina Karla y guapo sobrino Tadeo que son fuente de alegría en mi vida, a dos hermosas personas que amó y que la vida me ha presentado Leticia y Yamileth que vinieron a darle oxígeno a mi vida y llenarla de felicidad y amor, gracias a todos que me dan la fortaleza necesaria para seguir adelante, y demás familiares en general por el ánimo y apoyo que me brindan.

## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios que me da las facultades para pensar en mi futuro, que me otorga una oportunidad de vida y disfrutar de los bellos momentos de la misma, y sobre todo a mis padres, fieles amigos, acompañantes y consejeros que si no fuera por su sacrificio no estaría en estos momentos y mi sueño no lo habría cumplido.

No tengo palabras para seguir diciendo el gran regocijo que me da poder terminar esta carrera, que no fue fácil, pero lo cumplí a pesar de las dificultades que se me presentaron y logre salir adelante, en donde maestros y compañeros dejan gran enseñanza.

Al M. en I. Francisco Gerardo Alvarado Arias, mi agradecimiento por su orientación, paciencia y apoyo brindado en la elaboración de mi tesis.

A cada uno de mis maestros que se esforzaron por brindarme su orientación en mi formación como profesional, en especial a mis lectores de tesis, M. en I. Rubén Téllez Sánchez, M. en I. Raúl Soto Peredo, M. en I. Juan Gilberto Salas Márquez.

Solo sé que este camino es el comienzo de una gran historia de virtudes para mí.

## ÍNDICE GENERAL.

INTRODUCCIÓN ..... i

OBJETIVO GENERAL Y PARTICULARES.....ii

ALCANCES .....ii

JUSTIFICACIÓN .....iii

### CAPÍTULO I. GENERALIDADES DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO.

1.1 Residuos sólidos en la Ciudad de México.....	3
1.1.1 Generación de residuos sólidos en la Ciudad de México .....	3
1.1.2 Residuos sólidos por fuente generadora .....	4
1.1.3 Recolección selectiva .....	5
1.2 Infraestructura para el manejo de residuos sólidos en la Ciudad de México .....	6
1.2.1 Estaciones de transferencia.....	7
1.2.2 Plantas de selección.....	10
1.2.3 Plantas compactadoras .....	11
1.2.4 Plantas de composta .....	12
1.2.5 Planta de termo valorización “El Sarape”.....	14
1.2.6 Sitios de disposición final.....	14
1.3 Problemática de la recolección de residuos sólidos en la Ciudad de México y la delegación Iztacalco.....	15

### CAPÍTULO II. METODOS Y FRECUENCIA DE RECOLECCIÓN.

2.1 Método de esquina o parada fija.....	18
2.2 Método de acera .....	19
2.3 Método “Llevar y Traer” o Intradomiciliario.....	21
2.4 Método de contenedores .....	22
2.5 Frecuencia de recolección .....	23
2.5.1 Tiempo de incubación y crecimiento de la mosca .....	23
2.5.2 Recolección Diaria.....	23
2.5.3 Recolección Cada Tercer Día.....	24
2.5.4 Recolección Dos Veces por Semana .....	25

### CAPÍTULO III. EQUIPOS DE RECOLECCIÓN Y TIPO DE ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN MÉXICO.

3.1	Equipos de Recolección Altamente especializados .....	28
3.2	Equipos Especializados .....	29
3.3	Equipos no convencionales .....	30
3.4	Tipo de almacenamiento de residuos sólidos .....	31
3.4.1	Almacenamiento domiciliario .....	31
3.4.2	Almacenamiento no domiciliario .....	32
3.4.2.1	Comercial .....	32
3.4.2.2	Industrial .....	32
3.4.2.3	Hospitales.....	32

### CAPÍTULO IV. RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARIOS.

4.1	Reglas Básicas para el Diseño de Rutas .....	35
4.2	Macrorutas .....	36
4.2.1	Determinación de macroruta o sectorización.....	37
4.2.2	Determinación de los límites de los sectores.....	38
4.2.3	Número de vehículos necesarios .....	38
4.3	Microrutas .....	39
4.3.1	Datos necesarios para las microrutas.....	39
4.3.2	Métodos para el diseño de microrutas.....	40
4.4	Investigación de operaciones.....	41
4.5	Programación lineal .....	42
4.5.1	El problema del agente viajero .....	42
4.5.1.1	Heurística del vecino más cercano.....	45
4.5.1.2	Heurística de la inserción más barata .....	45
4.5.1.3	Heurística como problema de asignación.....	45
4.5.1.4	Heurística Ramificación y Acotamiento .....	46
4.6	Aplicación al modelo de optimización de recolección de residuos sólidos.....	46
4.7	Literatura de optimización de recolección de residuos sólidos .....	47
4.7.1	Optimización en México.....	47
4.7.2	Optimización en Argentina.....	48
4.7.3	Optimización en España.....	48

## CAPÍTULO V. ESTUDIO DE CASO COLONIAS JUVENTINO ROSAS Y RAMOS MILLÁN DE LA DELEGACIÓN IZTACALCO.

5.1 Aspectos generales de la zona de estudio.....	51
5.2 Descripción del sistema actual.....	53
5.3 Propuesta para reorganizar la sectorización en la delegación Iztacalco.....	56
5.3.1 Número de vehículos recolectores para la operación.....	59
5.4 Propuesta del plan de ruta de los vehículos recolectores para la recolección de desechos en 2 colonias de la demarcación.....	60
5.4.1 Identificación de los datos del problema .....	61
5.4.2 Análisis de los datos del problema y resultados de las rutas de recolección.....	63

## CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 Conclusiones .....	71
6.2 Recomendaciones .....	72
ANEXO.....	73
Fuentes de consulta .....	78

# INTRODUCCIÓN

En la Ciudad de México se generan alrededor de 13 mil toneladas diarias de basura, cada habitante produce 1.4 kilogramos de desechos por día aproximadamente. Del total de basura generada en la Ciudad de México se estima que proviene de los hogares un 47.98%; de los comercios el 25.60%; de los servicios el 13.72%; de los controlados (hospitales, reclusorios, etc.) el 3.05% y de otras actividades (mercados, central de abastos, etc.) el 9.65%. De las 13 mil toneladas diarias de residuos que se generan, las plantas de tratamiento solo reciben 300 toneladas para fines de reciclaje. Es decir, solo se aprovecha el 2.3% del total de los residuos sólidos que se generan <sup>[13]</sup>.

Actualmente sólo el 43% de las ciudades medias del país realiza un diseño de rutas a través de un método técnico para llevar a cabo la recolección, por lo que solo el 27% de las ciudades disponen de rutas eficientes de recolección y un 73 % no son suficientes <sup>[4]</sup>.

Por lo anterior se puede observar que existe un número mayoritario de ciudades que no disponen de un diseño de rutas y que éstas son insuficientes, lo cual refleja que los municipios aparte de no contar con los suficientes recursos económicos, tampoco disponen de una buena planeación para ampliar su cobertura adecuadamente y con menores costos <sup>[4]</sup>.

Es por ello que nace la inquietud de desarrollar la siguiente investigación, para proponer un sistema de recolección de residuos sólidos en la Delegación Iztacalco, desde el punto de vista de la optimización con ayuda de uno de los modelos de la investigación de operaciones, en dos colonias de la delegación, esto es, porque solo se cuenta con un software libre que soporta pocas variables y no permite analizar toda la delegación Iztacalco, con ello generar ahorros en el sistema, por otro lado, proponer la sectorización, que los operadores de las unidades recolectoras y el personal del servicio de limpia de la delegación Iztacalco les llaman rutas, para la recolección de residuos sólidos.

Con esta sectorización se pretende tener zonas dentro de la delegación Iztacalco con el mismo número de habitantes para ser atendidos por el sistema de recolección de residuos sólidos con el objetivo de mitigar el número de tiraderos clandestinos, ya que esta problemática es debido a la falta de satisfacer toda la demanda que genera los habitantes de la demarcación, platicando con el jefe de servicio de limpia y algunos operadores de camiones del sistema de la delegación Iztacalco comenta que esas zonas se crearon con forme se fue generando la demanda, sin estudios técnicos previos para diseñar las rutas adecuadas y con ello satisfacer toda la demanda que generan los habitantes de la delegación Iztacalco.

# OBJETIVO GENERAL Y PARTICULARES

## OBJETIVO GENERAL.

Analizar el sistema actual de recolección de residuos sólidos domiciliarios en dos colonias de la delegación Iztacalco, y proponer un plan de ruta para reducir la distancia total de recorrido, que consiga un beneficio sustentable.

## OBJETIVOS PARTICULARES.

- a) Analizar el sistema actual de recolección de desechos, proponer una adecuada sectorización, y determinar la cantidad de vehículos necesarios para la recolección de desechos sólidos en la Delegación Iztacalco.
- b) Realizar una modelación matemática del plan de ruta de 2 colonias de la demarcación.
- c) Aplicar los métodos de programación lineal en específico el problema del agente viajero, para el diseño del plan de ruta de recolección de residuos sólidos dentro de 2 colonias.
- d) Proponer el sistema de recolección de residuos sólidos en 2 colonias de la delegación Iztacalco para aumentar la eficiencia del mismo.

## ALCANCES

- a) Mediante la propuesta de diseño del sistema en 2 colonias de la delegación Iztacalco, en la medida de lo posible minimizar los costos del sistema con ahorro en los tiempos y/o distancias de traslado.
- b) Que el sistema de recolección de residuos sólidos en 2 colonias de la delegación Iztacalco sea homogéneo y equitativo.

# JUSTIFICACIÓN

El problema de la basura es uno de los que derivan mayores consecuencias a la humanidad en distintos rubros a nivel mundial, el atacar este tipo de problema es de vital importancia y prioritario en las responsabilidades de los gobiernos municipales; la solución de éstos, depende de la aplicación de diversos conocimientos, los cuales se ven reflejados en importantes beneficios a la sociedad, la cual vive constantemente deficiencias en los distintos servicios municipales de los cuales es usuario permanentemente; estas deficiencias son en ocasiones un reflejo del mal diseño de los sistemas gubernamentales que se realizan sin un análisis adecuado, ya sea por la falta de conocimiento del personal asignado al sistema en cuestión o por el desconocimiento de las herramientas y metodologías que permiten diseñar y desarrollar sistemas <sup>[11]</sup>.

La recolección de los residuos sólidos, es un elemento costoso dentro del servicio, y tiene por objeto principal preservar la salud pública mediante la acción de transferir los residuos en todos los puntos de generación hasta el vehículo recolector, para posteriormente transportarlos al sitio de disposición final de una manera eficiente.

En el artículo 115 fracción II inciso c de la Constitución de los Estados Unidos Mexicanos menciona:

Los municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos siguientes: limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos <sup>[3]</sup>.

Por lo mencionado, se le ha asignado al estado la responsabilidad de limpieza de áreas públicas y el servicio de recolección de residuos sólidos generados en casas habitación. El Estado, aceptando esa responsabilidad, ha determinado quién realice esa tarea. Generalmente en casi todas las ciudades de México, es el mismo Estado quien ha realizado la operación de limpieza, mediante un organismo creado para tal efecto. Solamente, y hasta hace relativamente poco tiempo, algunos municipios han delegado esa tarea, más no la responsabilidad, a entidades no públicas y especializadas <sup>[15]</sup>.

La presente investigación es el desarrollo de una propuesta de optimización al sistema de recolección de residuos sólidos domiciliarios, utilizando uno de los modelos de la investigación de operaciones, con el objeto de que la delegación Iztacalco cuente con un precedente para implementar mejoras al sistema actual, y contar con estudios para dicha acción.

La investigación del presente trabajo se realizó en 2017-2018 donde el nombre de la demarcación territorial era Delegación Iztacalco, la presentación del trabajo fue en 2019 donde cambio de nombre a Alcandía Iztacalco.

# CAPÍTULO I

GENERALIDADES DEL  
SISTEMA DE RECOLECCIÓN  
DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA  
CIUDAD DE MÉXICO

En las últimas décadas, el acelerado crecimiento poblacional y el incremento del ingreso per cápita, tiene como resultado un cambio en el hábito de consumo, que junto con el proceso del desarrollo industrial, han aumentado la generación de residuos sólidos y por ende, haciendo que la logística de la recolección de residuos sea un problema complejo.

Los residuos sólidos, son un conjunto de materiales o productos que una vez que el consumidor los haya utilizado, son desechados, considerando que ha perdido el valor suficiente para retenerlos, y con ello, bajo el mejor escenario, son reaprovechados y/o reciclados.

La problemática se presenta principalmente en áreas de mayor población, donde la insuficiente capacidad para recolectar tiene como resultado, la aparición de tiraderos clandestinos, que se convierten en potenciales focos de infección en las ciudades.

La capacidad de los camiones, las distancias de recorrido, el crecimiento acelerado de los nuevos centros de población, aunado al mal diseño de las rutas, contribuye a que el servicio de recolección de residuos no cumpla con las expectativas esperadas.

En la mayoría de los casos, las rutas se diseñan de forma intuitiva, trayendo como consecuencia un incremento en el tiempo, en vez de ser creadas a partir de un estudio técnico: Por ello el consumo de combustible invertido en dicho proceso se vea incrementado. Las personas también contribuyen con este problema, al depositar en cualquier lugar los residuos, complicando los procesos de recolección y obligando a los camiones a detenerse por más tiempo en un lugar o bien, recorrer mayores distancias que las programadas en la ruta original del servicio <sup>[10]</sup>.

La recolección de residuos sólidos se concentra en tres grandes fuentes generadoras de residuos sólidos: domiciliarios, comercial e institucionales.

- Los residuos domiciliarios.- Son residuos producto de toda actividad doméstica, que son adecuados por su tamaño, para ser recogidos por los servicios convencionales. Según la definición anterior, no están contemplados entre los residuos domiciliarios los objetos que por sus dimensiones, peso o naturaleza, no puedan cargarse en los vehículos recolectores. Sin embargo, ha ocurrido que los objetos de desecho de mayor tamaño de origen doméstico son cada vez más numerosos, por el proceso de industrialización de los bienes y servicios consumidos. De este mismo modo, los residuos domiciliarios tienden a aumentar en volumen y la noción inicial de residuos domiciliarios se ha ido sustituyendo cada vez más por residuos urbanos. Estos comprenden, los residuos de pequeñas dimensiones, los objetos voluminosos de

origen doméstico y los residuos comerciales e industriales que por su naturaleza pueden considerarse parecidos a los domiciliarios.

- Los residuos comerciales.- Son los generados en las distintas actividades del comercio y distribución de bienes de consumo y de la prestación del servicio. Entre los que se encuentran los productos en mercados, tiendas de abarrotes, centros comerciales, etc.
- Los residuos institucionales.- Estos se generan en oficinas, escuelas, universidades, edificios públicos, museos, bibliotecas, iglesias, etc. Están compuestos principalmente de papel, colillas de cigarro, madera, plásticos y material ferroso<sup>[14]</sup>.

La recolección consiste en trasladar o transferir la basura desde su almacenamiento en la fuente generadora, hasta el vehículo recolector, para después transportarlo a un sitio de disposición final, como puede ser, estaciones de transferencia o instalaciones de tratamiento (planta de selección y composta).

A nivel nacional, se producen cada día más de 100 mil toneladas de basura doméstica, equivalente a cerca de 37 millones de toneladas anuales de residuos sólidos urbanos vertidos cada año en rellenos sanitarios<sup>[5]</sup>.

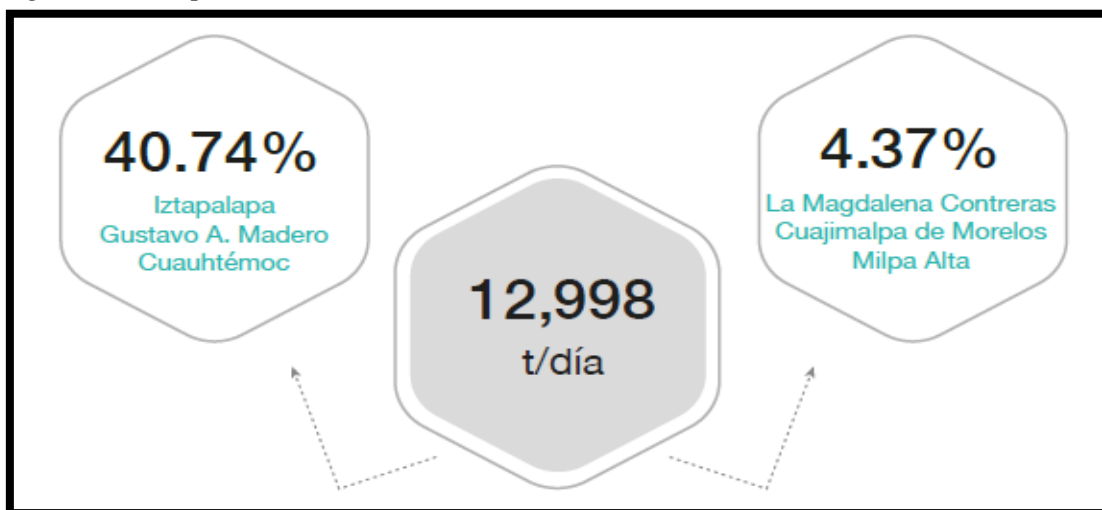
## **1.1 RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO**

### **1.1.1 Generación de residuos sólidos en la Ciudad de México.**

La demanda creciente de bienes y servicios en la Ciudad de México trae consigo, entre otras problemáticas, el incremento en la generación de residuos sólidos urbanos, los cuales se producen en casa habitación, establecimientos, espacios públicos o vía pública. El manejo inadecuado de estos puede llegar a producir impactos negativos en el ser humano y el medio ambiente. Durante 2017, los habitantes y la población flotante que diariamente ingresa a la Ciudad de México generaron 12,998 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos<sup>[13]</sup>.

Las delegaciones con mayor generación de residuos que en su conjunto representan el 40.74% fueron Iztapalapa, Gustavo A. Madero y Cuauhtémoc: 2,245, 1,735 y 1,316 toneladas diarias, respectivamente; mientras que Milpa Alta, Cuajimalpa de Morelos y La Magdalena Contreras aportaron en total 568 toneladas diarias, que es el 4.37%<sup>[13]</sup>.

Figura I.1. Proporción de residuos sólidos.



Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017.

### 1.1.2 Residuos sólidos por fuente generadora.

Para la adecuada gestión de los residuos sólidos y conocer sus características, se debe considerar, entre otros factores, a las fuentes generadoras.

- Domiciliarios: casas, departamentos y unidades habitacionales.
- Comercios: mercados y establecimientos mercantiles.
- Servicios: centros de espectáculos y recreación, restaurantes y bares, servicios públicos, hoteles, oficinas públicas y centros educativos.
- Controlados: unidades médicas, laboratorios, veterinarias, terminales terrestres, de transporte aéreo y centros de readaptación social.
- Diversos: residuos de manejo especial y los generados en áreas verdes.
- Central de abastos en la Ciudad de México (CEDA).

Figura I.2. Fuentes generadoras de residuos sólidos.



Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017.

La mayor fuente generadora en la Ciudad de México fue la domiciliaria que contribuye con un 47.98% de residuos generados, seguida de los comercios y servicios con un 25.60% 13.72%, respectivamente; mientras que en menor cantidad de aportación se encuentra las fuentes controlados con 3.05%.

### 1.1.3 Recolección selectiva

El servicio público de limpia de las delegaciones se encarga de realizar en días específicos la recepción selectiva de los residuos desde la fuente generadora, conforme lo establece la Norma Ambiental NADF-024-AMBT-2013, con el apoyo de vehículos bi-compartidos.

*Figura I.3. Vehículo recolector bi-compartido.*



*Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017.*

La NADF-024-AMBT-2013 permitió establecer los criterios bajo los cuales se realizaría la separación, recolección selectiva y valorización de los residuos, clasificándolos en cinco grupos: residuos biodegradables susceptibles de aprovechamiento; inorgánicos con potencial de reciclaje; inorgánicos de aprovechamiento limitado, residuos de manejo especial y residuos peligrosos.

*Figura I.4. Clasificación de los residuos sólidos.*



*Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017.*

La eficiencia promedio de recolección delegacional de residuos orgánicos durante 2017 tuvo un incremento del 13%, con respecto al año 2016, estos resultados reflejan el impacto positivo que tiene la aplicación de la NADF-024-AMBT-2013, debido a que su puesta en marcha incrementó la cantidad de residuos orgánicos que se separan desde la fuente generadora.

Las delegaciones Coyoacán y Milpa Alta, presentan una eficiencia alta en la recolección selectiva, con más de un 70%, mientras que Gustavo A. Madero y Álvaro Obregón tiene una eficiencia de 21 y 22%, respectivamente.

Figura I.5. Eficiencia en la separación de residuos sólidos.



Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017.

## 1.2 INFRAESTRUCTURA PARA EL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO

En los últimos años, los residuos sólidos se han convertido en un tema relevante en la Ciudad de México, debido a que su volumen y composición cambia a través del tiempo a causa del crecimiento poblacional y los hábitos de consumo. El manejo inadecuado de estos residuos puede originar impactos negativos en el ambiente y la salud humana.

En la Ciudad de México, el manejo de los residuos sólidos tiene fundamento en diversos instrumentos normativos y jurídicos, está la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos, la cual establece acciones normativas, operativas y de planeación, así como de monitoreo, supervisión y evaluación para el manejo de residuos, a fin de lograr beneficios ambientales en cada una de sus etapas del manejo, que son: generación, almacenamiento in situ, recolección, aprovechamiento y disposición final

La infraestructura con la que cuenta la Ciudad de México, para el manejo de los residuos es:

Figura I.6. Infraestructura para el manejo de residuos sólidos.



Fuente: *Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017*.

### 1.2.1 Estaciones de transferencia.

Las estaciones de transferencia son instalaciones intermedias entre las fuentes generadoras de residuos sólidos (casas, negocios, e industrias, entre otros) y sitios de aprovechamiento (plantas de selección, composta y los sitios de disposición final).

Estos espacios tienen como propósito permitir la descarga de los vehículos recolectores a unidades de gran tonelaje (tracto camiones), lo que permite incrementar la eficiencia global del sistema de recolección. Se transporta una mayor cantidad de residuos a un menor costo y tiempo, además de reducir el número de traslados y trayectos de los vehículos, lo que contribuye a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

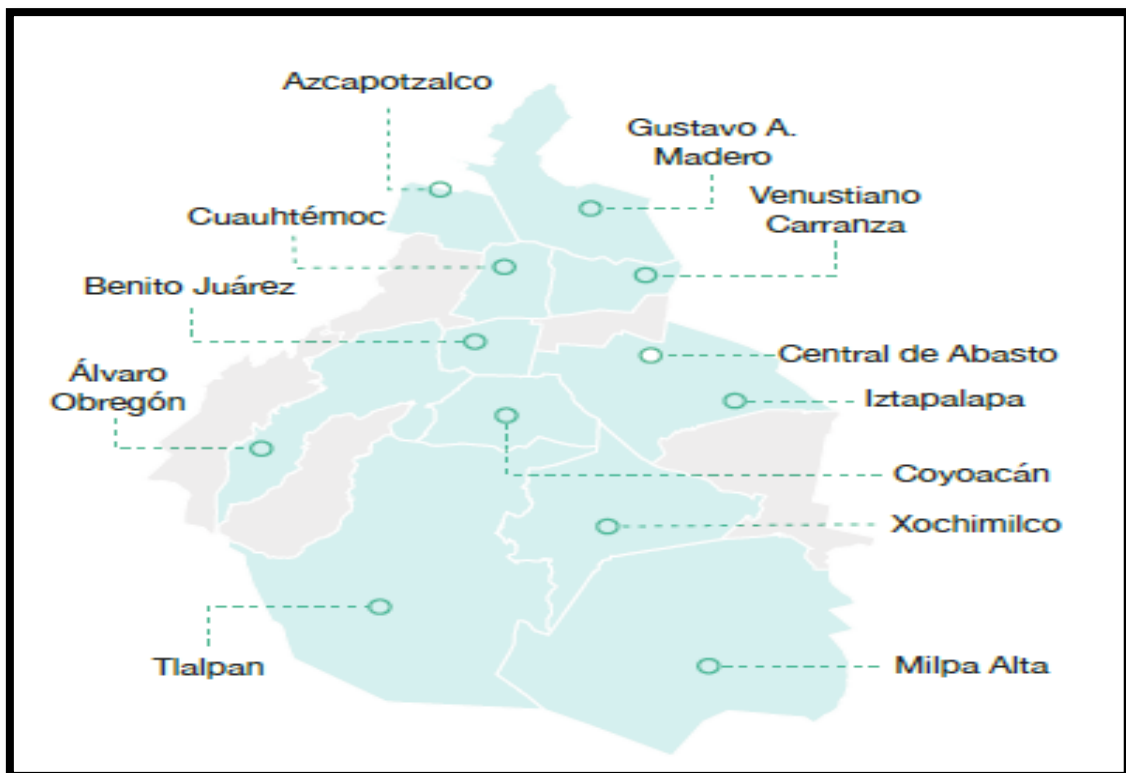
Figura I.7. Vehículo de gran tonelaje para el transporte de residuos.



Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017.

Actualmente la CDMX cuenta con 12 estaciones de transferencia distribuidas en 11 delegaciones.

Figura I.8. Localización geográfica de estaciones de transferencia.



Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017.

En el 2017 ingresaron diariamente a las estaciones de transferencia 8,176 toneladas de residuos sólidos, de los cuales 6,474 toneladas fueron recolectadas por las delegaciones, 1,082 por la Dirección General de Imagen, Alumbrado Público y Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (DGIARSU) adscrita a la Agencia de Gestión Urbana (AGU), 585 provienen de la Central de Abasto y 35 corresponden al servicio particular.

Figura I.9. Porcentaje de ingreso de residuos a las estaciones de transferencia.

Delegaciones	DGIARSU	Central de Abasto	Pago por derechos
79.18%	13.23%	7.16%	0.43%

Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017.

Los residuos orgánicos e inorgánicos son transportados de manera separada en los vehículos recolectores para su envío a plantas de composta o selección, respectivamente. En el caso de los residuos que ya no pueden ser sujetos a ningún tratamiento físico, químico o biológico para su aprovechamiento, estos se trasladan a sitios de disposición final.

Del total de residuos ingresados diariamente a las estaciones de transferencia durante el 2017, 4,801 toneladas se enviaron a disposición final, 1,374 a plantas de composta, 1,772 a plantas de selección y 229 a plantas compactadoras.

Figura I.10. Envío de residuos sólidos desde estaciones de transferencia.



Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017.

### 1.2.2 Plantas de selección.

Las plantas de selección son espacios donde se realiza la separación y clasificación de materiales que conservan sus características físicas y químicas para su valoración e incorporación a cadenas productivas. El material no recuperado o rechazado se transporta a los sitios de disposición final.

La Ciudad de México cuenta actualmente con dos plantas de selección de residuos urbanos:

- San Juan de Aragón: Fase I, Fase II y Patio
- Santa Catarina

Durante 2017, las plantas de selección recibieron 3,858 toneladas diarias de residuos, provenientes de:

*Figura I.11. Porcentaje de residuos ingresados a plantas de selección.*

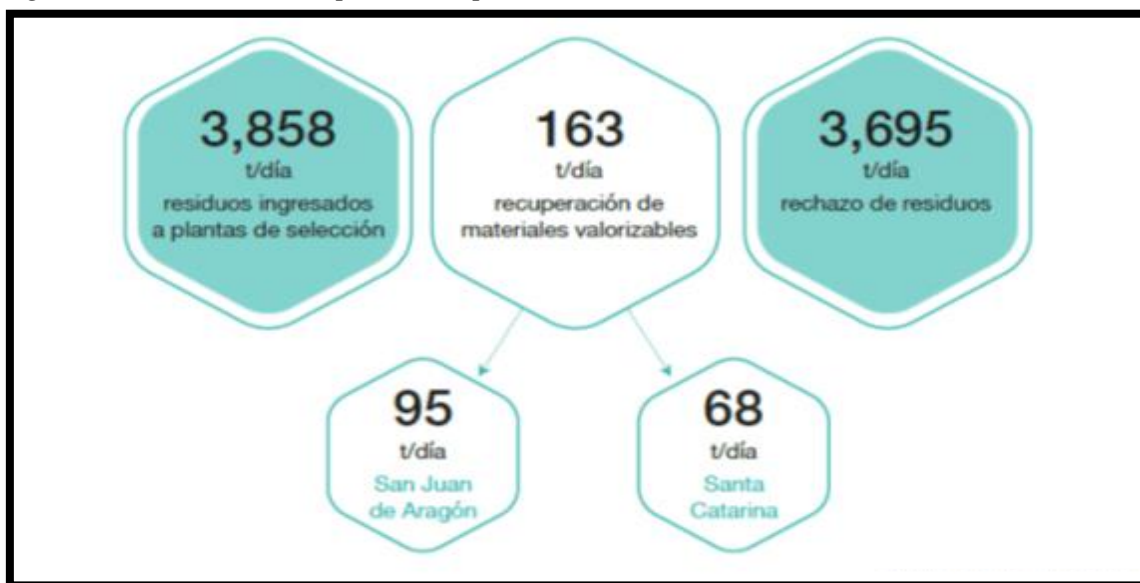


*Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017.*

De este total, 2,457 toneladas se enviaron a la planta de San Juan de Aragón y 1,401 a Santa Catarina.

En estas instalaciones se logró recuperar 4% de los materiales valorizables, principalmente cartón, papel, PET y vidrio, entre otros. El material no recuperado o rechazado se envió a sitios de disposición final.

Figura I.12. Material recuperado en plantas de selección.



Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017.

### 1.2.3 Plantas compactadoras.

Las instalaciones de compactación son espacios destinados a la formación de pacas de residuos sólidos urbanos para su aprovechamiento en la recuperación de energía alterna. Esto permite disminuir la cantidad que se envía a sitios de disposición final. Durante este proceso, se utiliza una combinación de maquinaria pesada para cribar, triturar, separar, clasificar, compactar y empacar los residuos, y así optimizar su manejo, transporte y requerimientos finales que ayudan a su correcta valorización energética.

Figura I.13. Instalación de plantas de compactación.



Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017.

En 2017, las plantas compactadoras recibieron 932 toneladas de residuos al día, de las cuales 74% se enviaron a la Central de Abasto etapa 1 y 2 y 26% a la planta de San Juan de Aragón.

Figura I.14. Residuos ingresados a plantas de compactación.



Fuente: *Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017*.

#### 1.2.4 Plantas de composta.

Los residuos orgánicos biodegradables son susceptibles de aprovechamiento y valorización, a través de procesos que permiten la obtención de subproductos que pueden reincorporarse a ciclos productivos, el principal subproducto es la composta, material que al ser procesado en condiciones óptimas posee excelentes propiedades mejoradoras del suelo.

El origen de estos residuos es diverso, desde casas, mercados, escuelas, establecimientos mercantiles y de servicios, hasta los derivados de la poda de árboles en parques y jardines de la Ciudad de México.

Estos residuos son entregados por el generador al servicio público de limpia en forma separada, quien los traslada a las estaciones de transferencia para ser enviados a plantas de composta para su aprovechamiento.

Figura I.15. Proceso para producción de composta.



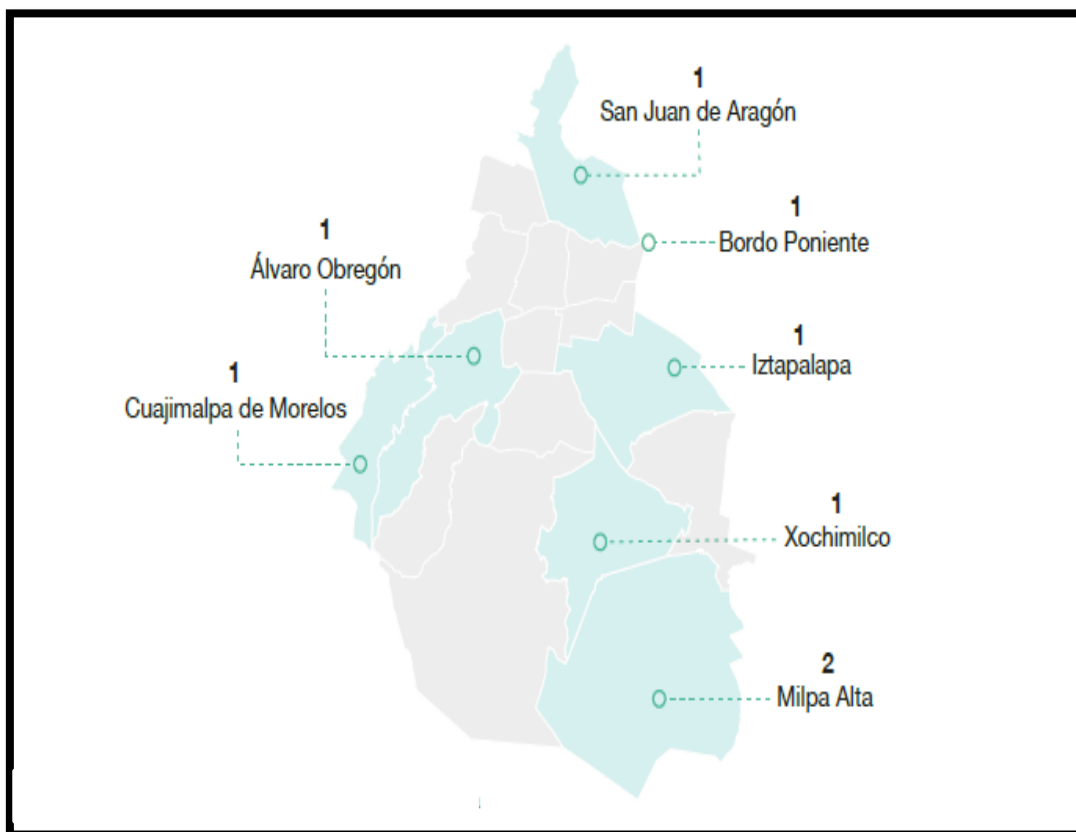
Fuente: *Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017*.

Capítulo I. Generalidades del sistema de recolección de residuos sólidos en la Ciudad de México.

La Ciudad de México cuenta con la planta de composta Bordo Poniente, que recibe 98% del total de residuos orgánicos, mientras que las siete plantas restantes ubicadas en puntos estratégicos de la ciudad reciben 2%. Las ocho plantas tienen una capacidad total de procesamiento anual de 923,996 toneladas.

En el siguiente mapa se ilustra la ubicación de las plantas de composta de la Ciudad de México.

*Figura I.16. Localización geográfica de plantas de composta.*



*Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017.*

Durante el 2017, los 281 trabajadores de las 8 plantas de composta recibieron 511,068 toneladas de residuos orgánicos, con las cuales se produjeron 99,803 toneladas de composta, de éstas, 6,356 se enviaron a las direcciones generales de limpia adscritas a las delegaciones para su distribución en parques, jardines, áreas verdes y de agricultura.

El compostaje es una de las tecnologías que permite reducir las emisiones de bióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub> eq). En 2017 se evitó la emisión de 480,825.20 toneladas de CO<sub>2</sub> eq a la atmósfera, esto contribuye al desarrollo de una ciudad con bajas emisiones de carbono.

### 1.2.5 Planta de termo valorización “El Sarape”.

Los residuos de aprovechamiento limitado, son todos aquellos que por sus características o componentes son de difícil reuso o reciclaje. Para el aprovechamiento de este tipo de residuos, el Gobierno de la Ciudad de México, en colaboración con la empresa Veolia, llevará a cabo la construcción y operación de la planta de termo valorización “El Sarape”; la primera en su tipo en América Latina.

Esta planta transformará 4,500 toneladas al día de residuos sólidos urbanos en energía, y producirá 965,000 Mega Watts de electricidad al año para alimentar al Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México. Se ubicará en Bordo Poniente y contempla la generación de tres mil empleos directos y 150 empleos al inicio de sus operaciones. Asimismo, con la tecnología usada, se dejarán de emitir 700,000 toneladas de CO<sub>2</sub> eq, con lo que se contribuye a la reducción de emisión de gases efecto invernadero.

Figura I.17. Capacidad instalada.



Fuente: *Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017*.

### 1.2.6 Sitios de disposición final.

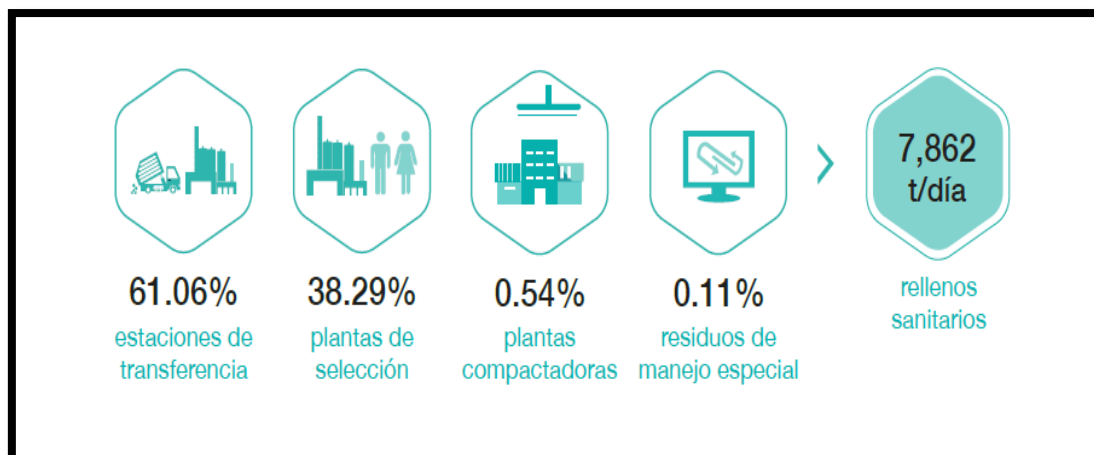
Los residuos que provienen de las estaciones de transferencia o que son rechazados de las plantas de selección o compactación y cuyas características los hacen de aprovechamiento limitado, son enviados a rellenos sanitarios; obras de infraestructuras diseñadas específicamente para disponer de manera definitiva y controlada dichos residuos. Con ello se logra la minimización del impacto negativo al medio ambiente, además de prevenir riesgos a la salud.

La selección, diseño, construcción y operación de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, requiere cumplir con diversas características técnicas, ambientales y sociales establecidas en la NOM-083-SEMARNAT-2003.

La Ciudad de México dispone diariamente 7,862 toneladas de residuos, en cinco rellenos sanitarios de estados vecinos (Estado de México y Morelos), que cumplen con estas especificaciones. “Milagro” es el que recibe una mayor cantidad de toneladas, 48%, mientras que “Chicoloapan” sólo recibe 1%.

Origen de los residuos que se envían a disposición final se ilustra a continuación:

Figura I.18. Residuos enviados a disposición final.



Fuente: *Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017*.

### 1.3 PROBLEMÁTICA DE LA RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO Y LA DELEGACIÓN IZTACALCO

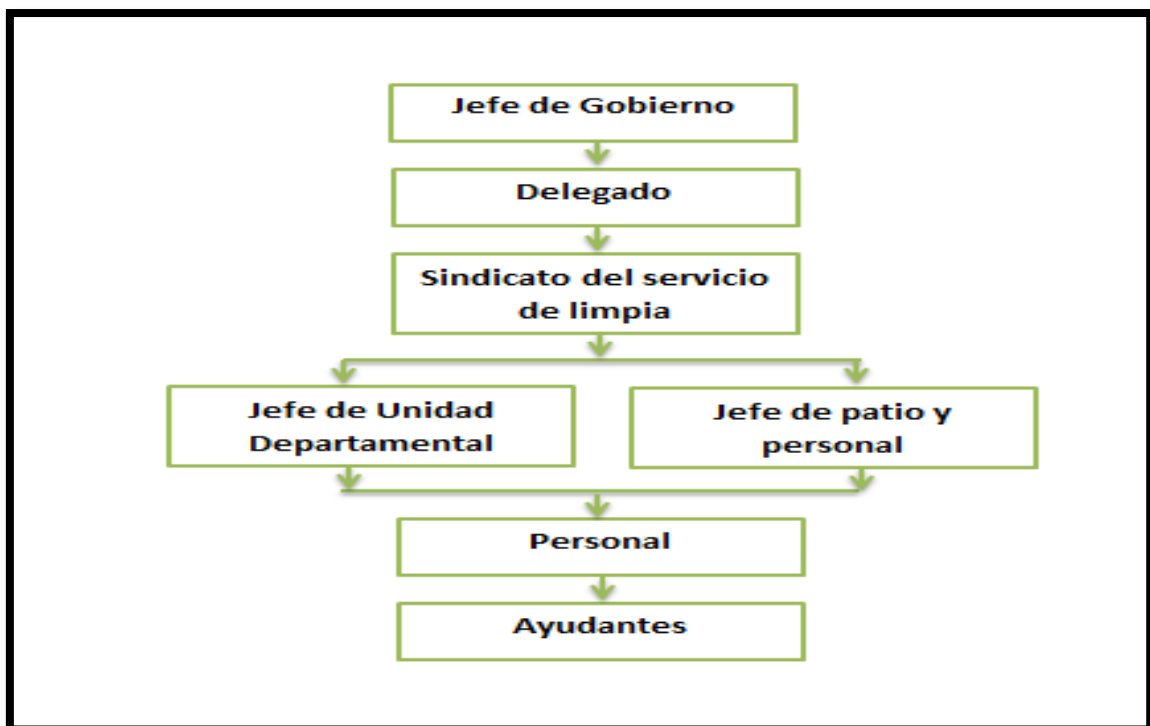
En la actualidad el servicio de recolección de residuos sólidos, visto de una forma muy general, se lleva a cabo de la siguiente manera, se realiza un recorrido por un grupo de tres a cinco personas, entre las que se pueden encontrar al chofer y de 2 a 4 ayudantes que se encargan del campaneo y la recolección. El inicio de las labores de recolección se da entre 6:00 y las 7:00 am, hora en que son despachados los camiones desde el encierro correspondiente. Una vez que el camión ha terminado su primer recorrido, incluyendo el viaje al sitio de disposición final o la estación de transferencia, y la descarga, inicia su segundo recorrido si es que se le ha asignado dos recorridos para ese mismo día. Lo anterior, viene implicado que durante un turno normal de ocho horas de trabajo, deban realizarse dos recorridos sin mayores complicaciones <sup>[17]</sup>.

Un problema del servicio de recolección de residuos sólidos dentro de la Ciudad de México incluyendo la delegación Iztacalco, es la falta de personal para realizar dicho proceso, esto se presenta por la falta de interés por parte de las autoridades de las distintas delegaciones políticas que conforman la Ciudad de México, lo mencionado por personal de patio de encierro de los camiones recolectores de la delegación Iztacalco es: que el servicio de recolección se da por la gran participación de los voluntarios o ayudantes que hay, que si no fuera por estas personas el servicio no funcionaría, este personal lleva años dentro del servicio sin que las delegaciones tengan la voluntad de contratarlos, y se repite en todas las delegaciones <sup>[17]</sup>.

Otro problema es la falta de mantenimiento de los camiones recolectores del servicio, comentan el personal que si hubo delegados que los apoyaron con insumos para un mantenimiento preventivo, pero que ya han dejado de dar esos apoyos, ahora lo que se hace es que con las propinas que reciben ese dinero se utiliza para comprar aceites y refacciones para el mantenimiento de los camiones, comenta también el personal que si llegara a presentarse la situación de aplicar mantenimiento correctivo para las unidades no sabrían como solventarlo ya que es más costoso <sup>[17]</sup>.

Para dimensionar los problemas que existen en la delegación Iztacalco, el siguiente organigrama que ilustra la figura I.19, muestra quien puede tomar decisiones en cuanto al sistema de recolección de residuos sólidos domiciliarios.

Figura I.19. Organigrama general del sistema.



Fuente: Elaborado a partir de datos de la Delegación Iztacalco (2017).

# CAPÍTULO II

## MÉTODOS Y FRECUENCIA DE RECOLECCIÓN

Para el diseño del sistema de recolección de residuos sólidos, una de las primeras decisiones que deben de considerarse, es el método a emplearse, el cual depende tanto de las características de la localidad como de los usos y costumbres de la población, así como de la zona en la que se realice la recolección, también incide en otras variables de recolección, como puede ser la selección de los vehículos recolectores, tamaño de la cuadrilla, etc.

Es importante destacar que el método con el cual se lleva a cabo la recolección de residuos, viene a resultar la parte medular del sistema mismo; ya que el nivel de organización que guarden los métodos de recolección de un determinado sistema, será el indicador más representativo del nivel de servicio con que se esté atendiendo a los usuarios de dicho sistema<sup>[15]</sup>.

Según la demanda del servicio y el grado de tecnificación de los equipos (mismo que se encuentra relacionado de manera directa con el nivel de servicio y, de forma inversa con la participación del usuario mismo en el cumplimiento del servicio), los métodos de recolección de residuos domiciliarios se clasifican como sigue:

- **Método de esquina o parada fija** (demanda discreta semimecanizada con alta participación del usuario).
- **Método de acera** (demanda continua semimecanizada con mediana participación del usuario).
- **Método intradomiciliario o de llevar y traer** (demanda semicontinua semimecanizada con baja o nula participación del usuario).
- **Método de contenedores** (demanda discreta mecanizada con alta participación del usuario )

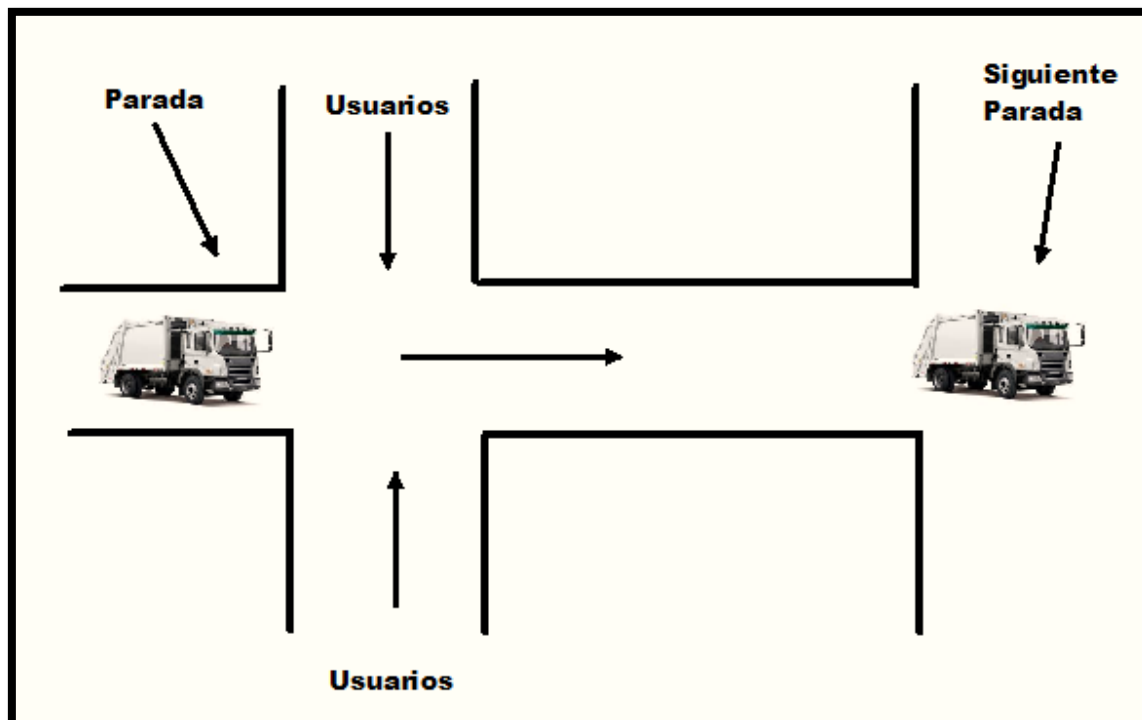
## 2.1 MÉTODO DE ESQUINA O PARADA FIJA

Es el método más económico y, es aquel mediante el cual los usuarios del sistema llevan sus recipientes hasta donde el vehículo recolector se estaciona para prestar el servicio.

Una vez que los usuarios han llegado hasta el vehículo, forma una fila para que un operador les tome el recipiente y, lo entregue a otro que se encuentra dentro de la carrocería del vehículo, el cual vacía su contenido y lo regresa al operario que se le entregó para que, a su vez, se lo devuelva al usuario, quien después de ser atendido se retira del vehículo. La operación anterior se repite tantas veces como sea necesario, hasta atender a todos los usuarios que lo hayan solicitado.

El método consiste en llevar el vehículo a ciertos puntos predeterminados y esperar a que los usuarios lleven los residuos en los horarios predeterminados.

Figura II.1. Método de esquina o parada fija.



Fuente: Elaboración Propia.

Ventajas:

- Mejora la imagen del servicio
- La recolección se realiza en menor tiempo
- Es el más económico, después del de contenedor

Desventajas:

- Utiliza más tiempo que el de contenedores
- Requiere mayor personal de recolección
- Requiere cierta participación de los usuarios

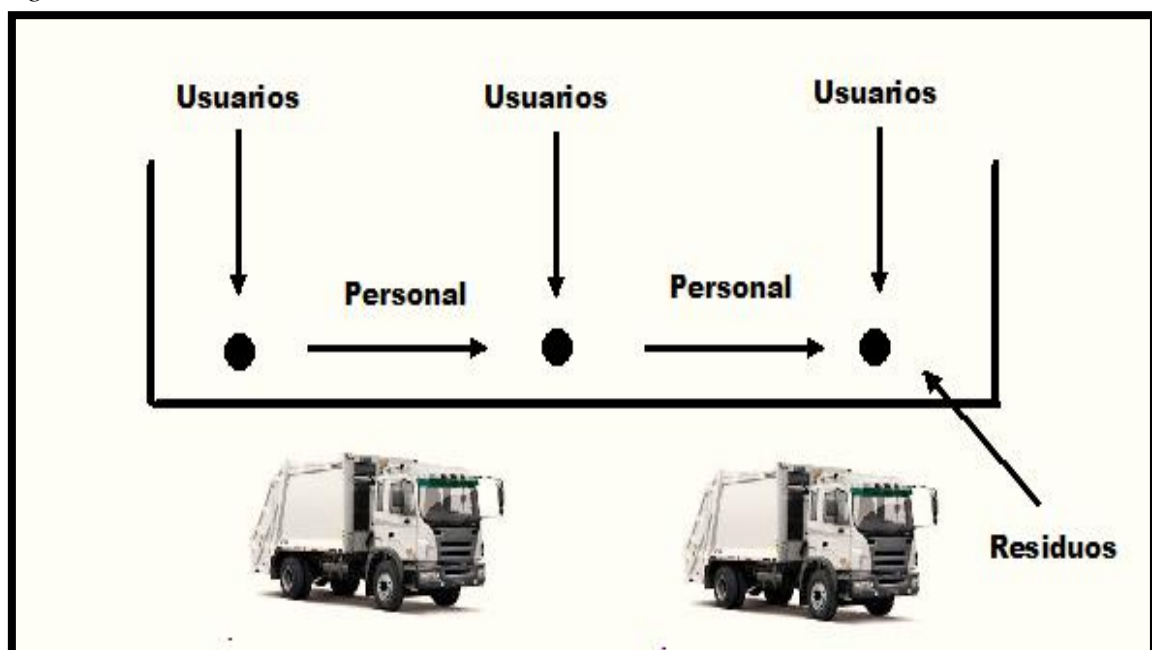
## 2.2 MÉTODO DE ACERA

En este método, el personal operario del vehículo recolector toma los recipientes con basura que sobre la acera han sido colocados por los usuarios del servicio, para después trasladarse hacia el vehículo recolector, con el fin de vaciar el contenido dentro de la tolva o sección de carga de dicho vehículo; regresándolos posteriormente al sitio de la acera de donde los tomaron, para que los usuarios atendidos los introduzcan ya vacíos a sus domicilios.

Para que se cumpla debidamente lo antes descrito, se requiere además de amplio civismo por parte de los usuarios del sistema, que el vehículo recolector transite a bajas velocidades en ambos sentidos de la calle; por consiguiente, es lógico pensar que este método tiene más posibilidades de ser implantado ordenadamente en aquellas zonas que cuentan con calles de doble sentido y, de preferencia, con camellones.

Este método, además de ser más costoso que el de esquina, presenta el inconveniente de que animales domésticos y no domésticos (perros, gatos, y ratas entre otros), pueden verse atraídos por recipientes con basura sobre la acera, pudiendo en un momento dado, dispersar sobre la misma al buscar alimento y dando por resultado que la recolección se lleve a cabo en forma más lenta y menos eficiente, ya que el personal en la mayoría de los casos no levanta la basura que queda en el piso. Para evitar o atenuar este inconveniente, suele recomendarse el uso de bolsas de polietileno herméticamente cerradas, así como el empleo de canastillas elevadas en las aceras donde se colocan los recipientes con los residuos; sin embargo, esto puede involucrar un costo adicional para los usuarios, que no siempre están dispuestos a cubrir.

Figura II.2. Método de acera.



Fuente: Elaboración Propia.

Ventajas:

- Mejora la percepción de calidad del servicio

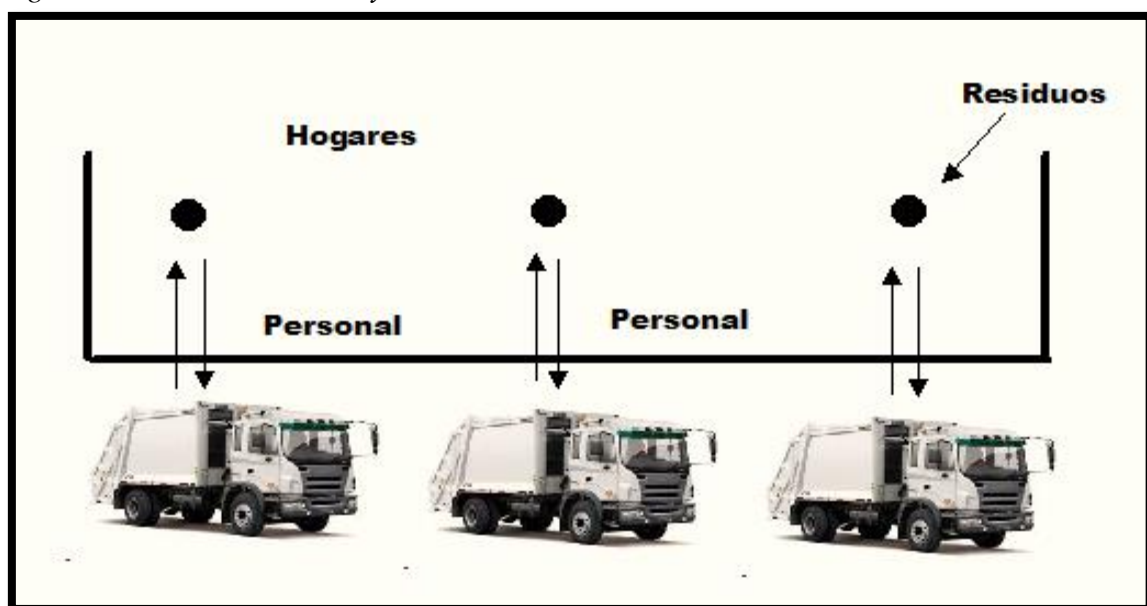
Desventajas:

- Requiere mayor tiempo de recolección
- Utiliza mayor cantidad de personal de recolección
- Requiere una mínima participación de los usuarios

### 2.3 MÉTODO “LLEVAR Y TRAER” O INTRADOMICILIARIO

Este método es semejante al anterior, con la variante de que los operarios del vehículo recolector, entran hasta las casas habitación por los recipientes con basura, regresando hasta el mismo sitio de donde los tomaron, una vez de haberlos vaciado dentro de la caja del vehículo. Normalmente, este método de recolección suele resultar más costoso que el de acera y aún más que el de esquina.

Figura II.3. Método “Llevar y Traer” o Intradomiciliario.



Fuente: Elaboración Propia.

Ventajas:

- Mejora la percepción de calidad del servicio

Desventajas:

- Requiere un elevado tiempo de recolección
- Utiliza mayor cantidad de personal de recolección
- No requiere participación de los usuarios

## **2.4 MÉTODO DE CONTENEDORES**

El método implica la existencia de equipos de abastecimiento temporal, se ubican en zonas de gran generación o de difícil acceso; como pueden ser hoteles, mercados, centros comerciales, hospitales, tiendas de autoservicio y zonas marginadas, entre otras.

La localización de los contenedores, deberá disponerse de tal manera que el vehículo recolector tenga un fácil acceso a ellos y que, además, pueda realizar maniobras sin problemas.

Este método consiste en la recolección directa en los establecimientos donde existen depósitos, como son mercados, fabricas, hoteles y hospitales.

Es importante señalar que esta forma de recolección requiere el empleo de camiones especiales, que vacíen mecánicamente los residuos de los contenedores. Por lo cual, este método solo se recomienda para aquellos municipios que tengan la capacidad financiera para adquirirla maquinaria necesaria.

Lo inconveniente de este método es que si no se realiza con la debida oportunidad puede ocasionar focos de contaminación, al mantener almacenadas grandes cantidades de residuos.

Ventajas

- Disminución de las frecuencias de recolección
- Opera con el mínimo de personal
- El recorrido se hace en el tiempo mínimo

Desventajas

- Requiere amplia participación de los usuarios
- Requiere inversión inicial para contenedores
- La recolección debe respetar los tiempos establecidos

## 2.5 FRECUENCIA DE RECOLECCIÓN

La prestación de servicio de recolección es una de las etapas más caras del sistema del manejo de basura y, una de las que presenta mayores oportunidades para reducir costos. Uno de los factores que más influyen sobre el sistema, es la frecuencia de recolección, la cual deberá prever que el volumen acumulado de basura no sea excesivo y que el tiempo transcurrido desde la generación de basura hasta la recolección para su disposición final no exceda el ciclo de reproducción de la mosca que varía, según el clima, de 7 a 10 días, tal y como se aprecia en la tabla 1.

### 2.5.1 Tiempo de incubación y crecimiento de la mosca.

*Tabla II.1. Días requeridos para el desarrollo de la mosca.*

Temperatura (°C)	Tiempo necesario para que se transforme	
	De huevo a pupa (días)	De huevo a adulta (días)
<b>Promedio de 20 °C</b>	10.1	20.5
<b>Promedio de 28 °C</b>	5.6	10.8
<b>Promedio de 35 °C</b>	5.6	8.9

*Fuente: Manual para el diseño de rutas de recolección de residuos sólidos municipales.*

La frecuencia de recolección de los residuos sólidos está en función del clima del lugar donde se realiza la producción de los residuos sólidos. En clima cálido se recomienda como mínimo una frecuencia de recolección de tres veces por semana. Dependiendo de la frecuencia de recolección de los residuos sólidos se tendrá una mayor o menor cantidad de residuos a recolectar, transportar y disponer.

En cuanto a la regularidad con la que se deben recolectar los residuos sólidos se presentan a continuación algunas alternativas:

### 2.5.2 Recolección diaria.

Es el sistema que se busca alcanzar en la mayoría de las ciudades medias y grandes. Los camiones recolectores deben recorrer la totalidad de las rutas diariamente, excepto los días domingos; por lo que los lunes, los residuos que se recolectan corresponden al periodo sábado-domingo. Para efectos prácticos, pueden decirse que los lunes se recolectan un 100% más de residuos, que el resto de los días de la semana.

Naturalmente, esta frecuencia es la que ofrece una mejor imagen del sistema hacia los usuarios pero, al mismo tiempo, es el que mayor costo involucra.

### 2.5.3 Recolección cada tercer día.

El camión recolector pasa un día sí y otro no, a excepto de los días domingos, por lo que equivale a pasar tres veces por semana.

Con este sistema se tienen las siguientes ventajas:

- Los camiones recolectores se llenan en un tiempo más corto y en un recorrido menor, es decir, el concepto de “costo por tonelada-kilómetro”, sería menor al compararla con la frecuencia diaria.

Para aclarar este concepto, se puede decir que cada camión recolector recorre cierta distancia cargando y recolectando los desechos de un solo día bajo el primer sistema; mientras que el mismo camión recorrerá la mitad de esa distancia al llegar a su capacidad, recolectando la basura de dos días.

- A mediano y largo plazo, los costos por concepto de mantenimiento serían menores, también por tonelada de basura transportada.
- El recolectar tres veces por semana implica, además, que la sobrecarga de la recolección debida al día domingo, no recaería únicamente en el siguiente día de recolección (día Lunes), sino que sería repartido en dos días (en este caso los días lunes y martes).

Es decir, en lugar de que el día lunes se recolecte el 100% más que el resto de días de la semana, esa diferencia sería de 50% más el día lunes y 50% más el día martes.

Sin embargo, el emplear esta alternativa en cuanto a frecuencia de recolección, acarrea las desventajas que se indican a continuación.

- Se crea cierta incomodidad a la comunidad servida, dado que los residuos podrían generar malos olores, requiriendo mayor limpieza en el interior de la vivienda.
- Teóricamente, la frecuencia de recolección propuesta por esta alternativa no implica una mayor proliferación de moscas, es un hecho que en el lugar que los habitantes servidos tengan para almacenar su basura generada, se verá un ligero incremento de tales insectos, debido a que los huevecillos que con anterioridad vienen ya en proceso de incubación.

La frecuencia más recomendable para la recolección de residuos sólidos es de tres veces por semana; esta alternativa es la más conveniente ya que representa un ahorro considerable en los costos de operación del sistema.

#### 2.5.4 Recolección dos veces por semana

El camión establece un horario de servicio en el que se eligen dos días a la semana cada dos y/o tres días.

Los conceptos indicados anteriormente, referentes al “costo por tonelada-kilómetro”, en teoría se abaten conforme se disminuye la frecuencia de recolección, ya que los camiones recolectores se llenarían cada vez más rápido y en un recorrido cada vez menor, por lo cual las dos primeras ventajas que se indican para la alternativa anterior, se hacen mayores conforme se disminuye la frecuencia.

Por otro lado, la sobrecarga que representa la recolección en seis días de la semana, se reparte en un mayor número de días, conforme se disminuya la frecuencia en la recolección.

Sin embargo, así como se incrementan esas ventajas, la disminución de la frecuencia agudiza también las desventajas que se mencionaron, creando una desventaja adicional: se crea la posibilidad de hacer que proliferen los tiraderos clandestinos, al incrementarse las incomodidades de los habitantes servidos [15].

# CAPÍTULO III

EQUIPOS DE RECOLECCIÓN Y  
TIPO DE ALMACENAMIENTO  
DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS  
EN MÉXICO

Con respecto a los equipos de recolección y transporte primario, se sugiere que, siempre que sea factible (por las características físicas y poblacionales de la localidad), se emplean vehículos con carrocerías de gran capacidad, provistos de compactadoras para abatir los costos de recolección.

Las carrocerías de volteo, aunque son preferidas por localidades con cierta tendencia rural, debido a su versatilidad y menor costo, no son adecuadas para la recolección y transporte de basura doméstica desde el punto de vista de salud pública, debido principalmente al hecho de ser descubiertas y carentes de sellos herméticos en el fondo, propician el esparcido de residuos y líquidos contenidos en la misma basura, a lo largo de sus recorridos dentro y fuera de sus rutas de operación <sup>[14]</sup>.

En términos generales, puede decirse que existen carrocerías para vehículos recolectores de carga lateral, trasera y frontal. Estas últimas se usan exclusivamente para la carga mecánica de contenedores, mediante un dispositivo consistente en un par de brazos, que ensamblan con el contenedor, elevándolo y vaciándolo por la parte superior de la caja compactadora.

Los vehículos dotados de carrocerías de carga trasera de dos ejes, son muy eficientes, pues la recolección se efectúa en forma más cómoda y menos fatigosa para el personal operativo debido a su altura de carga no mayor de 1.20 m. Además, permiten por lo general prescindir de un operario y así, reducir la tripulación del vehículo y los costos de operación.

Ahora bien, debe dejarse bien asentado que no siempre es adecuado el uso de vehículos especializados para la recolección de los residuos sólidos, ya que no en todos los casos la traza urbana brinda las facilidades de acceso, penetración, maniobrabilidad y pendiente, requeridas para la utilización y máximo aprovechamiento de tales vehículos. En muchos casos la utilización de unidades de las consideradas como “no convencionales”, pueden dar mejores resultados tanto en costo como en rendimiento y eficiencia, que los obtenidos con el uso de unidades recolectoras especializadas.

Al respecto de lo mencionado en el párrafo anterior, debe entenderse como “unidad no convencional de recolección”, todo aquel vehículo utilizado para la prestación de este servicio, en sustitución de cualquier equipo de recolección considerado como especializado. De esta manera, desde un carretón movido por tracción animal, hasta un vehículo tipo volteo, pueden constituir una unidad de recolección no convencional. Normalmente, este tipo de unidades se utilizan en zonas sin caminos de penetración, o bien en todas aquellas de difícil acceso.

Con base en todo lo anterior, los equipos de recolección pueden ser clasificados de acuerdo con el siguiente criterio:

- Equipos recolectores altamente especializados o tecnificados: Son aquellos que por adaptación o por diseño original, están capacitados para realizar maniobras de carga y descarga de contenedores.
- Equipos especializados: Son aquellos que están diseñados para la prestación del servicio de recolección de residuos sólidos con cierta comodidad, como lo son los vehículos compactadores de carga trasera y lateral; y algunos otros de carga lateral sin mecanismo de compactación pero con placa compactadora de basura.
- Equipos no convencionales: Será cualquier vehículo utilizado para la prestación del servicio en cuestión que no presente las características mencionadas para los equipos especializados y de alta tecnificación. Atendiendo a la clasificación antes descrita se presenta una descripción de los equipos de recolección de residuos sólidos comúnmente usados en el medio mexicano.

### **3.1 EQUIPOS DE RECOLECCIÓN ALTAMENTE ESPECIALIZADOS**

Estos equipos están diseñados para atender la demanda del servicio, exclusivamente a través de la utilización de contenedores. Son equipos altamente tecnificados donde la variante radica casi exclusivamente en cuanto al mecanismo empleado para la carga y descarga de contenedores, cuya capacidad normalmente es alta. (De 6m<sup>3</sup> hasta 24m<sup>3</sup>).

Cuando se usan adecuadamente, su eficiencia de recolección es alta. Estos sistemas no son recomendables para la recolección domiciliaria con métodos tradicionales, solo cuando se cuenta con un acceso adecuado y/o en zonas de gran generación. Su utilización también es recomendable en mercados, hospitales, tiendas de autoservicio, multifamiliares de gran tamaño, industrias, etc.

*Figura III.1. Vehículo recolector altamente tecnificado.*



*Fuente: Recuperado de <https://www.aseca.com/maquinaria/recolectores>.*

### 3.2 EQUIPOS ESPECIALIZADOS

- Vehículos compactadores de carga lateral.

Pueden ser de caja cuadrada o cilíndrica con mecanismo de compactación. La carga de residuos se hace lateralmente. Su capacidad de carga varía normalmente de 10 a 16 m<sup>3</sup>, pudiendo en algunos casos ser más elevada. Su principal ventaja es que cuenta con un mecanismo sencillo de compactación, además de que se le puede adaptar un mecanismo para la carga y descarga de contenedores.

*Figura III.2. Vehículo compactador de carga lateral.*



*Fuente: Recuperado de <http://www.carroceriasrepsa.com/productos/recolectores.html>*

- Vehículo compactador de carga trasera.

En este tipo de vehículos la carga de residuos se hace a través de una tolva que se encuentra ubicada en la parte posterior de la carrocería, son de 10 a 20 m<sup>3</sup> de capacidad, con equipo opcional para carga de contenedores. Sus principales ventajas son que la altura de carga es baja, que los operarios no

tienen acceso a la basura para "pepenarla" una vez que el mecanismo compactador de carga se ha hecho funcionar, y que puede atender contenedores pequeños en su ruta de recolección.

*Figura III.3. Vehículo compactador de carga trasera.*



*Fuente: Recuperado de <https://www.aseca.com/maquinaria/recolectores>.*

### **3.3 EQUIPOS NO CONVENCIONALES**

- Vehículos de volteo y de redilas.

Estos vehículos ocasionalmente se emplean para cumplir con el servicio de recolección de basura, a falta de equipos más tecnificados o debido a que se adaptan más las características de la localidad por servir y al tipo de actividades y servicios que en general se brinda a la comunidad. Su capacidad puede variar desde 6 hasta 12 m<sup>3</sup>, aunque los más usuales son de 6 y 7 m<sup>3</sup>.

Se estima que un vehículo de 6 m<sup>3</sup> de capacidad, puede atender hasta 6,000 hab/día en promedio, sobre todo en localidades eminentemente rurales. Su principal desventaja, es la elevada altura de carga, lo que obliga a contar con un empleado adicional que viaje dentro de la caja para ayudar a cumplir con la función de carga de residuos.

- Vehículos tipo volteo de gran capacidad.

Estos vehículos con mecanismos de descarga tipo volteo, cuentan en la mayoría de los casos con puertas laterales para facilitar la carga dentro de la carrocería del vehículo así como con extensiones para alimentar su capacidad volumétrica y aprovechar la gran capacidad de soporte de carga del chasis. Las principales ventajas son: su bajo costo comparado con un camión más tecnificado, que la descarga por volteo en ocasiones es mucho más rápida que cuando se tienen cajas fijas. Las desventajas obvias son las siguientes: la altura de carga es muy elevada, el acomodo de la basura dentro de la caja es manual, se requiere de un empleado adicional en la cuadrilla de trabajo. Así mismo, al adicionarle a la caja volumen hacia arriba, se eleva el centro de gravedad por encima de las especificaciones de diseño.

*Figura III.4. Vehículo volteo gran capacidad.*



*Fuente: Recuperado de <https://www.aseca.com/maquinaria/recolectores>.*

- Tractor Agrícola y Remolque

Tractor agrícola con cargador frontal y remolque de 6 m<sup>3</sup>. En pequeñas localidades el tractor puede servir como recolector y al mismo tiempo como una máquina que en el relleno sanitario realice las principales tareas de acomodar la basura y cubrirla, ya que la única función que no puede cumplir es la de excavar. El remolque tiene un sistema de volteo hidráulico.

*Figura III.5. Tractor agrícola con cargador frontal y remolque.*



*Fuente: Recuperado de <https://www.aseca.com/maquinaria/recolectores>.*

### **3.4 TIPO DE ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS.**

El almacenamiento de residuos sólidos se divide de forma general en dos tipos: almacenamiento domiciliario y almacenamiento no domiciliario.

#### **3.4.1 Almacenamiento domiciliario.**

Este tipo de almacenamiento es el que se efectúa en las viviendas o también conocidas como casa habitación, sean estas unifamiliares o edificios multifamiliares.

Con respecto al almacenamiento éste se efectúa en la mayoría de los casos, bajo condiciones inadecuadas; en primer lugar los recipientes varían, ya que se emplean desde bolsas de papel, plástico y cajas de cartón, hasta botes de lámina, madera o plástico, los cuales en ocasiones no son los suficientemente resistentes para contener la basura o no son los idóneos para poder ser manejados por el personal de recolección.

En cuanto a su ubicación, muchas veces no existe suficiente espacio en la casa y normalmente se localizan en la cocina la cual puede atraer la proliferación de insectos o roedores si no disponen de una cubierta o tapa. También al no almacenar los residuos en orgánicos e inorgánicos, hace que se dificulte el rescate posterior de material reciclable.

Por tanto, es importante orientar a la población para que utilice recipientes adecuados, que mantengan la higiene mientras los residuos son recolectados, procurando un almacenamiento por más de un día y además promover prácticas de separación y reciclaje doméstico de los desechos.

#### **3.4.2 Almacenamiento no domiciliario.**

El almacenamiento no domiciliario es aquel que se realiza en las diversas fuentes generadoras como:

##### **3.4.2.1 Comercial.**

Este tipo de almacenamiento comprende el que se lleva a cabo en los mercados, tiendas de abarrotes, restaurantes y hoteles. Es muy común el uso de tambos de 200 litros adaptados para el almacenamiento, aunque también se utilizan contenedores con capacidades que varían de 1 a 6 m<sup>3</sup>.

##### **3.4.2.2 Industrial.**

Las industrias generan una gran cantidad de residuos sólidos, algunos de los cuales representan un riesgo para el ambiente y la salud humana. Por ello, es necesario que el almacenamiento externo en las industrias tome en cuenta el origen de cada residuo que se almacena.

Esto es, los residuos no peligrosos que se generan en oficinas, comedores, vestidores, etc. deberán almacenarse separadamente de los residuos generados en algún proceso industrial.

Para el almacenamiento externo en las industrias se recomienda el uso de contenedores, tolvas de almacenaje y también tambos metálicos. Los contenedores se usan principalmente para almacenar los residuos no peligrosos provenientes de los lugares ya mencionados <sup>[14]</sup>.

#### 3.4.2.3 Hospitalario.

Los hospitales generan una diversidad de residuos que es conveniente manejarlos en dos grupos: los residuos no contaminados y los residuos clínicos o contaminados. Los residuos no contaminados se generan por diversas actividades como las de aseo general y las de preparación de alimentos. Los residuos clínicos o contaminados son los generados en los laboratorios, salas de hospitalización, quirófanos, salas de curación, servicio de emergencia, eventualmente los de la consulta externa y medicamentos caducos <sup>[14]</sup>.

La Norma Mexicana NOM-087-ECOL-SSA1-2002 establece los lineamientos para la separación, envasado almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos biológicos infecciosos que se generan en establecimientos que prestan atención médica.

La Norma tiene como objetivo que el personal médico y de apoyo este más seguro al realizar sus actividades y así evitar accidentes o contaminación derivada del mal manejo de los residuos peligrosos biológicos infecciosos, ya que un factor determinante para la contaminación ambiental o del personal es el manejo inadecuado de los residuos, sin embargo esta Norma se aplica más allá de solo los establecimientos médicos, ya que cualquier industria puede generar este tipo de residuos, como laboratorios de investigación, la industria alimenticia, etc.

La Norma indica que los residuos peligroso bilógicos infecciosos, son aquellos materiales generados durante los servicios de atención médica que contengan agentes biológicos infecciosos y que puedan causar efectos nocivos a la salud o medio ambiente, estos son:

- Residuos de sangre.
- Cultivos y cepas almacenadas.
- Residuos patológicos.
- Residuos no anatómicos derivados de la atención a pacientes.
- Residuos de objetos punzocortantes.

# CAPÍTULO IV

RUTAS DE RECOLECCIÓN DE  
RESIDUOS SÓLIDOS  
DOMICILIARIOS.

Una fase importante del sistema de recolección de residuos sólidos, son los recorridos específicos que deben realizar diariamente los vehículos recolectores en las zonas de la localidad, donde han sido asignadas con el fin de recolectar en la mejor forma posible los residuos generados por los habitantes de dicho sector.

En el medio mexicano tradicionalmente, el sistema más usado para el diseño de rutas de recolección de los residuos sólidos urbanos ha sido con base en juicio y experiencia del jefe de limpia, o bien de los choferes de los vehículos recolectores. Obviamente que el criterio y experiencia tanto del jefe de limpia como de los choferes, no es siempre el mejor, por lo cual la mayoría de las rutas de recolección diseñadas por ellos dejan mucho que desear en cuanto a aspectos de operación y funcionamiento. Un mal diseño de rutas de recolección, trae como consecuencia, graves daños al sistema de recolección, entre los que se pueden citar los siguientes <sup>[10]</sup>:

- Deficiente operación y funcionamiento del equipo.
- Desperdicio de personal.
- Reducción de las coberturas del servicio de limpia.
- Y la proliferación de tiraderos clandestinos a cielo abierto en diferentes puntos de la ciudad <sup>[10]</sup>.

Así, para adoptar las diferentes decisiones previas para el mejoramiento de las rutas de recolección de residuos sólidos, es indispensable informar adecuadamente al público de las razones que hay para hacerlo y llegar a obtener su colaboración.

Los argumentos tienen que establecer razones sanitarias y de reducción de costos. Aun cuando existen subsidios estatales para el servicio de recolección, el público también está pagando los costos innecesarios, en tal caso en forma indirecta.

Por cual, sin una adecuada cultura cívica de los usuarios, la posibilidad de éxito de las rutas que se diseñen se reduce.

#### **4.1 REGLAS BÁSICAS PARA EL DISEÑO DE RUTAS <sup>[10]</sup>.**

- a) El diseño de rutas trata de aumentar la distancia productiva en relación a la distancia total.
- b) Los recorridos no deben fragmentarse ni traslaparse. Cada uno debe consistir en tramos que queden dentro de la misma área de la ciudad o localidad en estudio.
- c) El inicio de una ruta debe estar cerca del garaje y el final cerca del lugar de disposición final de residuos sólidos.

- d) En lugares con pendientes fuertes o desniveles altos, debe procurarse hacer el recorrido de la parte alta a la parte baja. Si se presentan sinuosidades que hay que bajar y luego subir, hay que procurar atenderlas al comienzo del viaje, cuando el vehículo recolector va con poca carga.
- e) Tratar de recolectar simultáneamente a ambos lados de la calle. Sin embargo, ello no es recomendable en avenidas muy anchas o con mucho tránsito.
- f) Se debe respetar el sentido de circulación y la prohibición de ciertas vueltas.
- g) Evitar los giros a la izquierda y las vueltas en U, porque hacen perder tiempo, son peligrosos y obstaculizan el tránsito.
- h) Las calles con mucho tránsito deben recorrerse en las horas en que este disminuye.
- i) Cuando hay estacionamientos de vehículos, hay que procurar efectuar la recolección en los momentos que la calle está más despejada.
- j) En las calles muy cortas o sin salida, es preferible que los vehículos recolectores no entren en ellas, sino que esperen en la esquina y que el personal vaya a buscar los depósitos con los residuos, o en su caso el público lo deposite en la esquina más cercana a la ruta de recolección. Esto reduce el tiempo de recolección considerablemente.
- k) Cuando la recolección se hace simultáneamente a ambos lados de la calle, deben hacerse recorridos largos y rectos, con pocas vueltas.
- l) Cuando la recolección se hace primero por un lado de la calle y después por el otro, generalmente es mejor tener recorridos con muchas vueltas a la derecha alrededor de manzanas.
- m) Es preciso reconocer muy bien las características propias de las zonas que se realizara la actividad de recolección, para que las rutas de los camiones recolectores no causen muchos problemas e inconvenientes propias del servicio.

A continuación se presentan los conceptos y métodos relacionados para realizar acabo el presente trabajo de investigación.

## **4.2 MACRORUTAS**

Se denomina macrorutas a la división de la ciudad en sectores operativos, a la determinación del número de camiones necesarios en cada una y a la asignación de un área del sector en cada vehículo recolector<sup>[15]</sup>.

Fundamentalmente se trata de determinar el tamaño de cada una de las rutas en forma tal que la cantidad de trabajo diario que realiza una cuadrilla sea similar a la de cualquier otra, con el máximo de utilización de los recursos.

El tamaño de cada una de las rutas, generalmente se determina en función del número de manzanas o kilómetros de vías a servir.

En forma general, se puede decir que el diseño de las macrorutas se puede llevar a cabo de la siguiente manera:

#### 4.2.1 Determinación de macroruta o sectorización.

- Tamaño de los sectores (por cantidad de población)

La sectorización consiste en dividir la ciudad en sectores operativos, de manera que cada uno tenga los vehículos de recolección requeridos, para que cada sector sea servido por un vehículo recolector durante la semana.

Un diseño preliminar de macrorutas se puede hacer partiendo de la población **P** de una zona de la ciudad, de la generación de residuos sólidos per cápita en [kg/hab/día] **B**, y de la frecuencia de servicio **F**, [expresado en día por semana]. El número de días que transcurre entre dos recolecciones será **6/F**, si no se considera por el momento lo que ocurre los días domingo y que trabaja seis días por semana. Resulta:

Producción de basura  
por día en la zona elegida  $= P \times B \dots\dots\dots (1)$

Cantidad de basura que se debe  
recoger los días en que corresponde  
dar servicio  $= P \times B \times (6/F) \dots\dots\dots (2)$

Si el camión hace **N** viajes por turno y su capacidad en kg es **C**, se tiene que

Cantidad de basura  
que puede recoger el  
camión  $= N \times C \dots\dots\dots (3)$

Por supuesto, debe ser:

$$P \times B \times (6/F) = N \times C \dots\dots\dots (4)$$

Normalmente la capacidad de los vehículos recolectores se expresa en [m<sup>3</sup>] (**V**), pero conociendo el peso específico (**e**) en [kg/m<sup>3</sup>] de la basura suelta y el grado de compactación (**g**) que se puede esperar en el recolector, resulta sencillo determinar su capacidad en [kg]:

$$C = V \times e \times g \dots\dots\dots (5)$$

A veces no se conocen ni **e** ni **g**, pero sí el peso específico de la basura compactada en el camión que es igual a **e x g**

Se eligen **V** y **g**, podemos calcular **C**, y determinar la población que puede atender el camión. De esta manera se establece el tamaño de la zona.

Para explicar lo anterior, se desarrollará el siguiente ejemplo:

Capacidad del camión elegido:  $V = 12m^3$

Grado de compactación:  $g = 2$

Peso específico de la basura suelta:  $e = 250kg/m^3$

Generación de basura:  $B = 0.5 \text{ kg/habitante/día}$

Frecuencia de la recolección:  $F = 2$  veces por semana

Número de viajes por turno:  $N = 2$

Sustituyendo en la ecuación 5:  $C = V \times e \times g$

$$C = 12m^3 \times 250kg/m^3 \times 2 = 6,000 \text{ kg}$$

De la ecuación 4:  $P \times B \times (6/F) = N \times C$

$$P \times 0.5 \text{ kg/hab/día} \times (6/2) = 2 \times 6,000 \text{ kg}$$

$$P = 8,000 \text{ hab/día}$$

#### 4.2.2 Determinación de los límites de los sectores.

Una vez determinado el tamaño de los sectores en función de la cantidad de población, se deben determinar los límites espaciales de los mismos, utilizando el mapa de la ciudad. La regla común para la determinación de los límites consiste en utilizar, dentro de lo posible, las vías y las barreras topográficas tales como ríos y lagos, con el propósito de evitar pérdidas de tiempo en cruzarlos. Así, esta regla facilitará la identificación de los sectores a los choferes de vehículos recolectores.

#### 4.2.3 Número de vehículos necesarios.

Llamando **B** la producción diaria de basura de la ciudad [en kg], **C** la capacidad de cada vehículo recolector y **N** el número de viajes por turno, la cantidad teórica de vehículos necesarios **K<sub>1</sub>** para recoger todos los desechos trabajando un solo turno será:

$$K_1 = \frac{B}{N \times C} \dots\dots\dots(6)$$

Si se trabaja dos turnos, se requieren  $K_2$  vehículos, siendo:

$$K_2 = \frac{B}{2 \times N \times C} \dots\dots\dots (7)$$

Sin embargo, es necesario incrementar los valores calculados aproximadamente en un 10% a 15%, porque es posible alcanzar una eficiencia completa y que todos los vehículos lleguen a su plena capacidad.

Por otra parte, hay que agregar otro 10% a 20% para mantener una reserva de vehículos para efectuar su mantenimiento preventivo y asegurar que nunca deje de prestarse el servicio a toda la población. Con vehículos en buen estado, puede ser suficiente una reserva de 10%, pero en caso contrario debe de aumentarse al 20%.

Tomando en cuenta estos dos factores, se puede estimar que con uno o dos turnos respectivamente se necesitan:

$$K_1 = 1.32 \times \frac{B}{N \times C} \dots\dots\dots (8)$$

$$K_2 = 1.32 \times \frac{B}{2 \times N \times C} \dots\dots\dots (9)$$

### 4.3 MICRORUTAS

Se denomina microrutas, al recorrido específico que deben realizar diariamente los vehículos recolectores de residuos sólidos, en los sectores donde han sido asignados previamente <sup>[10]</sup>.

Es el diseño de rutas y consiste en desarrollar una ruta de recorrido dentro de cada sector, de manera que permita a cada camión recolector llevar a cabo el trabajo de recolección de residuos sólidos con una menor cantidad de tiempo y distancia recorrida.

#### 4.3.1 Datos necesarios para las microrutas

Para llevar a cabo el diseño de las microrutas dentro de cada sector se requiere de los siguientes datos <sup>[15]</sup>:

- A. Lugar de encierro de los camiones (patio de resguardo).
- B. Lugar de disposición final de los residuos sólidos.
- C. Sentidos de circulación de las vías (calles, ejes, vías de acceso controlado, etc.).
- D. Hora de mayor cantidad de tránsito y situación de la saturación de las vías.
- E. Vías reversibles y no reversibles.
- F. Método de recolección de residuos sólidos.
- G. Equipos de recolección de residuos sólidos.

#### 4.3.2 Métodos para el diseño de microrutas.

En forma general se puede decir que los métodos determinísticos son los más recomendables para el diseño de microrutas, ya que en ellos se pueden involucrar todos los parámetros que inciden en el diseño de las rutas de recolección de residuos sólidos <sup>[15]</sup>.

Además de que con estos métodos se aproximan a obtener rutas óptimas de recolección de residuos sólidos, es decir, rutas en las que a costos y tiempos mínimos se recolectan la máxima cantidad de residuos sólidos posibles.

Ahora bien, dos de los más importantes métodos determinísticos son los siguientes:

- El problema del Agente Viajero, utilizado para diseñar rutas con el método de recolección de parada fija y el de contenedor.
- El problema del Cartero Chino, utilizado en el método de recolección por acera y el intradomiciliario <sup>[15]</sup>.

Utilizando estos métodos mencionados, además se puede observar la eficiencia de cobertura, tiempos de traslado, tiempos muertos y cualquier otra información que sea útil. Conjuntamente con una adecuada combinación de intuición, buen juicio para encontrar soluciones y apoyo tecnológico y financiero se puede lograr reducir los costos de recolección aún ante una extensión del servicio <sup>[15]</sup>.

Un sistema de rutas bien diseñado, trae como consecuencia que el servicio de recolección y transporte de los residuos sólidos sea eficiente.

En otras palabras, una mejora notable en el diseño de rutas permite, además de satisfacer adecuadamente los objetivos inicialmente propuestos, reducir costos de operación y mantenimiento, reducir las distancias muertas y con ello modificar la proporción de las distancias productivas respecto de la distancia total recorrida, se da el servicio a toda la población tal como se ha proyectado, se aprovecha toda la capacidad de los vehículos recolectores, se aprovecha toda la jornada de trabajo, se obtiene mayor colaboración del personal al darse

cuenta que los nuevos recorridos le permite ahorrar trabajo improductivo. Además permite en un momento dado adquirir más unidades de recolección a mediano o largo plazo.

Sin embargo, después de estar funcionando eficientemente un sistema, es preciso revisarlo una o dos veces al año, ya que es inevitable que se produzcan cambios en la ciudad.

Dichos cambios, pueden provocar aumento en la cantidad de residuos sólidos en algunos sectores; incremento en el tránsito en ciertas calles; sumarse nuevos sectores residenciales; entre otros. Por lo antes expuesto, el proceso para mejorar el sistema de recolección de residuos sólidos, requiere de una atención continua y responsable tanto de las autoridades involucradas como del público en general <sup>[10]</sup>.

El diseño de rutas para la recolección de residuos hace referencia a un problema de redes, en el cual se deben transportar los residuos desde los puntos generadores de residuos sólidos hasta las zonas de disposición final, a través de una red de vías. Para obtener el modelo matemático del sistema, se realiza la revisión de los modelos propuestos en la literatura, para el análisis y resolución de problemas de redes, en específico el problema del Agente Viajero se dará una revisión de la teoría para su desarrollo.

#### **4.4 INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES**

Las primeras actividades formales de investigación de operaciones se dieron en Inglaterra durante la Segunda Guerra Mundial, cuando se encomendó a un equipo de científicos ingleses la toma de decisiones acerca de la mejor utilización de materiales bélicos. Al término de la guerra, las ideas formuladas en operaciones militares fueron adaptadas para mejorar la eficiencia y la productividad en el sector civil. Hoy en día, la investigación de operaciones es una herramienta dominante e indispensable para tomar decisiones <sup>[16]</sup>.

Un elemento principal de la investigación de operaciones es el modelado matemático. Aunque la solución del modelo matemático establece una base para tomar una decisión, se deben tener en cuenta factores intangibles o no cuantificables, por ejemplo el comportamiento humano, para luego llegar a una decisión final <sup>[16]</sup>.

La investigación de operaciones es una herramienta útil para la toma de decisiones en todos los niveles de una organización, debido a que permite, estudiar complejos sistemas reales, con la finalidad de optimizar el funcionamiento de los mismos, teniendo en cuenta las restricciones existentes.

Dentro de la investigación de operaciones existe una técnica de modelado para resolver problemas llamada programación lineal, la cual trata de maximizar o minimizar un objetivo.

#### 4.5 PROGRAMACIÓN LINEAL.

La programación lineal es una técnica matemática ampliamente utilizada, para ayudar a los administradores y operaciones en la planificación y toma de decisiones relativas a la negociación necesaria para asignar recursos. Es sumamente usada para asignar recursos escasos y limitados entre actividades competitivas. Resuelve los problemas en términos de un conjunto de ecuaciones lineales y una ecuación también lineal llamada función objetivo que cuantifica el beneficio proporcionado por la solución del conjunto de ecuaciones lineales que corresponden a las restricciones.

Una metodología para la solución de problemas de programación lineal puede ser:

- i. Determinar la función objetivo o el objeto del problema: el cual puede ser, maximizar utilidades, producción, publicidad, audiencia etcétera. o minimizar costo, tiempo, distancia, desperdicios, etcétera.
- ii. Definir las variables del problema: definir las variables que se desean involucrar en la solución del problema
- iii. Establecer las restricciones del problema: es necesario establecer las restricciones a las que debe apegarse la solución, estas pueden estar en función de las necesidades actuales de la empresa.

##### 4.5.1 El problema del agente viajero.

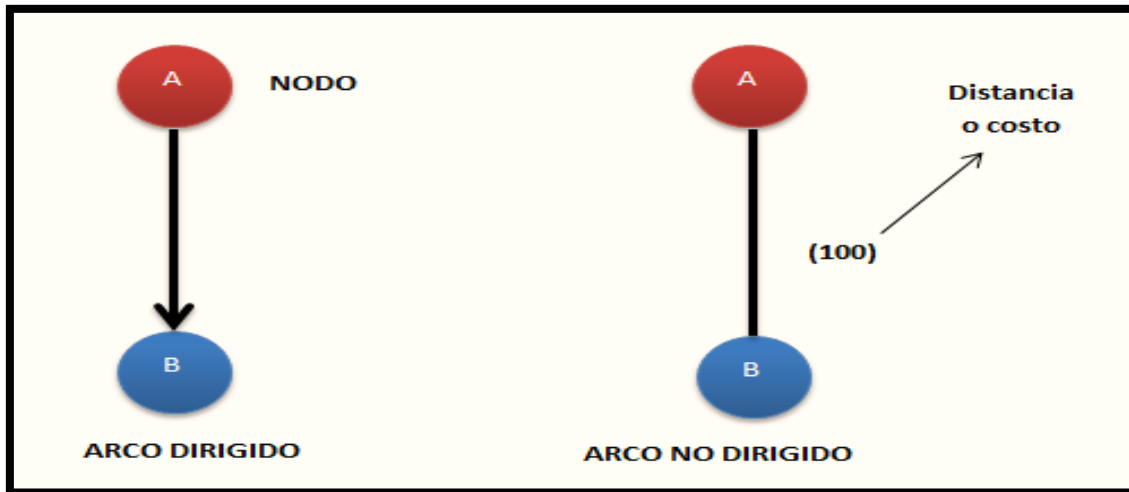
La programación lineal tiene aplicaciones prácticas importantes como es el caso del problema del agente viajero (PAV) o (TSP por sus siglas en inglés, *Traveling Salesman Problem*), que es base de gran parte de los problemas de distribución física de bienes.

El PAV se describe como sigue: un agente viajero desea programar visitas a un cierto número de clientes que se encuentran en distintas ubicaciones, el problema es seleccionar la ruta más corta, esto es, visitar todos los clientes y volver a la ubicación de origen con la mínima distancia recorrida posible (o el menor tiempo, el menor costo), sin visitar dos veces la misma ubicación.

Si se tiene 3 ubicaciones (a, b y c) por visitar, entonces se tendría una función de combinaciones sin repetición  $c(3,2)$ , es decir, habría 6 posibles soluciones: a-b-c, a-c-b, b-a-c, b-c-a, c-a-b, c-b-a, para el caso de 4 ubicaciones se tendría 12 combinaciones, para 10 ubicaciones habría 90 combinaciones, para 100 ubicaciones habría 9,900 combinaciones y así sucesivamente.

En este tipo de problemas a las ubicaciones se le define como nodos y a los caminos entre las ubicaciones se les llama arcos. Los arcos pueden ser dirigidos y no dirigidos. Si el arco es dirigido, solo se puede ir desde el nodo inicial hasta el nodo final, es decir, una calle con un solo sentido, y si el arco es no dirigido, significa que los nodos se pueden recorrer en ambos sentidos. A cada arco se le puede asociar una distancia o un costo, como se ilustra en la figura IV.1.

Figura IV.1. Arco dirigido y no dirigido

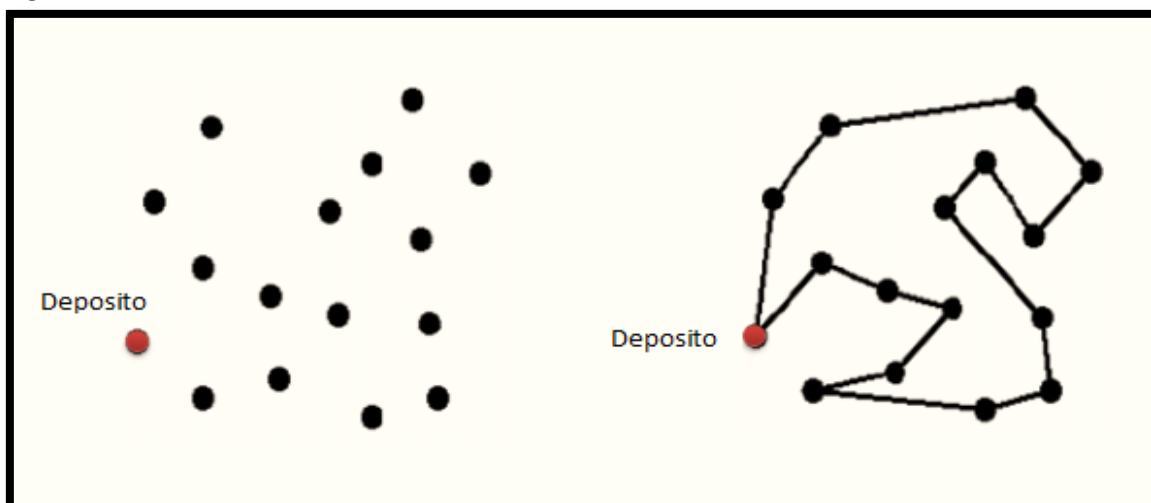


Fuente: Elaboración Propia.

El PAV sería equivalente a encontrar el ciclo Hamiltoniano (una sucesión de aristas adyacentes, que visita todos los vértices del grafo una sola vez) de costo mínimo:

Partiendo de un depósito, se debe recorrer todos los vértices y regresar al depósito con la menor distancia total recorrida como se ilustra en la figura IV.2.

Figura IV.2. Ciclo hamiltoniano



Fuente: Soto, Raúl. "Problema del agente viajero" Modelos de redes de transporte. UACM.

En esencia, el problema es un modelo de asignación con restricciones adicionales que garantizan la exclusión de subviajes en la solución óptima. En forma específica, en el caso con  $n$  nodos, se define:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si se llega del nodo } i \text{ al nodo } j \\ 0, & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Si  $d_{ij}$  es la distancia del nodo  $i$  al nodo  $j$ , el modelo del agente viajero es el siguiente:

$$\text{minimizar } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} X_{ij}, \quad d_{ij} = \infty \text{ para } i = j \dots\dots\dots(10)$$

Sujeto a

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$X_{ij} = (0, 1) \quad (3)$$

$$\text{La solución forma un circuito} \quad (4)$$

Dónde:

$n$  es el número de nodos (aristas o ubicaciones) a visitar.

$d_{ij}$  es la distancia para ir de  $i$  a  $j$

Las restricciones (1), (2) y (3) definen un modelo regular de Asignación. En general, el problema de asignación producirá soluciones de subcircuito, más que un circuito completo que abarque todas las “ $n$ ” nodos<sup>[16]</sup>.

El PAV es un problema considerado difícil de resolver, denominándose en lenguaje computacional NP-Completo, es decir, es un problema para el que no se podrá garantizar que se encontrará la mejor solución en un tiempo de cómputo razonable. Para dar solución se emplean diferentes técnicas, entre las cuales, las principales se denominan heurísticas, cuyo objetivo es generar soluciones de buena calidad en tiempos de cómputo mucho más pequeños (soluciones óptimas tiempo – respuesta).

- a) Heurística del vecino más cercano.
- b) Heurística de la inserción más barata.
- c) Heurística como problema de asignación.
- d) Heurística ramificación y acotamiento.

#### 4.5.1.1 Heurística del vecino más cercano.

Este algoritmo está basado en el sentido común (del tipo greedy: son llamadas así porque sólo se preocupan por hacer lo mejor que pueden localmente, sin ver más allá de un cierto entorno muy cercano), el cual busca construir el ciclo, partiendo desde el origen (depósito), eligiendo en cada paso el nodo más cercano al nodo actual.

Paso 1. Seleccionar un nodo inicial.

Paso 2. Identificar al nodo más cercano al último agregado, siempre que no haya sido agregado.

Paso 3. Repetir el Paso 2 hasta incluir todos los nodos.

#### 4.5.1.2 Heurística de la inserción más barata.

Este método inicia con el ciclo más barato de todas las alternativas posibles y analiza todas las posibles inserciones al ciclo, de tal forma que el ciclo se incrementa hasta integrar en el mismo a todos los nodos, generalmente este método sólo se aproxima a la solución óptima, pero no lo alcanza (al igual que la heurística del vecino más cercano).

Como algoritmo, esta heurística se explica del siguiente modo:

- i) Se selecciona el arco más barato, llamado, y se establece un ciclo con los nodos que forman dicho arco.
- ii) Para cada nodo aún no considerado se inserta en el ciclo en la forma, para el cual el costo de insertarlo en el ciclo sea el mínimo.
- iii) Se repite el paso ii hasta que no haya más nodos sin integrar en el ciclo.

#### 4.5.1.3 Heurística como problema de asignación.

Para esta técnica se presenta al problema como uno de asignación, por lo cual se requiere de una matriz de costos y una asignación uno a uno; sin embargo, esta técnica busca la creación de un ciclo que integre a todos y cada uno de los nodos en estudio.

Dadas las condiciones del algoritmo del Problema de Asignación, éste fácilmente puede crear subciclos como parte de la solución óptima; para ello se requiere establecer escenarios en donde se hagan “menos atractivos”, al menos uno de los elementos que forman dichos subciclos, así se da lugar a la creación de subproblemas donde se “penalice” uno a uno los arcos y se creen nuevas alternativas de solución.

Esta forma de crear escenarios se pueden desglosar en forma de ramificación de árbol, donde se indiquen las soluciones parciales, las penalizaciones y los ciclos formados.

#### 4.5.1.4 Heurística Ramificación y Acotamiento.

En este problema de minimización la idea básica es encontrar cotas inferiores a la función objetivo en una serie de subconjuntos del conjunto de todas las soluciones posibles. Aquel subconjunto con el mejor valor, se vuelve a su vez a dividir en otra serie de sub-conjuntos a los cuales se le calcula una cota inferior. Este proceso se repite hasta que se encuentra lo que constituye la solución óptima. El método elimina implícitamente una serie de alternativas indeseables, al tiempo que converge a la solución óptima.

## 4.6 APLICACIÓN AL MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

En el transporte de residuos sólidos, no es común encontrar métodos de optimización de rutas, sin embargo, es importante teniendo en cuenta los altos costos del servicio para la recolección, manejo y transporte de residuos sólidos [10].

Usualmente, las rutas son generadas por criterio del supervisor de Operaciones en conjunto con los choferes, lo cual implica deficiencias en el modelo propuesto, numerosas repeticiones de recorrido en las calles del mapa para poder abarcar todo el camino, y selección de caminos muy largos debido a no haber un criterio de minimización de recorrido. Una deficiente propuesta de ruta y una selección de camiones con capacidades no adecuadas, derivarán en deficiente operación y funcionamiento del equipo, desperdicio de personal, reducción de las coberturas del servicio de limpieza y la proliferación de tiraderos clandestinos a cielo abierto [15].

Entre las razones por las que no se realizan los métodos de optimización de rutas se encuentran los costos de implementación de los sistemas y la falta de conocimiento de parte de los supervisores de operaciones en implementación de proyectos relacionados al tema.

De forma general para el diseño de rutas de recolección de residuos sólidos, tradicionalmente hay tres partes importantes: macroruta, distribución de rutas y microruta. La macroruta se refiere a dividir la ciudad en zonas o sectores a grandes rasgos, para uniformizar las características de todas las zonas. La distribución se refiere a dividir y balancear las rutas, determina los días de trabajo y divide las áreas de recolección dentro de las rutas balanceadas para que todas las cuadrillas tengan igual carga de trabajo. Por último, la etapa de

microruteo dividida la zona en sectores, se procede a resolver un conjunto de problemas aislados, esto es, dentro de cada sector.

A continuación, se presentan investigaciones sobre optimizaciones de rutas realizadas en distintas partes del mundo.

## **4.7 LITERATURA DE OPTIMIZACIÓN DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS**

### **4.7.1 Optimización en México**

En el 2006, Jesús Racero y Edgar Pérez <sup>[10]</sup>, propusieron una solución al tema de recolección, manejo y transporte de residuos sólidos domiciliarios para Ciudad Victoria en México conscientes de las diferentes características adaptadas de la realidad, y ajustando su modelo a ellas. La finalidad fue obtener un diseño óptimo de recolección, establecer la cantidad y tipo de unidades y el horario ideal para el ruteo, y así evitar inconvenientes a la población.

El término desarrollado en la propuesta fueron las macrorutas, el cual se refiere a la división de la ciudad en sectores operativos y luego la determinación del número de camiones necesarios en cada una y la asignación de un área del sector a cada vehículo recolector. Para ello se inicia con la sectorización, que divide la ciudad en sectores, en caso fuera factible debido a su dimensión y teniendo en cuenta las características geográficas. Luego se realiza la zonificación, la cual consiste en dividir cada sector en zonas que serán cubiertas por un vehículo recolector durante la semana.

Con respecto a la población, el documento estimó la vida de un proyecto de recolección de entre 5 y 8 años, por lo que calcula necesario estimar la población durante 10 años. Con respecto a la frecuencia de recolección, el documento habla de una recolección mínima de 2 veces por semana y se trata de minimizar debido a los costos de este servicio.

Luego de efectuar la zonificación, se diseñan las rutas en detalle, para lo que se toma en cuenta la traza urbana y topografía de la localidad, el ancho y tipo de calles, el método de recolección, el equipo de recolección, la densidad de población y la generación de residuos sólidos.

Después de todo el proceso anterior, se designa el microruteo. Este hace referencia al recorrido específico que deben realizar diariamente los vehículos recolectores de residuos sólidos. Las variables relevantes para tomar en cuenta son el plano del lugar, el método de recolección, el equipo de recolección, la densidad de población y la generación de residuos sólidos.

Los métodos más recomendables para el microruteo son los determinísticos. En el documento, Racero y Pérez señalan dos como los más importantes: el algoritmo de Little para resolver el problema del agente viajero, enfocado en una demanda discreta, para tiempos de parada fija o en esquinas; y el algoritmo del cartero chino, para una demanda continua, de recolección tipo acera, intradomiciliaria o similar.

#### 4.7.2 Optimización en Argentina

Por otra parte, Bonomo en su trabajo <sup>[1]</sup>, presenta su propuesta llamada “Optimización de la Recolección de Residuos en la Zona Sur de la Ciudad de Buenos Aires”, utilizando técnicas de programación matemática.

Se describe el proceso de depuración de los datos disponibles y los pasos realizados para aplicar herramientas de programación lineal entera para este problema. Se obtienen propuestas que minimizan la distancia total recorrida por cada camión y muestran una disminución de los trayectos de entre un 10% y un 40% con respecto a los recorridos actuales.

Además, estos nuevos trayectos disminuyen sustancialmente el desgaste final de los camiones. Aplicado en Concorde que es un programa que permite resolver instancias del TSP en forma exacta mediante programación lineal entera. Se implementó un programa en el lenguaje de programación Small Talk que realiza tareas de procesamiento del mapa facilitando el cálculo de distancias, cálculo de itinerarios óptimos y visualización de los resultados.

En este proyecto utilizaron la implementación Visual/Works/Non Commercial, 7.4.1 disponible sobre los sistemas operativos Microsoft Windows XP/Vista y GNU-Linux. El programa consta de un conjunto de objetos, de clases y de métodos que modelan el mapa de la ciudad, el grafo de los contenedores, los algoritmos necesarios para calcular los caminos mínimos y los itinerarios mínimos. También incluye interfaces con una base de datos del mapa en PostgreSQL, con el programa Concorde y con el paquete de visualización gráfica Takenoko.

#### 4.7.3 Optimización en España

Por otra parte, Salvador en su trabajo <sup>[12]</sup>, llamado “Planificación y optimización de flotas de vehículos para la recogida de residuos urbanos”, en este trabajo intenta optimizar todas las rutas de recogida de cada vehículo, de manera que se recorra el menor número de kilómetros posible.

Donde puntualiza que uno de los mayores costos en la recolección de los residuos sólidos urbanos es el transporte, el entorno es la Provincia de Huelva, donde la Mancomunidad de Servicios (MAS) tiene actualmente esta responsabilidad en la mayoría de los núcleos de población onubenses.

Los vehículos de recogida se organizan en Bases de Vehículos con responsabilidad en un conjunto de núcleos de población claramente definido.

Los vehículos de recogida vuelcan su contenido en las Estaciones de Transferencia para estar en condiciones de iniciar un nuevo servicio. Se ha utilizado un planteamiento basado en la Programación Lineal Entera Mixta (MILP) utilizando el software de IBM CPLEX Studio.

# CAPÍTULO V

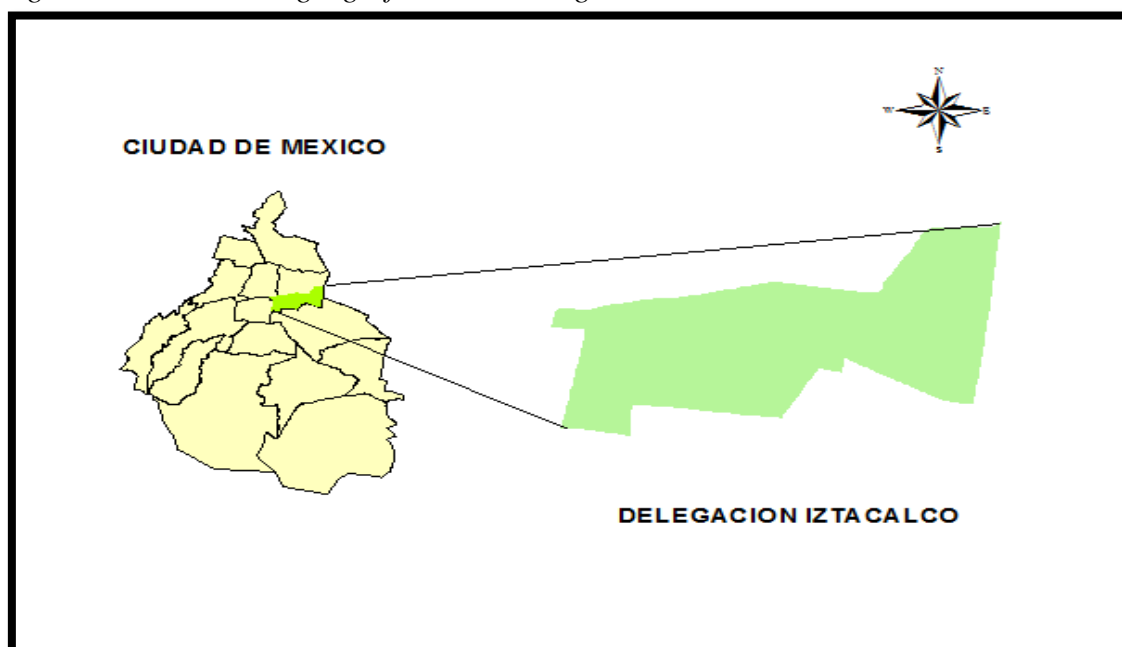
ESTUDIO DE CASO COLONIAS  
JUVENTINO ROSAS Y RAMOS  
MILLÁN DE LA DELEGACIÓN  
IZTACALCO

## 5.1 ASPECTOS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO.

La Delegación Iztacalco, es una de las 16 demarcaciones políticas que conforman la Ciudad de México, y se localiza en la zona oriente como se ilustra en la figura V.1. Las delegaciones colindantes son: al norte, con la Delegación Venustiano Carranza y Cuauhtémoc; al poniente, con la Delegación Benito Juárez; al sur la Delegación Iztapalapa; y al oriente el Municipio de Nezahualcóyotl (Estado de México).

La Delegación Iztacalco cuenta con una superficie de 23.30 kilómetros cuadrados y es entrecruzada por más de 490 kilómetros de calles que diariamente reciben los residuos sólidos por la mayoría de los 390,348 habitantes, de las 38 colonias.

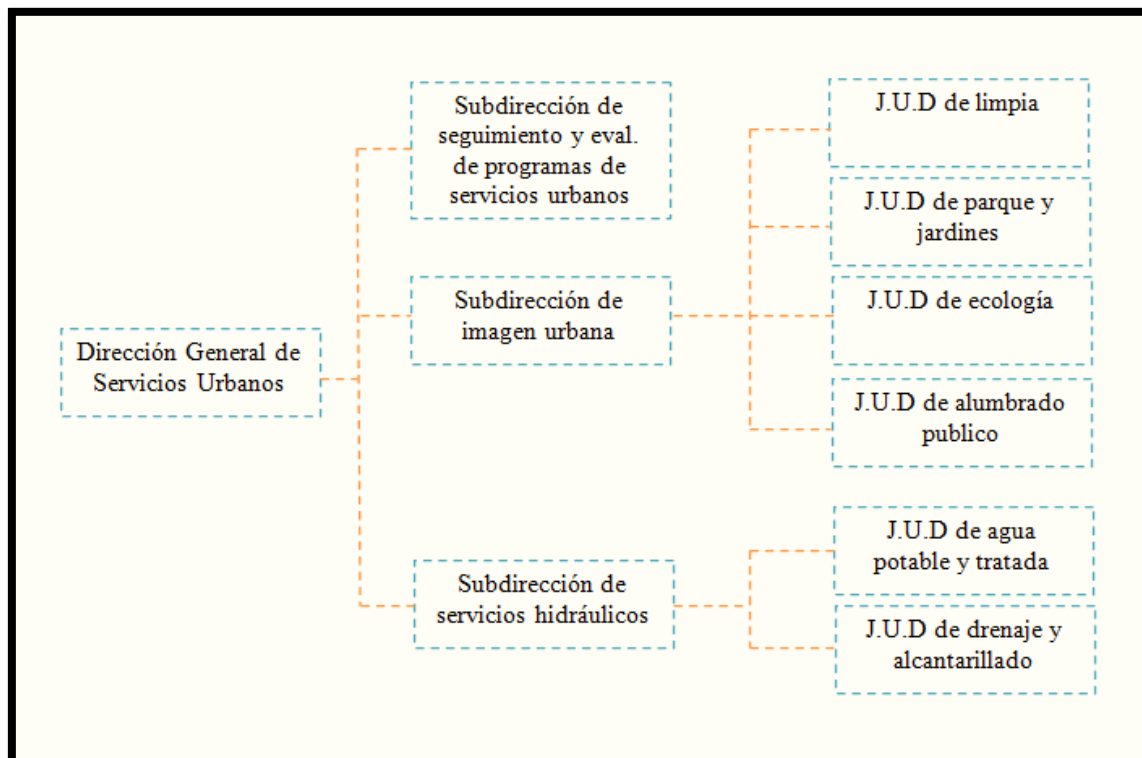
*Figura V.1. Ubicación geográfica de la Delegación Iztacalco.*



*Fuente: Elaboración Propia.*

Dentro de la Delegación Iztacalco la recolección de residuos sólidos se ejecuta bajo la modalidad de gestión directa, esto es, está a cargo de la administración delegacional, por la unidad departamental de limpia dentro de la subdirección de imagen urbana, como se ilustra en la figura V.2.

Figura V.2. Organigrama Dirección General de Servicios Urbanos.



Fuente: Delegación Iztacalco.

La unidad departamental de limpia, tiene como misión, mantener en condiciones adecuadas de limpieza el espacio territorial de la Delegación, brindando un eficiente servicio de recolección de basura, retiro de tiliches, desechos y residuos no peligrosos considerados como desecho humano no tóxico o biológico infeccioso.

También tiene como objeto, proporcionar el servicio de recolección de basura en la vía pública y domiciliaria, retiro de residuos sólidos en mercados y edificios públicos, así como el retiro de residuos no peligrosos en industrias, promover a través de campañas la participación de la comunidad en las tareas de limpieza.

Dentro de las funciones principales de la unidad departamental de limpia son:

- Realizar la distribución y asignación de cargas de trabajo, personal, equipo y vehículos, destinados a los servicios de limpia de acuerdo con la zonificación establecida, así como supervisar diariamente las tareas realizadas.
- Establecer las rutas de recorridos de los vehículos designados para la recolección de basura, determinando paradas, frecuencia y distancias, así como los recursos necesarios para la adecuada prestación del servicio.

- Diseñar y aplicar las políticas para el óptimo uso del equipo de limpia, con el fin de brindar una mejor atención al público.
- Operar las campañas y servicios especiales en materia de limpieza que fomenten la cultura de protección al entorno ecológico y manejo adecuado de los residuos sólidos, promoviendo la reducción, y el reciclamiento de ellos.
- Proponer e informar a la Dirección General las respuestas a las observaciones de los órganos de fiscalización, así como el cumplimiento de las disposiciones provenientes de éstos en las áreas adscritas a su cargo.
- Proponer a la Dirección General la integración del Programa Operativo Anual del área, así como informar mensualmente del avance físico presupuestal.

## 5.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ACTUAL.

La recolección de residuos sólidos dentro de la demarcación se realiza 6 veces por semana, a través del método de esquina o parada fija, como se ilustra en la tabla V.1.

*Tabla V.1. Recolección de desechos*

Tipo de recolección	Días de recolección	Tipo de desechos
<b>Orgánico</b>	Martes Jueves Sábado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Residuos de alimentos, huesos y carne.</li> <li>• Pan, tortillas y residuos de café.</li> <li>• Cascaras de huevo, frutas, verduras y legumbres.</li> <li>• Filtro de papel, servilletas y viruta de lápiz.</li> <li>• Flores, pasto, hojarasca y heces de animales.</li> </ul>
<b>Inorgánico</b>	Lunes Miércoles viernes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plásticos, vidrios, metales, papel, cartón y electrónicos.</li> <li>• Toallas sanitarias, pañales, papel de baño, ropa, zapatos, tenis, chicles y cigarrros.</li> </ul>

*Fuente: Elaborado a partir de datos de la Delegación Iztacalco (2017)*

La recolección de residuos sólidos en la Delegación Iztacalco, se realiza por medio de camiones compactadores de carga trasera. Estas unidades se encargan de la recolección de los residuos sólidos y su transporte hacia una estación de transferencia. Los reportes de la Delegación Iztacalco indican que se recolectan y transportan a la estación de transferencia, un promedio de 779 ton/día de residuos sólidos generados en toda la demarcación <sup>[17]</sup>.

La Delegación Iztacalco, cuenta con 98 camiones de carga trasera como se ilustra en la tabla V.2, cada vehículo tiene una capacidad de 6 toneladas <sup>[17]</sup>.

Tabla V.2. Flota Vehicular.

NUMERO DE UNIDADES	TIPO	MODELO	MARCA	CAP. VOLUMETRICA (TON)
4	CARGA TRASERA	1991	MERCEDES BENZ	6
3	CARGA TRASERA	1993	DINA	6
23	CARGA TRASERA	1994	MERCEDES BENZ	6
14	CARGA TRASERA	1998	DINA	6
24	CARGA TRASERA	2001	INTERNATIONAL	6
6	CARGA TRASERA	2006	FREIGHTLINER	6
1	CARGA TRASERA	2007	INTERNATIONAL	6
3	CARGA TRASERA	2008	CHEVROLET	6
3	CARGA TRASERA	2008	KODIAK	6
1	CARGA TRASERA	2010	FREIGHTLINER	6
2	CARGA TRASERA	2011	USIMECA	6
14	CARGA TRASERA	2015	INTERNATIONAL	6

Fuente: Elaborado a partir de datos de la Delegación Iztacalco (2017)

Como parte de las estrategias para una gestión integral de residuos sólidos se estableció desde el 1 de enero del 2004 la Ley de Residuos Sólidos, tiempo en que todas las delegaciones realizaron pruebas en zonas pilotos, entrando en vigor el 1 de octubre del 2004.

Esta surge como necesidad a la falta de espacios para la disposición final, pretendiendo que la solución sea, la separación de los residuos en dos fracciones, Orgánicos e Inorgánicos, de los cuales los orgánicos adecuados sirven para la realización de composta y los inorgánicos para el mayor aprovechamiento de los materiales para reciclar y de esa forma destinar un porcentaje menor a disposición final.

El servicio de limpia se lleva a cabo mediante la participación en las campañas y servicios especiales en materia de limpieza que fomenten la cultura de protección al entorno ecológico y manejo adecuado de los residuos sólidos, promoviendo la reducción, y el reciclaje de ello, así como la separación de residuos sólidos en colonias propuestas para lo mismo con el fin de brindar una mejor atención al público, responder a las solicitudes y demandas ciudadanas dentro del ámbito de competencia.

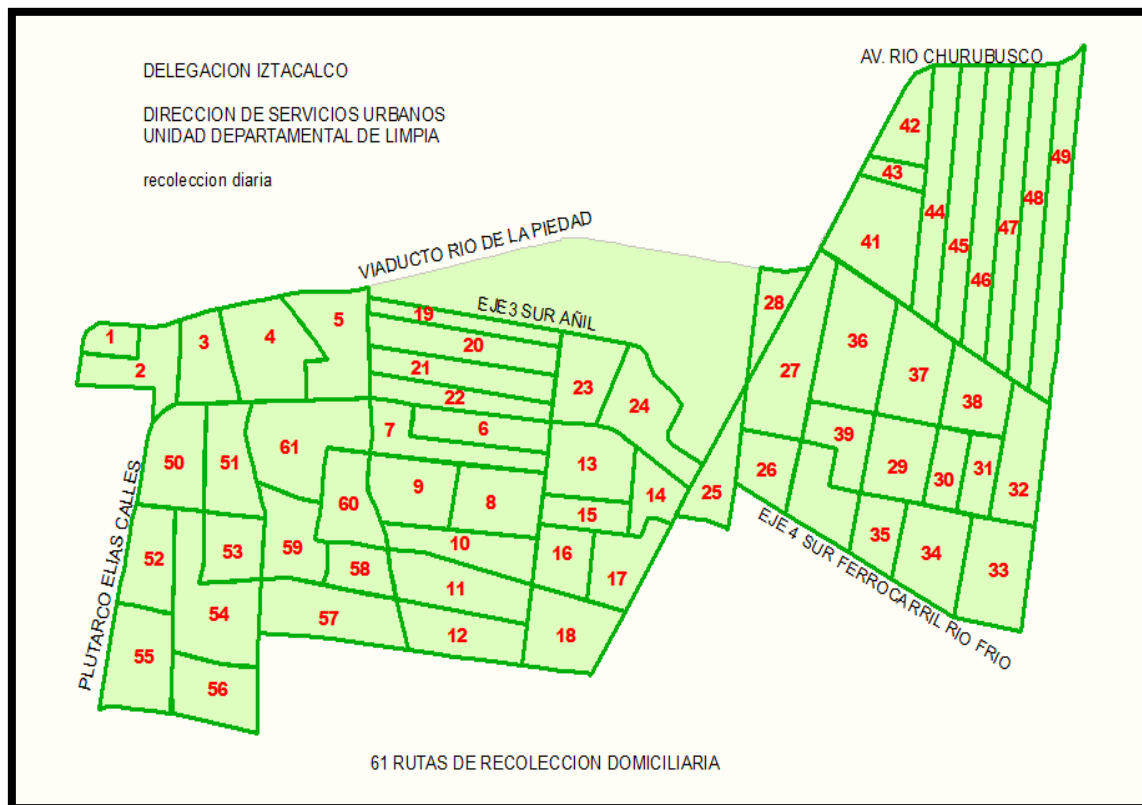
Esto tiene como objetivo organizar la recolección de desechos sólidos en la vía pública y domiciliaria, el retiro de desechos en planteles escolares oficiales, retiro de residuos sólidos en mercados públicos y retiro de residuos no peligrosos en industrias, así como promover a través de campañas, la participación de la comunidad en las tareas de limpieza, con la finalidad de mantener en condiciones adecuadas el espacio territorial de la delegación, beneficiando así a los 390,348 habitantes de la demarcación.

El servicio de limpia se realiza, mediante a los siguientes subprogramas establecidos.

- 1.- Recolección domiciliaria.
- 2.- Barrido manual.
- 3.- Barrido mecánico.
- 4.- Recolección de tiraderos a cielo abierto.
- 5.- Recolección a planteles educativos.
- 6.- Contenedores a mercados.
- 7.- Recolección industrial.
- 8.- Recolección de residuos voluminosos (muebles, llantas, tiliches, etcétera. (Ya en vía pública, cuando hay jornadas).

Para dar cumplimiento a la Ley de Separación de Residuos Sólidos, se realiza cubriendo 61 sectores de recolección domiciliaria estratégicamente establecidas que se ilustran en la figura V.3, que a partir del 1 de marzo del 2011 se separa de manera Orgánica e Inorgánica, de acuerdo los días establecidos en el Programa de Separación de Residuos Sólidos; así mismo se realiza el barrido manual en 417 tramos de 2.5 kilómetros cada uno con dos barridos diarios en toda la demarcación, también se realiza el barrido mecánico en 6 rutas en las vías secundarias y la recolección de 45 tiraderos más significativos a cielo abierto, cabe mencionar que desde hace 4 años se identificaron un total de 67 tiraderos a cielo abierto, logrando dar continuidad a una reducción del 46.33% al de hace 4 años <sup>[17]</sup>.

Figura V.3. Rutas de recolección.



Fuente: Delegación Iztacalco.

### 5.3 PROPUESTA PARA REORGANIZAR LA SECTORIZACIÓN EN LA DELEGACION IZTACALCO.

Para reorganizar los sectores o macrorutas, se plantea la metodología presentada en el inciso 4.2.1, para ello se propone obtener datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI 2016).

Los datos que se adquirieron son:

- Ageb's (extensión territorial, circunscrita por límites geo estadísticos con fines de referir información estadística, INEGI 2016) de la Delegación Iztacalco, en su formato shapefile, el cual es un formato de archivo informático propietario de datos espaciales desarrollado por la compañía ESRI, quien crea y comercializa software para Sistemas de Información Geográfica como ArcGIS, el cual se utilizará para el análisis.
- Población total en la demarcación.
- Recolección per cápita diaria en la Delegación Iztacalco.

Por otra parte, la Delegación Iztacalco mediante la unidad departamental de limpia proporcionó los siguientes datos <sup>[17]</sup>:

- Generación de basura per cápita:  $B = 2 \text{ kg/habitante/día}$
- Frecuencia de la recolección:  $F = 6 \text{ veces por semana}$
- Número de viajes por turno  $N = 2$ .
- Capacidad de carga de los camiones recolectores  $C = 6000 \text{ kg}$ .

En este caso, se utiliza la ecuación 4, para determinar el número de habitantes por sector.

$$P \times B \times (6/F) = N \times C$$

Dentro de la demarcación, la recolección de residuos sólidos se realiza 6 veces por semana, esto implica que el factor  $(6/F)$  adquiera el siguiente valor:  $(6/F)=1$

Sustituyendo:

$$P \times 2 \text{ kg/habitantes/día} \times 1 = 2 \times 6000 \text{ kg}$$

$$P = 6000 \text{ habitantes}$$

Por tanto, cada vehículo recolector atenderá a 6000 habitantes.

Para obtener el número de sectores de la Delegación Iztacalco, se realizó lo siguiente:

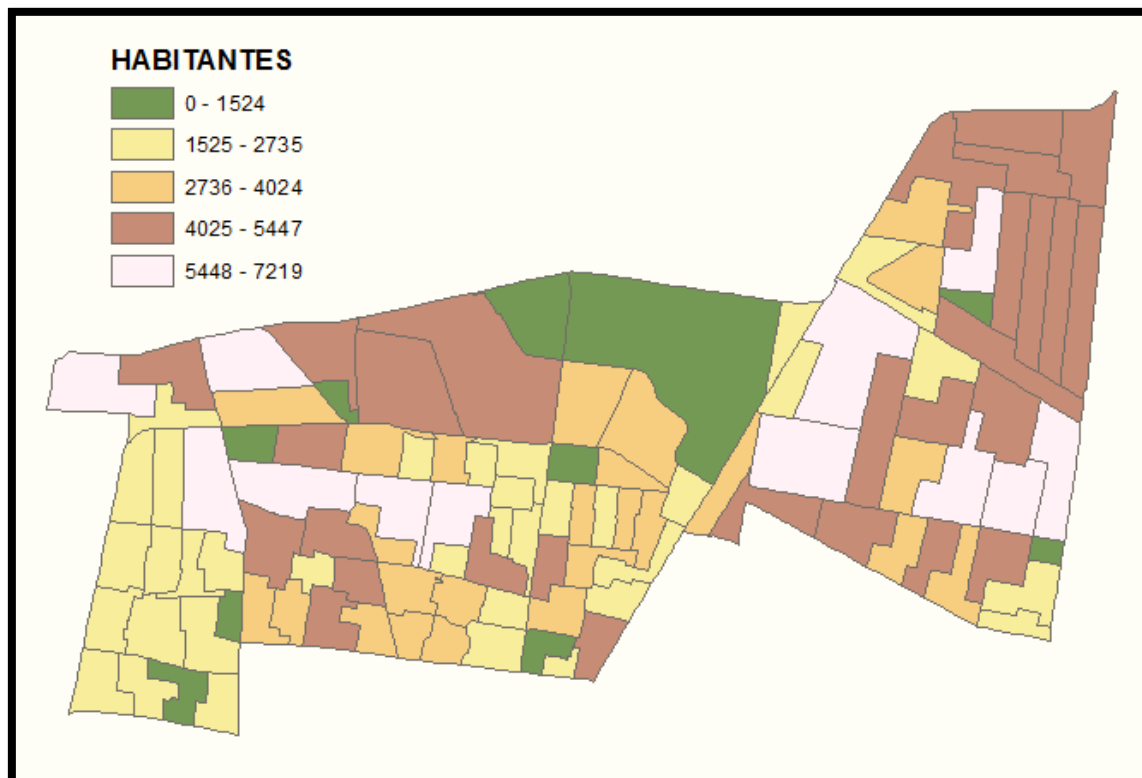
$$\text{número de sectores} = \frac{\text{población total dentro de la demarcación}}{\text{población que atenderá cada vehículo recolector}}$$

$$\text{número de sectores} = \frac{390348 \text{ habitantes}}{6000 \text{ habitantes}} = 65$$

Se realizó el procedimiento para las macrorutas, y la propuesta del número de sectores que debe dividirse la demarcación, es de 65.

Para determinar estos sectores se utilizan las Ageb's, con referencia a la información estadística en términos de la población total de la demarcación, y se utiliza el software ArcGIS para visualización, como se ilustra en la figura V.4.

Figura V.4. AGEB's de la Delegación Iztacalco.



Fuente: Elaboración propia con ayuda de Software Arcgis.

En la figura V.4, se puede verificar cómo se distribuye la población de acuerdo con las Ageb's que utiliza INEGI.

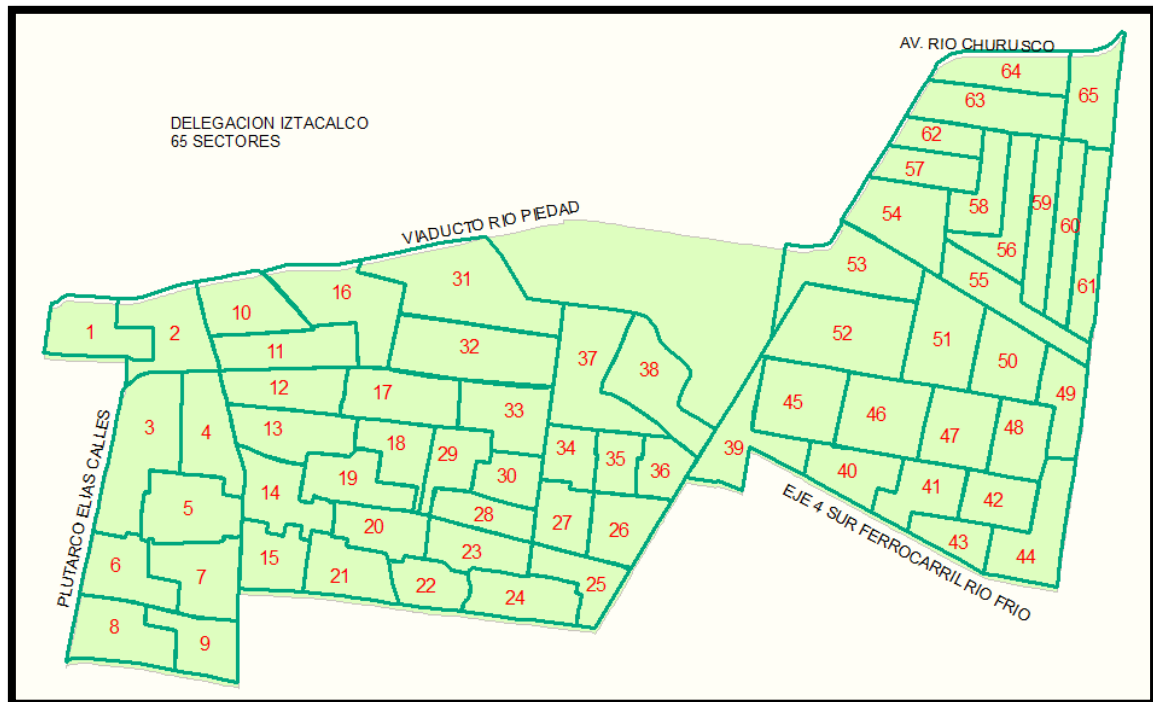
Con base en las Ageb's se determinan los sectores bajo los siguientes criterios:

1. Población por sector 6,000 habitantes. Esto es, dentro de cada sector se abarque a la población mencionada, y por ende estén más homogéneos los sectores.
2. Para la determinación de los límites se utilizan, las vías y las barreras topográficas tales como ríos y lagos, con el propósito de evitar pérdidas de tiempo en cruzar estas vías y barreras. Asimismo, esta regla facilitará la identificación de los sectores a los choferes de vehículos recolectores.

La sectorización que se determinó tomando en cuenta los criterios antes mencionados, se ilustra en la figura V.5.

Con análisis en el software ArcGIS se fue determinando mediante buffer, cuanta población contenía cada buffer, y por observación se fue delimitando cada sector, siempre manteniendo aproximadamente 6000 habitantes.

Figura V.5. Sectorización, propuesta para llevar a cabo la recolección de desechos.



Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.1 Número de vehículos recolectores para la operación.

Para determinar el número de vehículos recolectores, los datos necesarios son: la producción diaria de basura de la demarcación [kg], la capacidad de cada vehículo recolector [kg] y el número de viajes por turno.

La cantidad teórica de vehículos necesarios para recoger todos los desechos, trabajando un solo turno, se determinó utilizando la ecuación (6).

$$K_1 = \frac{B}{N \times C}$$

Generación de basura diaria:  $B = 779,000 \text{ kg/día}$

Número de viajes por turno:  $N = 2$

Capacidad del camión  $C = 6.000 \text{ kg}$

$$K_1 = \frac{779,000 \text{ kg}}{2 \times 6,000 \text{ kg}}$$

El número de vehículos necesarios son:  $K_1 = 65$  vehículos

Sin embargo, se recomienda incrementar estos valores aproximadamente en un 10% a 15% porque es posible alcanzar una eficiencia completa y que todos los vehículos lleguen a su plena capacidad.

Por otra parte, se agregar otro 10% a 20%, para mantener una reserva de vehículos para efectuar su mantenimiento preventivo y asegurar que nunca deje de prestarse el servicio a toda la población. Con vehículos en buen estado, puede ser suficiente una reserva de 10%, pero en caso contrario debe de aumentarse al 20%.

En la ecuación (8), se consideran ambos factores. De tal modo que, el número de vehículos recolectores necesarios, es:

$$K_1 = 1.32 \times \frac{B}{N \times C}$$

$$K_1 = 1.32 \times \frac{779,000 \text{ kg}}{2 \times 6,000 \text{ kg}} = 85$$

Sustituyendo los datos se determina que el número de vehículos recolectores son:  $K_1 = 85$  vehículos

#### 5.4 PROPUESTA DEL PLAN DE RUTA DE LOS VEHICULOS RECOLECTORES PARA LA RECOLECCION DE DESECHOS EN 2 COLONIAS DE LA DEMARCACIÓN.

Se realiza el análisis dentro de dos colonias de la Delegación Iztacalco, las cuales son, Juventino Rosas y Gabriel Ramos Millán, únicamente en estas dos colonias, porque se tomó en consideración lo siguiente:

1. Con base en las Ageb's como se ilustra en la figura V.6. y en datos de la Delegación Iztacalco, son colonias con mayor población dentro de su territorio, por consecuencia son colonias que generan mayor cantidad de desechos la zona 8 con 5946 habitantes y la zona 9 con 7219 habitantes.

Figura V.6. Zona ocho puntos de recolección.

NOM LOC	AGEB	POBTOT
IZTACALCO	0611	5946
IZTACALCO	0607	7219

Fuente: Elaboración Propia con Información Delegación Iztacalco.

2. El software que se utilizará para el análisis solo permite manejar un límite de variables, es por ello que el análisis no se pudo hacer para toda la Delegación.

Este diseño del plan de ruta para los camiones recolectores, se puede desarrollar su aplicación en todas las colonias porque es fácilmente adaptable, siguiendo la metodología desarrollada a continuación.

Únicamente se incluirán en el estudio los desechos sólidos generados por los hogares (desechos domiciliarios), no se incluirán los desechos generados por hospitales, industria por poseer un tipo especial de recolección, como puede ser otro tipo de vehículos, días específicos de recolección, etc.

En la figura V.3., se ilustra la sectorización que utiliza la Delegación Iztacalco, los sectores que se abordaran para su análisis son el sector 8 y 9 que están dentro de la colonia Ramos Millán y Juventino Rosas respectivamente, se hace el análisis de estos sectores porque la delegación Iztacalco ya tiene determinado los puntos de recolección.

#### 5.4.1 Identificación de los datos del problema

Los datos necesarios para llevar a cabo el diseño del plan de ruta dentro de los sectores antes mencionados son los siguientes:

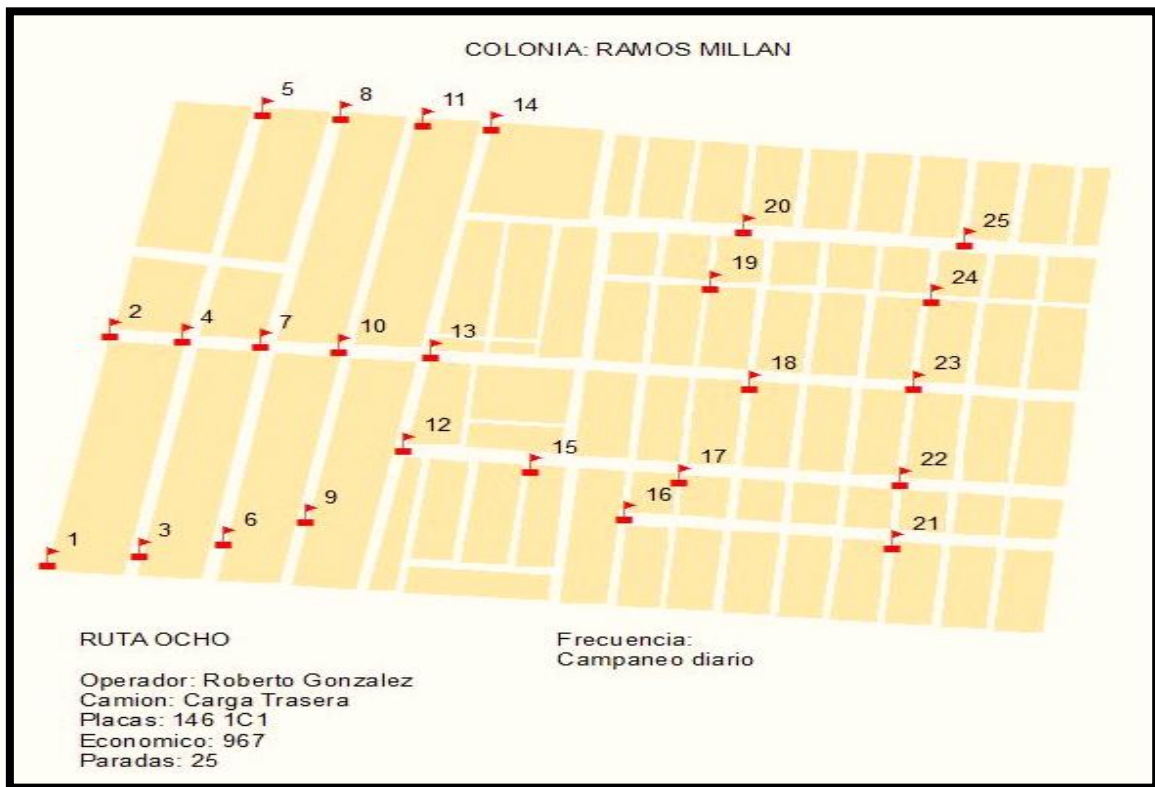
- Lugar de encierro de los camiones (patio de resguardo).
- Lugar de disposición final de los residuos sólidos.
- Sentidos de circulación de las vías (calles, ejes, vías de acceso controlado, etc.).
- Vías reversibles y no reversibles.
- Método de recolección de residuos sólidos.
- Equipos de recolección de residuos sólidos.

En muchas aplicaciones de problemas de redes, como es este caso, es necesario determinar la ruta más corta, es decir, cada punto de recolección establecido sea visitado por el camión recolector, para que los usuarios depositen sus desechos en el mismo, y además sea visitado cada punto una sola vez, lo mencionado se da dentro de una zona establecida.

Para este caso en particular, se conoce la red, los puntos de recolección a visitar (nodos) y la distancia asociada entre punto y punto de recolección (arco), es necesario establecer desde el lugar de encierro un punto de origen (patio), visitar todos y cada uno de los puntos (nodos) exactamente una vez, regresar al lugar de inicio o nodo origen (patio) en un tiempo o distancia mínimo.

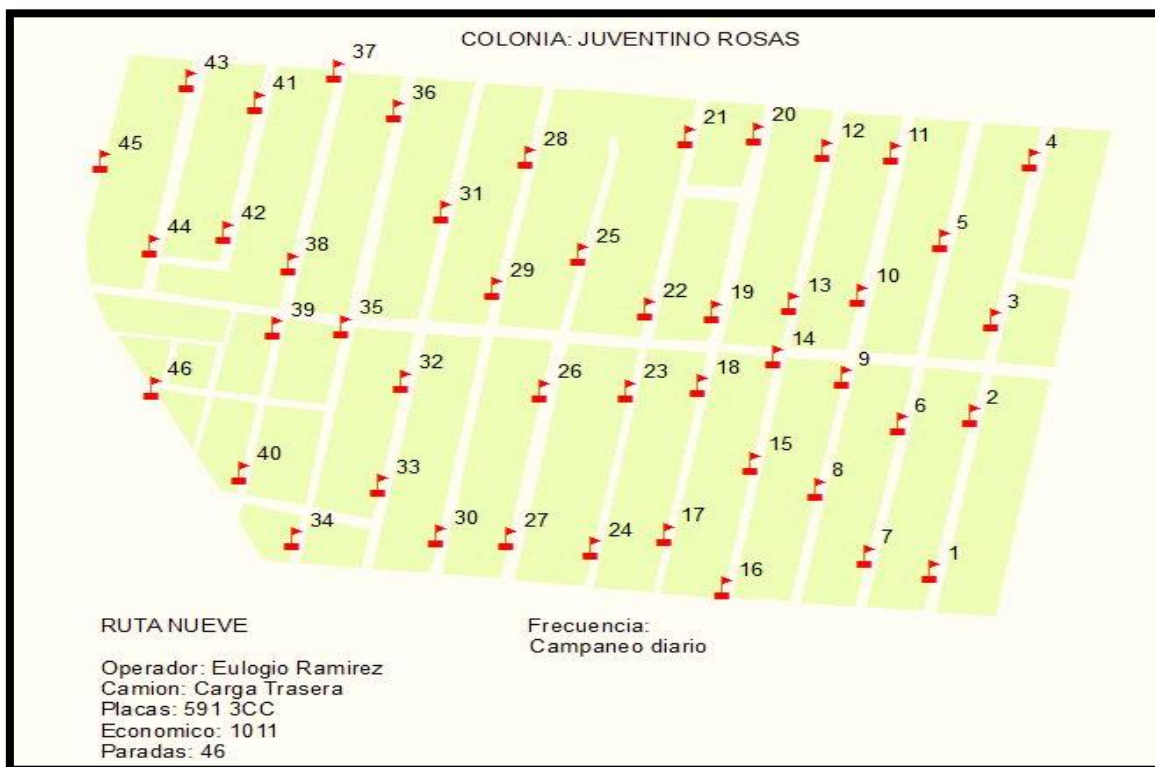
La delegación Iztacalco, establece los puntos de recolección dentro de cada sector <sup>[17]</sup>, en este estudio se consideran la zona ocho y zona nueve, como se ilustran en la figura V.7 y V.8, respectivamente.

Figura V.7. Zona ocho puntos de recolección.



Fuente: Elaboración Propia con Información Delegación Iztacalco.

Figura V.8. Zona nueve puntos de recolección.

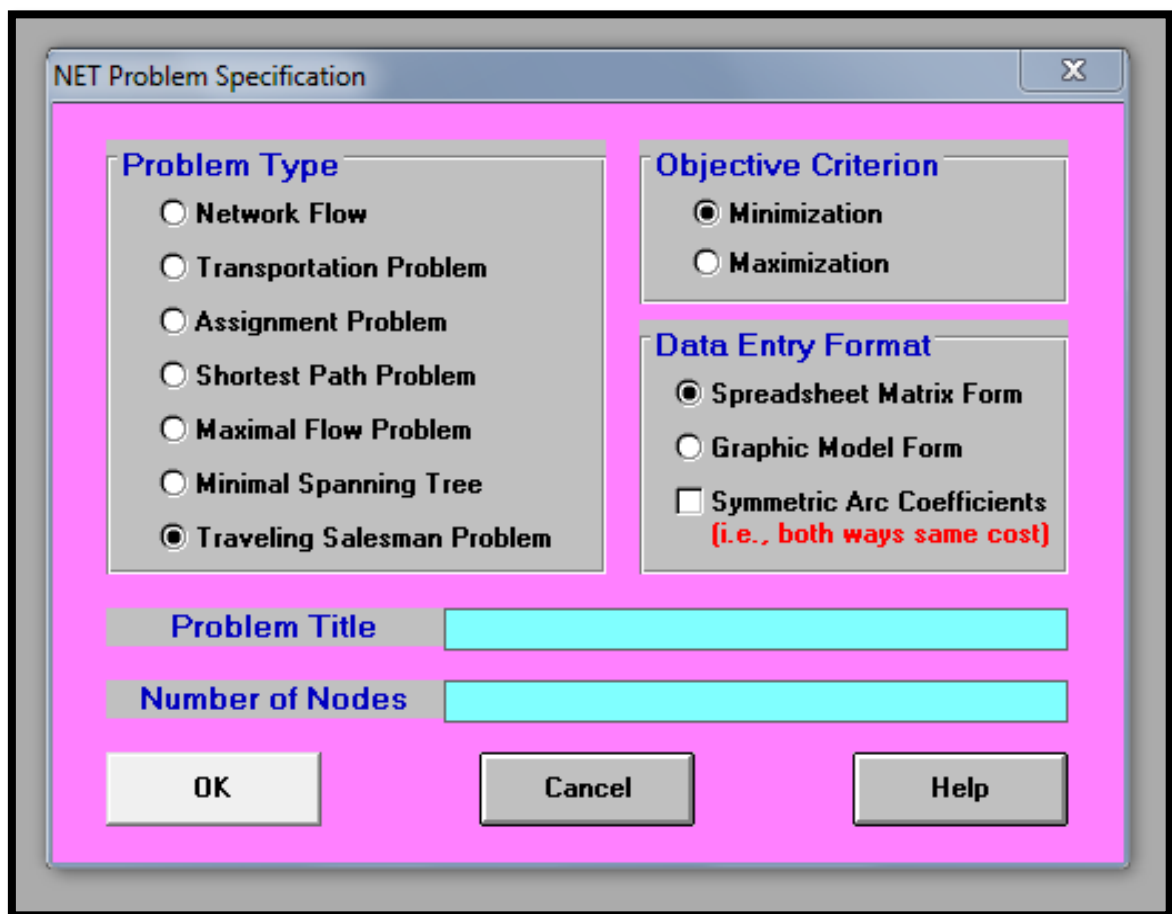


Fuente: Elaboración Propia con Información Delegación Iztacalco.

Dentro de las zonas 8 y 9, se conocen las distancias entre cada punto a visitar, esto es, la distancia que hay del patio de resguardo hacia cada punto de recolección, y las distancias entre cada punto, con esto formando una red para su análisis, estas distancias se obtuvieron a partir de la medición de las calles en el software ArcGis.

El software WinQSB, se utiliza para el análisis de los datos, en su apartado Network Modeling dentro del cual se incluye el Problema del Agente Viajero como se ilustra en la figura V.9.

Figura V.9. Pantalla de inicio.



Fuente: Software WinQSB.

#### 5.4.2 Análisis de los datos del problema y resultados de las rutas de recolección

Posteriormente se alimentó el software WinQSB, con las distancias entre cada nodo o punto de recolección, para analizar las zonas propuestas, los datos obtenidos se muestran a continuación.

Para la zona 8, nos mostró el software un resultado de los datos como se ilustra en la figura V.10.

Figura V.10. Matriz de resultados.

11-30-2016	From Node	Connect To	Distance/Cost		From Node	Connect To	Distance/Cost
1	patio	9	2121	14	16	21	183
2	9	6	172	15	21	22	277
3	6	3	132	16	22	23	308
4	3	1	63	17	23	18	111
5	1	2	233	18	18	19	286
6	2	4	49	19	19	24	150
7	4	7	53	20	24	25	256
8	7	10	53	21	25	20	149
9	10	13	61	22	20	14	582
10	13	12	95	23	14	11	46
11	12	15	88	24	11	8	55
12	15	17	101	25	8	5	53
13	17	16	82	26	5	patio	2632
	Total	Minimal	Traveling	Distance	or Cost	=	8391
	(Result	from	Cheapest	Insertion	Heuristic)		

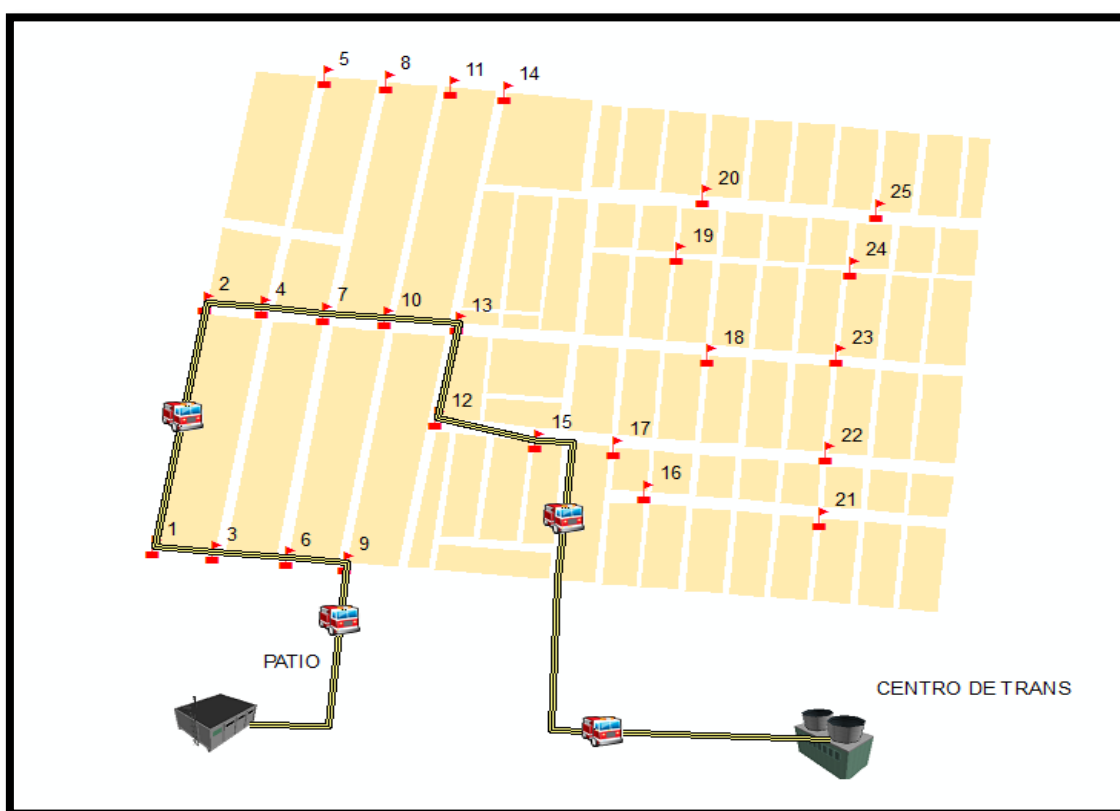
Fuente: Software WinQSB.

En la figura anterior, se puede apreciar el recorrido que tiene que realizar el vehículo recolector dentro de la zona 8, como la unidad de recolección ejecuta dos viajes en un día, el recorrido queda de la siguiente manera.

Primer viaje se realizará bajo la siguiente secuencia de recolección:

ORIGEN	DESTINO		ORIGEN	DESTINO
Patio	Punto9		Punto4	Punto7
Punto9	Punto6		Punto7	Punto10
Punto6	Punto3		Punto10	Punto13
Punto3	Punto1		Punto13	Punto12
Punto1	Punto2		Punto12	Punto15
Punto2	Punto4		Punto15	Estación de transferencia

Figura V.11. Mapa de recorrido primer viaje zona 8.



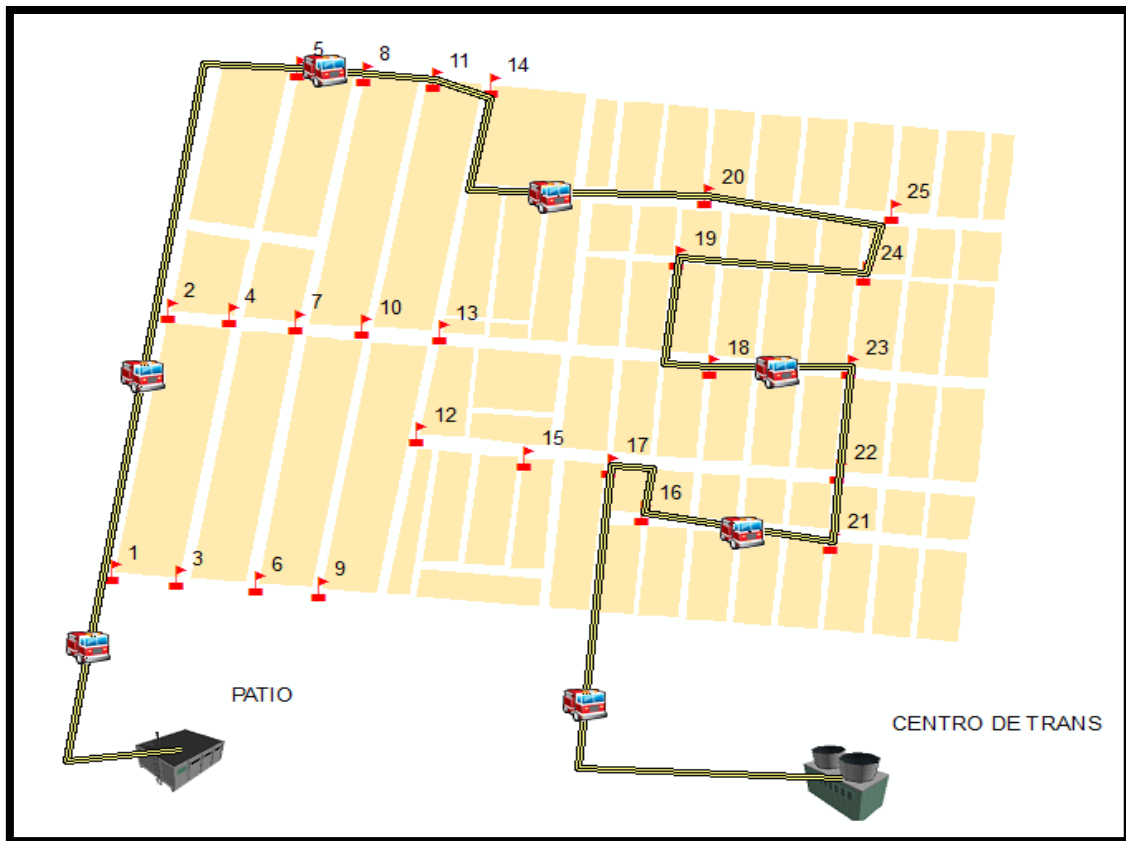
Fuente: Elaboración Propia con Información Software WinQSB.

En la figura V.11. muestra el recorrido que realizara dentro de la zona 8 el vehículo recolector para cumplir con el primer viaje. En la figura A.1. que se muestra en el anexo, ilustra el recorrido específico desde el patio pasando por los puntos de recolección para luego dirigirse al centro(estación) de transferencia.

Segundo viaje se realizará bajo la siguiente secuencia de recolección:

ORIGEN	DESTINO		ORIGEN	DESTINO
Estación de transferencia	Punto17		Punto24	Punto25
Punto17	Punto16		Punto25	Punto20
Punto16	Punto21		Punto20	Punto14
Punto21	Punto22		Punto14	Punto11
Punto22	Punto23		Punto11	Punto8
Punto23	Punto18		Punto8	Punto5
Punto18	Punto19		Punto5	Estación
Punto19	Punto24		Estación	Patio

Figura V.12. Mapa de recorrido segundo viaje zona 8.



Fuente: Elaboración Propia con Información Software WinQSB.

En la figura V.12. muestra el recorrido que realizara dentro de la zona 8 el vehículo recolector para cumplir con el segundo viaje. En la figura A.2. que se muestra en el anexo, ilustra el recorrido específico desde el centro(estación) de transferencia pasando por los puntos de recolección para luego dirigirse al centro(estación) de transferencia y después al patio.

Para la zona 9, nos mostró el software un resultado de los datos como se ilustra en la figura V.13.

Figura V.13. Matriz de resultados.

11-30-2016	From Node	Connect To	Distance/Cost		From Node	Connect To	Distance/Cost
1	patio	1	2320	25	24	27	159
2	1	2	153	26	27	26	145
3	2	3	107	27	26	25	135
4	3	4	157	28	25	30	333
5	4	5	374	29	30	34	163
6	5	6	180	30	34	33	177
7	6	7	129	31	33	32	103
8	7	8	228	32	32	35	113
9	8	9	109	33	35	39	51
10	9	10	81	34	39	40	141
11	10	11	139	35	40	46	164
12	11	12	461	36	46	45	230
13	12	13	151	37	45	43	198
14	13	14	52	38	43	44	162
15	14	15	104	39	44	42	57
16	15	16	123	40	42	41	128
17	16	17	110	41	41	37	88
18	17	18	145	42	37	38	189
19	18	19	72	43	38	36	281
20	19	20	175	44	36	31	233
21	20	21	471	45	31	29	206
22	21	22	170	46	29	28	129
23	22	23	79	47	28	patio	3061
24	23	24	155				
	<b>Total</b>	<b>Minimal</b>	<b>Traveling</b>	<b>Distance</b>	<b>or Cost</b>	<b>=</b>	<b>12891</b>
	<b>(Result</b>	<b>from</b>	<b>Cheapest</b>	<b>Insertion</b>	<b>Heuristic)</b>		

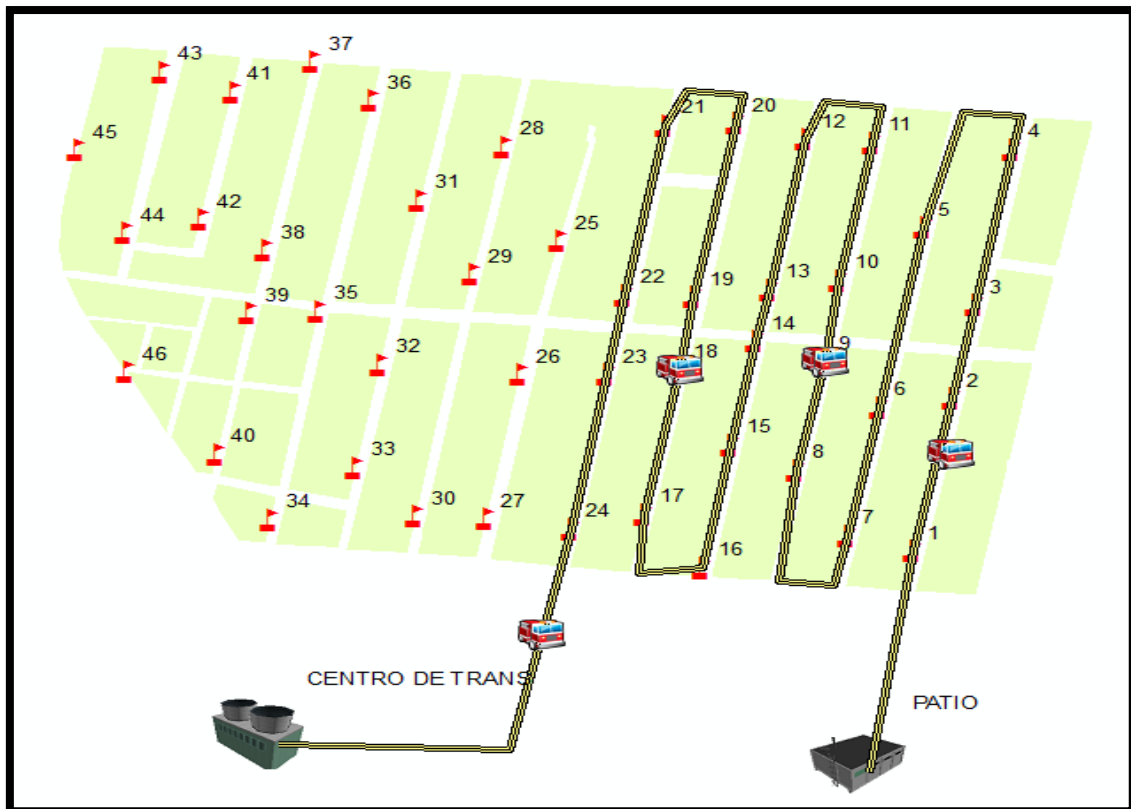
Fuente: Software WinQSB.

En la figura anterior, se puede apreciar el recorrido que tiene que realizar el vehículo recolector dentro de la zona 9, como la unidad de recolección ejecuta dos viajes en un día, el recorrido queda de la siguiente manera.

Primer viaje se realizará bajo la siguiente secuencia de recolección:

Origen	Destino		Origen	Destino
Patio	Punto1		Punto13	Punto14
Punto1	Punto2		Punto14	Punto15
Punto2	Punto3		Punto15	Punto16
Punto3	Punto4		Punto16	Punto17
Punto4	Punto5		Punto17	Punto18
Punto5	Punto6		Punto18	Punto19
Punto6	Punto7		Punto19	Punto20
Punto7	Punto8		Punto20	Punto21
Punto8	Punto9		Punto21	Punto22
Punto9	Punto10		Punto22	Punto23
Punto10	Punto11		Punto23	Punto24
Punto11	Punto12		Punto24	Estación de transferencia
Punto12	Punto13			

Figura V.14. Mapa de recorrido primer viaje zona 9.



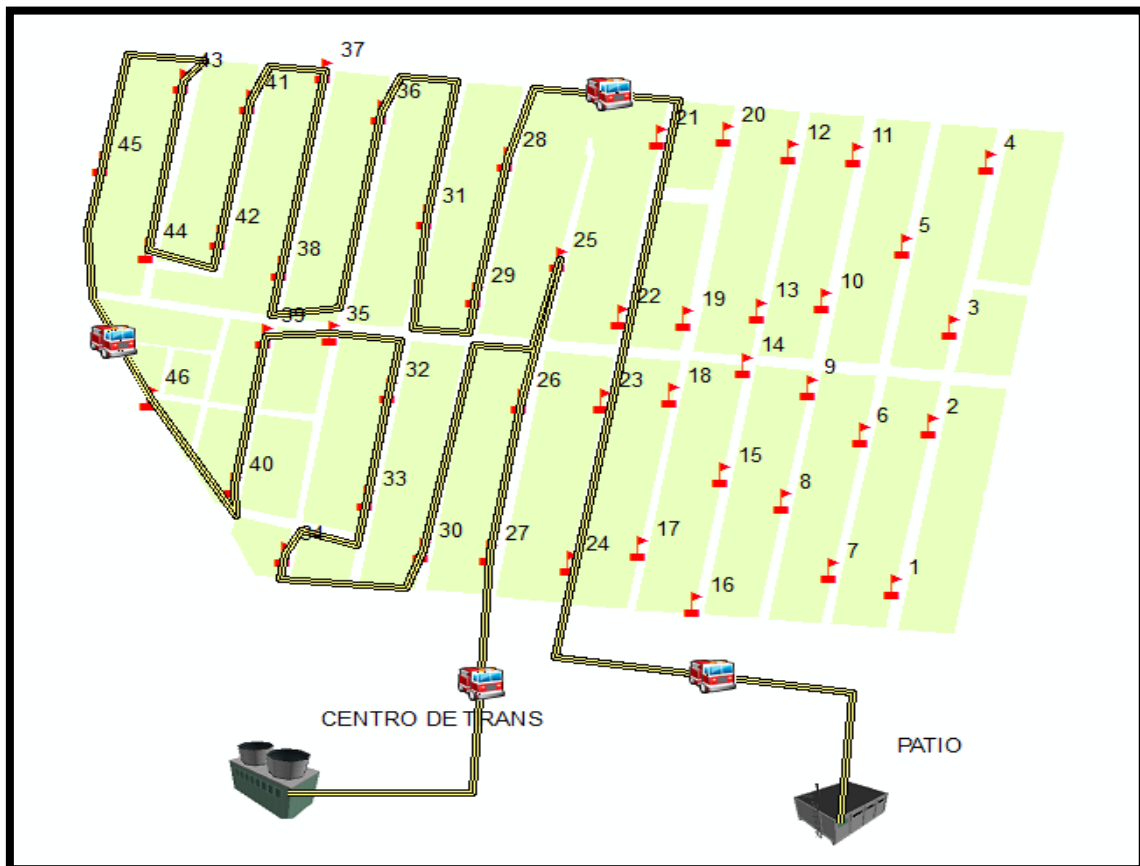
Fuente: Elaboración Propia con Información Software WinQSB.

En la figura V.14. muestra el recorrido que realizara dentro de la zona 9 el vehículo recolector para cumplir con el primer viaje. En la figura A.3. que se muestra en el anexo, ilustra el recorrido específico desde el patio pasando por los puntos de recolección para luego dirigirse al centro(estación) de transferencia.

Segundo viaje se realizará bajo la siguiente secuencia de recolección:

Origen	Destino		Origen	Destino
Estación de transferencia	Punto27		Punto45	Punto43
Punto27	Punto26		Punto43	Punto44
Punto26	Punto25		Punto44	Punto42
Punto25	Punto30		Punto42	Punto41
Punto30	Punto34		Punto41	Punto37
Punto34	Punto33		Punto37	Punto38
Punto33	Punto32		Punto38	Punto36
Punto32	Punto35		Punto36	Punto31
Punto35	Punto39		Punto31	Punto29
Punto39	Punto40		Punto29	Punto28
Punto40	Punto46		Punto28	Estación
Punto46	Punto45		Estación	Patio

Figura V.15. Mapa de recorrido segundo viaje zona 9.



Fuente: Elaboración Propia con Información Software WinQSB.

En la figura V.15. muestra el recorrido que realizara dentro de la zona 9 el vehículo recolector para cumplir con el segundo viaje. En la figura A.4. que se muestra en el anexo, ilustra el recorrido específico desde el centro(estación) de transferencia pasando por los puntos de recolección para luego dirigirse al centro(estación) de transferencia y después al patio.

# CAPÍTULO VI

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 6.1 CONCLUSIONES

Las macrorutas en que es dividida la demarcación en la actualidad, da muestra que hay población sin atender, ya que solo se divide en 61 sectores, en el análisis para realizar una nueva sectorización se tomó en cuenta el número de población de la demarcación, y por tanto, se determina que la demarcación se divida en 65 macrorutas, teniendo sectores más homogéneos, esto es, que englobe la misma cantidad de población para ser atendida.

Se determina el número de camiones recolectores, se toma en cuenta la capacidad de carga de cada camión, el número de vueltas por una jornada laboral y la producción diaria de la delegación Iztacalco, se determina que el número de camiones recolectores es de 65, sin embargo se considera agregar un 15% para alcanzar una eficiencia completa del sistema, y se agrega otro 15% ya que se tendrá que realizar un mantenimiento a los camiones recolectores con ello se asegura que nunca deje de prestar el servicio, dan un resultado, de 85 camiones, que no rebasa la cantidad de 98 camiones con que cuenta la demarcación.

Para la zona 8 y 9, se conoce la red, esto es, la distancia que hay del patio de encierro de los vehículos recolectores hacia cada punto de recolección y las distancias que hay entre cada punto de recolección, con estos datos se hace uso del software WinQSB, se utiliza para el análisis, en su apartado Network Modeling dentro del cual se incluye el Problema del Agente Viajero, el resultado nos muestra cómo se tiene que llevar la recolección, la delegación no cuenta con estudios previos para la comparación, como son los recorridos específicos que realizan los vehículos recolectores, se puede decir que este se puede implementar para ver los beneficios que tendrá.

Se concluye que un sistema de rutas bien diseñado trae como consecuencia que el servicio de recolección y transporte de residuos sea eficiente, basándose en la reducción de costos de operación y mantenimiento, reducción de las distancias muertas, aprovechamiento de la capacidad de los vehículos recolectores y mayor colaboración del personal al darse cuenta que los nuevos recorridos le permiten ahorrar trabajo improductivo.

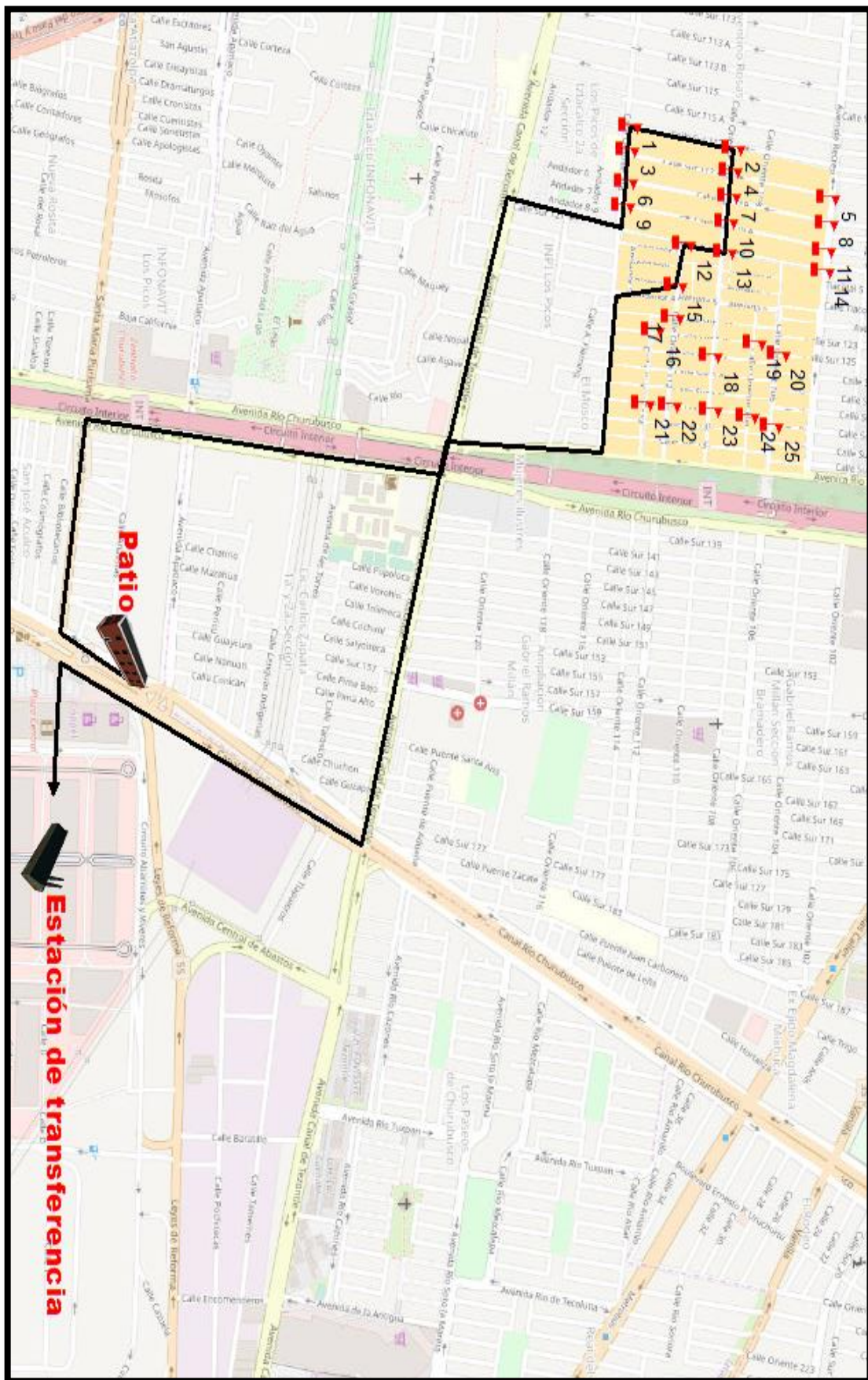
## **6.2 RECOMENDACIONES**

Para la Ciudad de México y por ende para la delegación Iztacalco, se recomienda seguir con las buenas prácticas que han adoptado algunos estados de México como son: Campeche, Durango, Querétaro y Nuevo León que han apostado por dar la concesión para la recolección de residuos sólidos a una empresa, esta empresa se dedica a la recolección domiciliaria manejo integral de los residuos y la construcción y operación de rellenos sanitarios.

Por ejemplo en el estado de Querétaro para la ciudad de Querétaro, se ha encargado de diseñar las rutas de recolección de residuos sólidos e implementación de los horarios y atiende a una población de 900,000 habitantes, la empresa maneja 5 zonas de recolección, cuenta con una página de internet para revisar las zonas de recolección y los horarios de servicio.

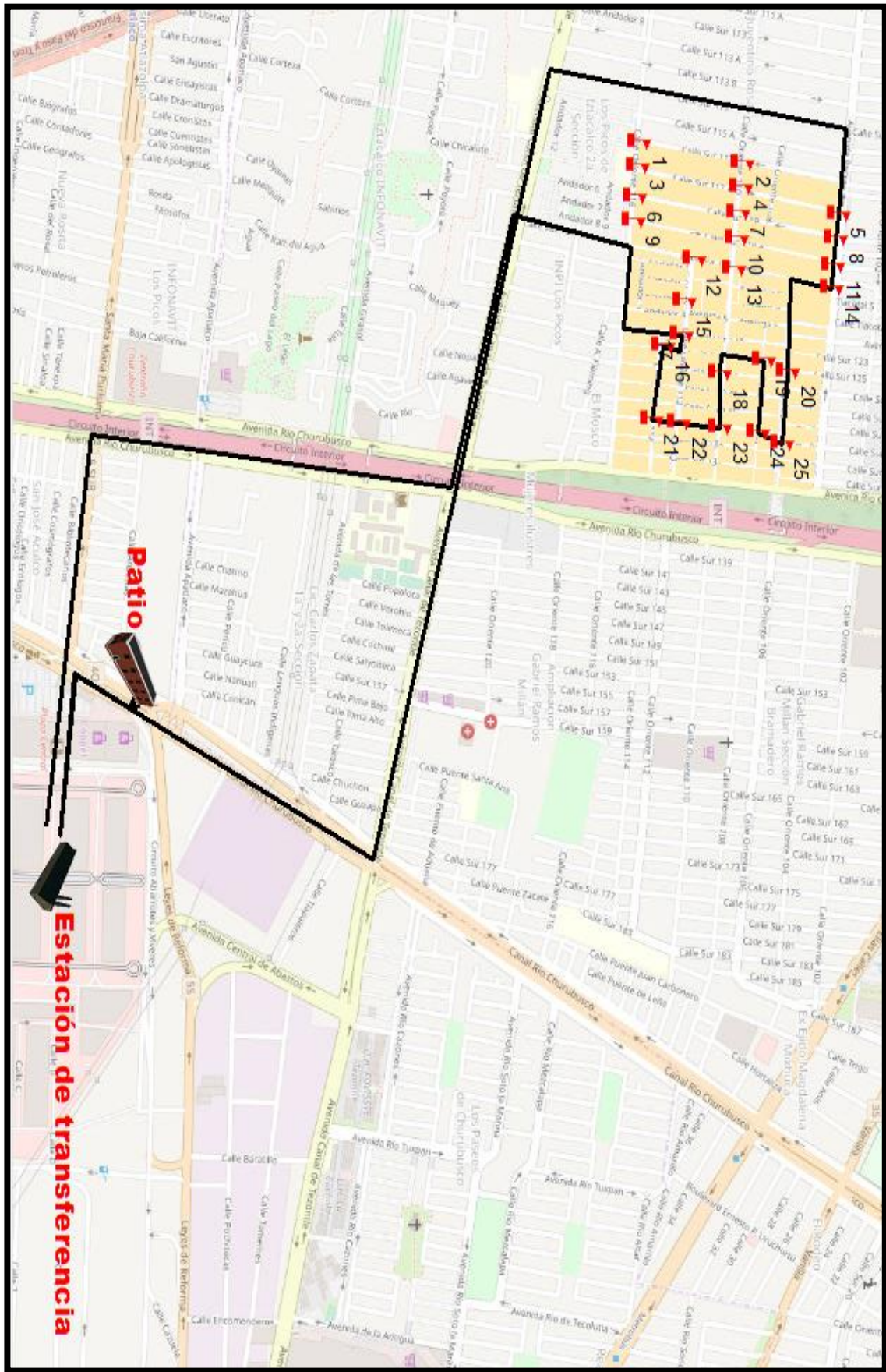
**ANEXO**

Figura A.1. Mapa de recorrido específico del primer viaje zona 8.



Fuente: Elaboración Propia con Información Software WinQSB.

Figura A.2. Mapa de recorrido específico del segundo viaje zona 8.



Fuente: Elaboración Propia con Información Software WinQSB.





#### Fuentes de consulta.

1. Bonomo Flavia et al. (septiembre 2009). Optimización de la Recolección de Residuos en la Zona Sur de la Ciudad de Buenos Aires. Ingeniería en Sistemas, XXIII, 88.
2. Castillo Berthier Héctor F. (1983). La basura de la sociedad: caciquismo urbano en la ciudad de México. México: UNAM, Instituto de investigaciones sociales.
3. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.
4. Gutiérrez Galicia, Francisco. Análisis del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos en el Centro Histórico de Morelia, aplicando sistemas de información geográfica (SIG). Tesis (Maestría en Ingeniería). México D.F, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERIA, 2008, 90 p.
5. INEGI. (2016). Residuos sólidos urbanos. [22 septiembre de 2016], Disponible:<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/sisept/default.aspx?t=mamb1353&s=est&c=35720>.
6. NADF-024-AMBT-2013.
7. NOM-083-SEMARNAT-2003.
8. NOM-087-ECOL-SSA1-2002.
9. Prawda Witenberg Juan. (1987). Métodos y Modelos de Investigación de Operaciones. México: Limusa.
10. Racero, Jesús. Pérez, Edgar. Optimización del sistema de rutas de recolección de residuos sólidos domiciliarios (Ecoeficiencia). En Congreso de Ingeniería de Organización (10º, 2006, Valencia, España).
11. Reyes Reinoso, Raúl. Diseño del Programa de recolección de desechos sólidos domiciliarios para el Municipio de Atizapán de Zaragoza como aplicación del problema del Agente Viajero. Tesis (Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas). México, D.F, INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA. Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", 2005, 63 p.

12. Salvador Vázquez, Carlos. Planificación y optimización de flotas de vehículos para la recogida de residuos urbanos. Tesis (Master en Ingeniería de Sistemas y Control). España, Madrid, Universidad Complutense de Madrid. Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2012, 107 p.
13. SEDEMA. (2017). Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2017. Ciudad de México: SEDEMA.
14. SEDESOL. (2000). Manual de Evaluación de Proyectos para el Servicio de Limpia Municipal. México: SEDESOL.
15. SEDESOL. (2000). Manual para el diseño de rutas de recolección de residuos sólidos municipales. México: SEDESOL.
16. Taha Hamdy A. (2004). Investigación de operaciones, 7a. edición. México: Prentice Hall.
17. Unidad departamental de limpia. DELEGACIÓN IZTACALCO. Ciudad de México, 2016.