



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

**“EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE RUTAS MEDIANTE EL
MODELO TSP Y SIMULACIÓN EN SIMIO, PARA LA
RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE LA
CIUDAD DE ORIZABA”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

PRESENTA:

ING. GLORIA ALBINO MATEO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. MIGUEL JOSUÉ HEREDIA ROLDÁN

CODIRECTOR DE TESIS:

M.I.I. CONSTANTINO GERARDO MORAS SÁNCHEZ



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO

SEPTIEMBRE, 2026



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, **24/septiembre/2026**

Dependencia: **División de Estudios de
Posgrado e Investigación**

Asunto: **Autorización de Impresión**
OPCION: I

C. ALBINO MATEO GLORIA
Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:
INGENIERÍA INDUSTRIAL
PRESENTE

De acuerdo con el reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

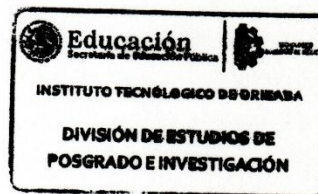
Evaluación y optimización de rutas mediante el modelo TSP y Simulación en SIMIO, para la recolección de residuos sólidos urbanos de la ciudad de Orizaba

Comunico a usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

DR. OSCAR BAEZ SENTIES
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



OBS/JARH

OG-13-F06



2026
año de
**Margarita
Maza**



Av. Oriente 9 #852 Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz
Tel. 01 (272) 1105360 info@orizaba.tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba Veracruz, 5/diciembre/2025

Asunto: Revisión de trabajo escrito

C. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.:

ALBINO MATEO GLORIA

La cual lleva el título de:

Evaluación y optimización de rutas mediante el modelo TSP y Simulación en SIMIO, para la recolección de residuos sólidos urbanos de la ciudad de Orizaba"

y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. MIGUEL JOSUE HEREDIA ROLDAN
SECRETARIO: MII CONSTANTINO G MORAS SANCHEZ
VOCAL: DR. OSCAR BAEZ SENTIES
VOCAL SUP.: M.C. JORGE ARTURO RAMIREZ HERNANDEZ


FIRMA

FIRMA

FIRMA

FIRMA

TA-09-F18



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Oriente 9 #852 Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320
Orizaba, Veracruz Tel. 01 (272) 1105360
e-mail: info@orizaba.tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx



Dedicatorias

Dedico este trabajo a mi familia, especialmente a mis padres, por su amor incondicional, sus enseñanzas y el apoyo constante que me brindaron a lo largo de este camino, motivándome siempre a seguir adelante y a creer en mis capacidades.

De manera muy especial, a mi madre, porque sin ella nada de esto hubiese sido posible. Gracias por no dejarme sola desde aquel momento en que te compartí mi sueño de estudiar una carrera, por creer en mí aun cuando el camino parecía difícil y por impulsarme siempre a no rendirme. Tu amor, esfuerzo y confianza han sido la base fundamental para alcanzar esta meta.

A mis hermanas, porque cada una aportó su granito de arena para que hoy pudiera cumplir este sueño y alcanzar una nueva etapa en mi vida profesional. Gracias por su apoyo, cariño y compañía durante todo este proceso.

A mi esposo, por acompañarme en cada momento, por su paciencia, comprensión y palabras de aliento; por motivarme a superarme cada día y enseñarme que la dedicación, la constancia y el esfuerzo siempre tienen su recompensa.

Finalmente, dedico este logro a todas aquellas personas que confiaron en mí, me brindaron su apoyo y formaron parte de este proceso, contribuyendo de manera significativa al cumplimiento de esta meta académica y personal.

Y sobre todo a ti, mi Señor y Padre celestial, gracias por esta oportunidad y por tu infinita misericordia. Jamás imaginé llegar hasta esta etapa; solo Tú conoces todo el camino recorrido, las dificultades enfrentadas y las veces que me disté fuerzas para continuar. Gracias por tu inmenso amor, por guiar mis pasos y nunca abandonarme.

.

Agradecimientos

De manera especial, agradezco a mi estimado asesor de tesis, el Dr. Miguel Josue Heredia Roldan, por su apoyo incondicional, orientación y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo de investigación. Gracias por sus valiosos consejos, observaciones y recomendaciones, los cuales fueron fundamentales para la culminación de este proyecto académico.

Agradezco también al Maestro Constantino Gerardo Moras, por brindarme las herramientas necesarias, compartir generosamente sus conocimientos y dedicar parte de su tiempo a mi formación y aprendizaje durante este proceso académico.

Asimismo, expreso mi agradecimiento al Ingeniero Rafael y al Honorable Ayuntamiento de Orizaba, por permitirme desarrollar este proyecto y facilitar la información necesaria para llevar a cabo esta investigación.

De igual manera, agradezco sinceramente a todos los trabajadores de las diferentes rutas de recolección, quienes compartieron sus experiencias, conocimientos y apoyo, contribuyendo de manera importante a la realización de este trabajo.

Finalmente, expreso mi sincero agradecimiento al Consejo Veracruzano de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico (COVEICYDET), por brindarme su apoyo durante el proceso de ingreso a la maestría e impulsar mi desarrollo profesional, a través del programa “Mujeres Indígenas Camino a la Ciencia”.

Asimismo, agradezco al SECITHI por la beca otorgada, la cual representó un apoyo fundamental para el desarrollo y culminación de este trabajo de investigación.

Resumen

La gestión de los residuos sólidos urbanos representa uno de los principales retos para las administraciones municipales, debido al crecimiento poblacional, el aumento en los patrones de consumo y la expansión de las zonas urbanas. Estas condiciones generan una mayor cantidad de residuos y, en consecuencia, demandan sistemas de recolección cada vez más eficientes. En la ciudad de Orizaba, Veracruz, el servicio de recolección de residuos se realiza mediante rutas previamente establecidas que, en muchos casos, han sido diseñadas a partir de la experiencia operativa del personal y no necesariamente mediante criterios técnicos de optimización. Esta situación puede ocasionar recorridos innecesarios, mayores tiempos de traslado y un incremento en los costos operativos del servicio.

Ante esta problemática, la presente investigación tiene como objetivo evaluar y optimizar las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos mediante la aplicación del modelo del Problema del Agente Viajero (TSP) y la simulación de eventos discretos utilizando el software SIMIO. Para ello, se realizó un análisis del funcionamiento actual del sistema de recolección en cinco rutas principales del servicio especializado, recopilando información relacionada con tiempos de traslado, tiempos de servicio y secuencia de atención de los puntos de recolección.

A partir de los datos obtenidos se desarrolló un modelo de simulación que permitió representar el comportamiento del sistema y comparar el desempeño de las rutas actuales con rutas optimizadas. Los resultados obtenidos muestran que la aplicación de herramientas de optimización y simulación contribuye a mejorar la eficiencia operativa del servicio, reducir los tiempos de recorrido y favorecer una gestión más eficiente de los recursos utilizados en la recolección de residuos.

En conclusión, el uso combinado de modelos de optimización y simulación constituye una alternativa viable para fortalecer la planeación de los sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos, aportando elementos técnicos que pueden apoyar la toma de decisiones y contribuir a una gestión más sostenible de los servicios públicos municipales.

Abstract

Urban solid waste management has become one of the main challenges faced by municipal governments due to population growth, urban expansion, and increasing consumption patterns. These factors have significantly increased waste generation, creating a greater demand for efficient collection systems. In the city of Orizaba, Veracruz, waste collection services are carried out through pre-established routes that have mainly been designed based on operational experience rather than technical optimization criteria. This situation can lead to unnecessary travel routes, longer collection times, and higher operational costs.

In response to this problem, this research aims to evaluate and optimize urban solid waste collection routes through the application of the Traveling Salesman Problem (TSP) model and discrete-event simulation using SIMIO software. To achieve this, an analysis of the current collection system was conducted across five main specialized service routes, gathering information related to travel times, service times, and collection point sequences.

Based on the collected data, a simulation model was developed to represent the current system behavior and compare the performance of existing routes with optimized alternatives. The results show that the implementation of optimization and simulation tools improves operational efficiency, reduces travel times, and promotes better use of available resources.

In conclusion, the combined use of optimization models and simulation techniques represents a viable alternative for improving urban solid waste collection planning, supporting decision-making processes, and contributing to more sustainable municipal public services.

Contenido

Resumen.....	vi
Abstract.....	vii
Contenido.....	i
Índice de ilustraciones.....	v
índice de figuras.....	vii
Índice de tablas	viii
Introducción	1
Capítulo 1.....	2
1.1 Generalidades	2
1.1.1 Marco geográfico.....	3
1.1.1 Antecedentes históricos	4
1.1.2 Características demográficas	5
1.1.4 Datos económicos	7
1.1.3 Sistema actual de recolección	11
1.1.4 Enfoque estratégico.....	11
1.1.5 Estructura organizacional del área	12
1.1.6 Descripción del proceso de recolección.....	14
2. Asignación de personal y unidades	16
1.2 Planteamiento del problema	18

1.3	Objetivos	19
1.3.1	Objetivo general.....	20
1.3.2	Objetivos específicos	20
1.3.3	Justificación	20
Capítulo 2		22
2.1	Marco Teórico.....	22
2.1	Residuos Sólidos Urbanos (RSU).....	22
2.1.1	Clasificación de los RSU	23
3.	Recolección.....	29
2.1.4	Marco normativo para la gestión de residuos sólidos urbanos	30
2.1.2	Generación de residuos sólidos urbanos en Orizaba.....	33
2.1.3.2	Rellenos sanitarios	35
2.1.3	Requisitos para un Relleno Sanitario.....	38
2.2	Marco normativo mexicano para la gestión de residuos urbanos	40
2.2.1	Proceso de una planta recicladora.....	42
2.4	Estado del arte en optimización de rutas.....	44
2.3	El Problema del Agente Viajero (TSP)	48
2.4	Simulación.....	49
2.4.1	Tipos de simulación	49
2.4.2	Ventajas y desventajas de la simulación.....	50
2.4.3	Desventajas	50
2.4.4	Aplicación de la simulación en logística	50
2.4.5	Metodología de la simulación.....	51
2.4.6	Verificación y validación del modelo de simulación.....	54
2.5	2.4 Problema del Agente Viajero (TSP).....	55

2.5.2	Aplicación del TSP en la Recolección de Residuos Sólidos Urbanos.....	57
2.5.3	Relación del Método Evolutionary de Excel con el TSP.....	58
2.6	Distribuciones de probabilidad.....	58
2.7	Distribuciones discretas.....	62
2.8	Pruebas de bondad de ajuste.....	64
2.9	Software Simio.....	65
2.9.1	Características.....	66
Capítulo 3	Metodología.....	67
3.1	Formulación del problema.....	68
3.2	Recopilación de datos y definición del modelo.....	68
3.2.1	Ruta Norte.....	70
3.2.2	Ruta orgánica.....	71
3.2.3	Ruta sur.....	73
3.2.4	Ruta Centro.....	74
3.2.5	Calle real.....	76
3.3	Validación del modelo.....	77
3.4	Construcción del modelo.....	78
3.4.1	Modelo de simulación en Simio de la Ruta Norte.....	81
3.4.2	Modelo de simulación en Simio de la Ruta Orgánica.....	83
3.4.3	Modelo de simulación en Simio de la Ruta Real.....	84
3.4.4	Modelo de simulación en Simio de la Ruta sur.....	86
3.4.5	Modelo de simulación en Simio de la Ruta Centro.....	87
3.5	Ejecución de pruebas pilotos.....	88
3.6	Validación del modelo programado.....	89
3.7	Validación del modelo de la Ruta Real.....	91

3.8	Diseño de experimentos	93
3.9	Ejecución de simulación.....	93
3.10	Análisis de los datos de salida	94
Capítulo 4	Análisis de alternativas	95
4.1	Optimización de rutas.....	96
4.2	Resultados de la optimización de rutas.	109
Capítulo 5.....		111
Conclusiones		111
Referencias.....		113
Anexos		117

Índice de ilustraciones

Ilustración 1.1 Vista de la ciudad Ubicación geográfica del municipio de Orizaba	4
Ilustración 1.2 Distribución de la Población de Orizaba por edad y sexo	6
Ilustración 1.3. Evolución del crecimiento poblacional de Orizaba del año 1995-2020	6
Ilustración 1.4. Tasa de crecimiento media poblacional de Orizaba Fuente	7
Ilustración 1.5. Escoba de oro Orizaba	10
Ilustración 1.6, Entrega de premio al ayuntamiento de Orizaba fuente	10
Ilustración 2.1. Clasificación, reciclaje y valoración de los RSU	24
Ilustración 2.2. cantidad de promedio diaria de residuos recolectados.....	26
Ilustración 2.3. Promedio diario de residuos sólidos urbanos recolectados en México.	28
Ilustración 2.4. Ciclo del manejo de residuos sólidos urbanos.	32
Ilustración 2.5. Disposición final de los RSU.....	36
Ilustración 2.6. Beneficios del relleno sanitario.....	39
Ilustración 2.7 Inauguración planta ECORI.....	43
Ilustración 3.1. Mapa del recorrido de la Ruta Norte del Servicio Especializado	71
Ilustración 3.2. Mapa del recorrido de la Ruta orgánica.	73
Ilustración 3.3 Mapa de recorrido de la Ruta Sur.	74
<i>Ilustración 3.4. Mapa del recorrido de la Ruta Centro.....</i>	<i>76</i>
Ilustración 3.5. Mapa del recorrido de la Ruta Calle Real.....	77
Ilustración 3.6. Interfaz principal de Simio	79
Ilustración 3.7 Pestaña Darwin, para cargar elementos	80
Ilustración 3.8, Mapa guía para desarrollo del modelo	81
Ilustración 3.9 Modelo ruta norte.....	82
Ilustración 3.10 Modelo 3D en Simio	83
Ilustración 3.11 Simulación de la ruta Orgánica.	84
Ilustración 3.12 Simulación ruta Real	86
Ilustración 3.13 Simulación Ruta Sur	87
Ilustración 3.14 Simulación Ruta Centro	88
Ilustración 4.1 Matriz de distancia de la ruta norte.....	96
Ilustración 4.2 Ventana de optimización de solver.....	97
Ilustración 4.3 Resultado de procesamiento de datos de la Ruta norte.....	98

Ilustración 4.4 Recorrido de la ruta norte.	98
Ilustración 4.5 Resultados de desempeño operativo de la Ruta Norte.	99
Ilustración 4.6 Tiempo promedio en el sistema.	99
Ilustración 4.7 matriz de distancia de la Ruta Real.....	100
Ilustración 4.8 Recorrido simulado en Simio de la Ruta Real optimizada..	101
Ilustración 4.9 Resultados del procesamiento de datos de la Ruta Real en Simio.....	102
Ilustración 4.10 Matriz de distancia de la Ruta Sur.	103
Ilustración 4.11 Simulación de la Ruta Real optimizada.....	103
Ilustración 4.12 Desempeño operativo de la Ruta Sur.....	104
Ilustración 4.13 Tiempo promedio en el sistema Ruta Sur.....	104
Ilustración 4.14 Matriz de distancia de la Ruta Orgánica.	105
Ilustración 4.15 Simulación de la Ruta Orgánica optimizada.....	106
Ilustración 4.16 Promedio en el sistema sistema Ruta Orgánica.	106
Ilustración 4.17 Simulación de la Ruta Centro optimizada.	108
Ilustración 4.18 Promedio en el sistema Ruta Centro.....	108
Ilustración 4.19 Promedio de utilización en el sistema.....	109

índice de figuras

Figura 1.1 Organigrama del área de Limpia publica	13
Figura 1.2 Proceso de recolección de servicios especializados.	18
Figura 2.1. Sistema que conforma el proceso del sistema de una planta recicladora	42
<i>Figura 3.1. Software QGIS</i>	79

Índice de tablas

Tabla 1.1. Empleo 2020	8
Tabla 1.2. Funciones de las unidades de recolección, ...	14
Tabla 2.1. Acciones en materia ambiental 2015	35
Tabla 2.2 Rellenos Sanitarios de desechos sólidos reportados por los ayuntamientos.....	37
Tabla 2.3 Estado del arte.....	44
Tabla 2.4 Distribuciones continuas y sus características	60
Tabla 2.5 Distribuciones discretas y sus características	62
Tabla 2.6 Principales pruebas de bondad de ajuste.....	64
Tabla 2.7 Elementos del simulador	66
Tabla 3.1. datos recolectados de la ruta Norte	70
Tabla 3.2. Datos recolectados de la Ruta Orgánica	72
Tabla 3.3 Datos recolectados de la Ruta Sur	73
Tabla 3.4. Datos recolectados de la Ruta Centro	75
Tabla 3.5 Datos recolectados de la Ruta Calle Real	76
Tabla 3.6. Corridas piloto de rutas en SIMIO.....	89
Tabla 3.7 Corridas piloto de rutas en SIMIO.....	89
Tabla 3.8 Validación del MSE de la Ruta Real	92
Tabla 3.9 Prueba t-pareada de la Ruta Real.....	94

Introducción

En la actualidad, el manejo integral de los residuos sólidos urbanos (RSU) constituye uno de los principales retos para los gobiernos municipales, derivado del crecimiento demográfico, la expansión urbana y los cambios en los patrones de consumo. Estos factores han provocado un aumento considerable en la cantidad de residuos producidos, ocasionando una mayor demanda de vehículos, personal y tiempo de operación. En este sentido, la adecuada planeación de los recorridos adquiere una especial importancia debido a que la distribución y secuencia de los puntos de recolección puedan influir en el desempeño y aprovechamiento de los recursos disponibles

En México, los municipios son responsables de garantizar la correcta recolección, transporte y disposición de los residuos sólidos urbanos, de acuerdo con el marco normativo aplicable. Sin embargo, la operación de estos servicios implica importantes gastos relacionados con el consumo de combustible, mantenimiento de las unidades recolectoras y recursos humanos necesarios para su funcionamiento. Debido a ello, resulta indispensable implementar estrategias que permitan aprovechar de manera eficiente los recursos disponibles y mejorar el desempeño operativo de los sistemas municipales.

En este contexto, la ciudad de Orizaba cuenta con un programa denominado “Servicios Especializados”, encargado de la recolección de residuos generados principalmente por establecimientos comerciales que requieren horarios específicos de atención. El servicio opera mediante diferentes rutas de recolección cuya planeación se ha desarrollado principalmente a partir de la experiencia del personal operativo. Esta condición limita la evaluación objetiva de las alternativas de recorrido, debido a que no se cuenta con un procedimiento que permita determinar las secuencias de visita más eficientes para los puntos de recolección

Como consecuencia, se generan recorridos innecesarios, más tiempo en el traslado y utilización elevada de las unidades recolectoras. Además, la falta de una adecuada planificación puede ocasionar una utilización ineficiente de las unidades recolectoras y una disminución en el desempeño general del sistema de recolección.

Para abordar la problemática planteada, la investigación integra dos etapas de análisis. En la primera, se emplea el Problema del Agente Viajero (TSP) para determinar una configuración alternativa de las rutas a partir de la secuencia de atención de los puntos de recolección. En la segunda, las alternativas obtenidas son incorporadas al modelo de simulación desarrollado en Simio, con el propósito de comparar su comportamiento respecto a las condiciones actuales del sistema.

El estudio se desarrolló de a partir de la información obtenida durante la operación real del servicio de recolección con la finalidad de caracterizar las condiciones bajo las cuales se llevan a cabo los recorridos e identificar oportunidades de mejora. Con los datos recopilados se construyeron las matrices de distancias correspondientes a los puntos de recolección y, posteriormente, se determinaron secuencias alternativas mediante el método Evolutionary Solver de Microsoft Excel, orientado a la solución del Problema del Agente Viajero (TSP).

Posteriormente, las rutas propuestas fueron evaluadas mediante distintos escenarios de simulación en Simio, lo que permitió analizar indicadores relacionados con el tiempo promedio en el sistema y el porcentaje de utilización de los recursos. De esta manera, la investigación busca demostrar la viabilidad de aplicar herramientas de optimización y simulación como apoyo en la toma de decisiones para mejorar los sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos.

Capítulo 1

1.1 Generalidades

La ciudad de Orizaba se localiza en la región centro del estado de Veracruz, presenta una altitud aproximada de 1,230 metros sobre el nivel del mar y un clima predominantemente húmedo, con una temperatura media anual cercana a los 22 °C.

A lo largo de los años, Orizaba ha destacado por su importancia histórica, comercial y turística dentro del estado. Su crecimiento urbano y el fortalecimiento de las actividades económicas han favorecido el desarrollo de infraestructura y servicios en la ciudad. En reconocimiento a su

riqueza cultural, arquitectónica y turística, en 2015 fue incorporada al programa Pueblos Mágicos, distinción otorgada por la Secretaría de Turismo.

De acuerdo a Sectur (2019) los principales atractivos turísticos y culturales de la ciudad son el Palacio de Hierro, la Catedral de San Miguel Arcángel, el Cerro del Borrego, el Museo de Arte del Estado y el Polifórum Mier y Pesado, espacios que han contribuido al incremento de la actividad turística y comercial en la región.

A su vez el crecimiento económico y urbano, también ha generado una mayor demanda de servicios públicos, particularmente en actividades relacionadas con la limpieza urbana y la recolección de residuos sólidos urbanos, lo que representa un reto importante para la administración municipal en términos operativos y de planeación.

1.1.1 Marco geográfico.

El municipio de Orizaba cuenta con una extensión territorial aproximada de 27.97 km² y se localiza en la región centro del estado de Veracruz, dentro del valle del Pico de Orizaba. Su ubicación geográfica le permite formar parte de la zona conocida como las Altas Montañas. El municipio limita al norte con el municipio de Ixhuatlancillo, al sur con Rafael Delgado, al este con Ixtaczoquitlán y al oeste con Mariano Escobedo.

El nombre de Orizaba tiene origen en la palabra náhuatl “Ahuilizapan”, término relaciona con la abundancia de agua de la región y que se interpreta como “en agua o sobre el agua” dando el significado de “Lugar de aguas alegres”. (Sectur, 2019). Esta característica histórica y geográfica ha contribuido a la identidad cultural y al desarrollo de la ciudad a lo largo del tiempo.

En la Figura 1 se presenta la ubicación geográfica del municipio de Orizaba dentro del estado de Veracruz, así como sus principales colindancias territoriales. En la Ilustración 1.1 permite identificar la localización estratégica de la ciudad en la región de las Altas Montañas y su relación con los municipios circundantes.



*Ilustración 1.1 Vista de la ciudad Ubicación geográfica del municipio de Orizaba
(Fuente: INEGI 2000)*

1.1.1 Antecedentes históricos

La ciudad de Orizaba, Veracruz, posee una trayectoria histórica vinculada con el desarrollo social, económico y cultural de la región de las Altas Montañas. Su ubicación geográfica, caracterizada por la disponibilidad de recursos hídricos y su conexión con diferentes vías de comunicación, favoreció desde épocas tempranas el establecimiento y desarrollo de asentamientos humanos en la zona.

Durante el periodo virreinal, Orizaba adquirió relevancia debido a su ubicación dentro de la ruta comercial que conectaba el centro del país con el Puerto de Veracruz. Esta condición favoreció el intercambio de mercancías y el crecimiento de actividades económicas relacionadas principalmente con la agricultura, el comercio y posteriormente la industria.

Con el transcurso del tiempo, el municipio de Orizaba experimentó una transformación de sus actividades económicas, pasando de una dinámica vinculada principalmente con las actividades agropecuarias hacia un proceso de desarrollo comercial e industrial. Entre las actividades agrícolas de relevancia histórica se encuentra el cultivo de la caña de azúcar, mientras que posteriormente el establecimiento de actividades industriales y comerciales contribuyó a fortalecer la importancia económica de la ciudad dentro de la región.

En la actualidad, Orizaba mantiene una dinámica económica relacionada con los sectores comercial, de servicios y turístico, actividades que han contribuido a la transformación de su

estructura urbana y a la consolidación de la ciudad como un punto de importancia regional. El crecimiento de estas actividades también se relaciona con una mayor demanda de servicios públicos y con las necesidades derivadas de la concentración de establecimientos comerciales y de la actividad urbana. (Sectur, 2019).

Este crecimiento urbano y económico ha generado nuevas necesidades en materia de infraestructura y servicios, particularmente en actividades relacionadas con la limpieza urbana y la recolección de residuos sólidos urbanos.

1.1.2 Características demográficas

De acuerdo con información del INEGI (2020), y del Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Veracruz, el municipio de Orizaba cuenta con una población aproximada de 123 mil habitantes, integrada por hombres y mujeres distribuidos en diferentes grupos de edad.

La estructura demográfica del municipio presenta una importante concentración de población joven, principalmente en edades comprendidas entre los 10 y 24 años, sector que representa una proporción significativa del total de habitantes. Esta dinámica poblacional influye directamente en el crecimiento urbano comercial y de servicios dentro de la ciudad.

Así mismo el crecimiento poblacional y la expansión de las actividades urbanas generan una mayor demanda de servicios públicos municipales, particularmente en actividades relacionadas con la limpieza urbana y la recolección de residuos sólidos urbanos.

En la Figura 1. 2 se presenta la distribución de la población del municipio de Orizaba edad y sexo

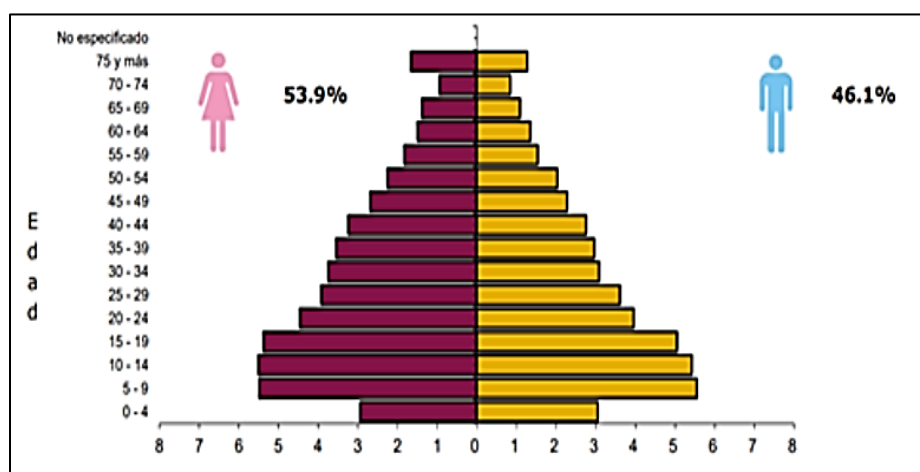


Ilustración 1.2 Distribución de la Población de Orizaba por edad y sexo (Fuente INEGI 2020)

Como base la información presentada, se observar la población femenina una mayor proporción en comparación con los datos masculinos así mismo en relación con el año 2010, el municipio registro un crecimiento poblacional aproximado del 1.81%.

A su vez el crecimiento poblacional de Orizaba en el transcurso de los años comprendidos desde el año 1995 al 2020 se muestra en la Ilustración 1 mientras que en la ilustración 2 se observa la tasa de crecimiento.

Por otra parte, el comportamiento de crecimiento poblacional del municipio durante el periodo comprendido entre 1995 y 2020 se muestra en la Ilustración 1, mientras que en la ilustración 2 presenta la evolución de la tasa de crecimiento poblacional registrada durante dicho periodo.

EVOLUCIÓN DE LA POBLACIÓN				
Año	Total	Hombres	Mujeres	Proporción estatal (%)
2020	127,145	58,856	68,289	1.53
2015	126,005	57,660	68,345	1.55
2010	120,995	55,845	65,150	1.58
2005	117,289	54,392	62,897	1.65
2000	118,593	55,203	63,390	1.72
1995	114,425	53,943	60,482	1.70

Ilustración 1.3. Evolución del crecimiento poblacional de Orizaba del año 1995-2020 Fuente:(SIEGVER, 2020)

TASA DE CRECIMIENTO MEDIA	
Periodo	Tasa (%)
2010-2015	0.86
2005-2010	0.67
2000-2005	-0.19
1995-2000	0.84

Ilustración 1.4. Tasa de crecimiento media poblacional de Orizaba Fuente (SIEGVER, 2020)

De acuerdo con el análisis de la información, el municipio de Orizaba presentó variaciones en su tasa de crecimiento poblacional a lo largo de los diferentes periodos analizados. El mayor crecimiento se registró durante el periodo 2010–2015, con una tasa de 0.86 %, mientras que entre los años 2000 y 2005 se presentó una disminución poblacional de -0.19 %.

Aunque las tasas de crecimiento registradas no representan incrementos elevados, el comportamiento demográfico del municipio ha contribuido al desarrollo urbano y al fortalecimiento de las actividades económicas y de servicios. Esto se debe, principalmente, a la presencia de instituciones educativas, establecimientos comerciales y empresas ubicadas tanto en la ciudad como en municipios cercanos, lo que genera un importante desplazamiento poblacional proveniente de distintas regiones del estado de Veracruz y de otras entidades del país.

1.1.4 Datos económicos

En el ámbito económico, el municipio de Orizaba se caracteriza por el predominio de actividades comerciales y de prestación de servicios, sectores que representan una parte importante de la economía local y contribuyen al desarrollo urbano de la ciudad.

De acuerdo con información del Censo Económico 2019 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, las unidades económicas con mayor presencia en el municipio corresponden al comercio al por menor, con 4,171 establecimientos registrados.

Asimismo, destacan los negocios relacionados con los servicios de alojamiento temporal y preparación de alimentos y bebidas, con 1,771 unidades, así como otros servicios, que concentran 1,135 establecimientos.

El crecimiento de las actividades comerciales y de servicios ha generado un incremento en la producción de residuos sólidos urbanos, especialmente en establecimientos como hoteles, mercados y comercios donde diariamente se generan residuos sobre todo en las principales zonas con mayor concentración económica y afluencia de personas.

Para comprender más el tema del crecimiento económico en la siguiente sección se presenta la Tabla 1. se presentan los principales indicadores económicos del municipio de Orizaba, es decir respecto a la población económicamente activa y no activa respecto de las personas a partir de los 12 años en adelante.

Tabla 1.1. *Empleo 2020 Fuente: (PMD, 2020)*

Indicador	Valor
Población de 12 años y mas	104,031
Población económicamente activa	60,253
PEA ocupada	58,727
Sector primario	0.4%
Sector secundario	16.7%
Sector terciario	80.0%
No especificado	2.9%
PEA desocupada	1,526
Población no económicamente activa	43,634
Estudiantes	15,061
Quehaceres del hogar	15,603
Jubilados y pensionados	9,000
Incapacitados permanentes	1,407
Otro tipo	2,563
Tasa de participación económica	57.9%
Tasa de ocupación	97.5%

Mientras que en la Figura 1. presenta la distribución porcentual de las principales actividades económicas y de servicios en el municipio de Orizaba, destacando el predominio del comercio al por menor como el sector con mayor participación. Asimismo, se observa una importante presencia de los servicios de alojamiento temporal y consumo de alimentos y bebidas, entre otros servicios relacionados con la atención a la población y visitantes. Esta distribución permite identificar las actividades que impulsan la dinámica económica y urbana del municipio, evidenciando la relevancia del sector terciario en el desarrollo local.

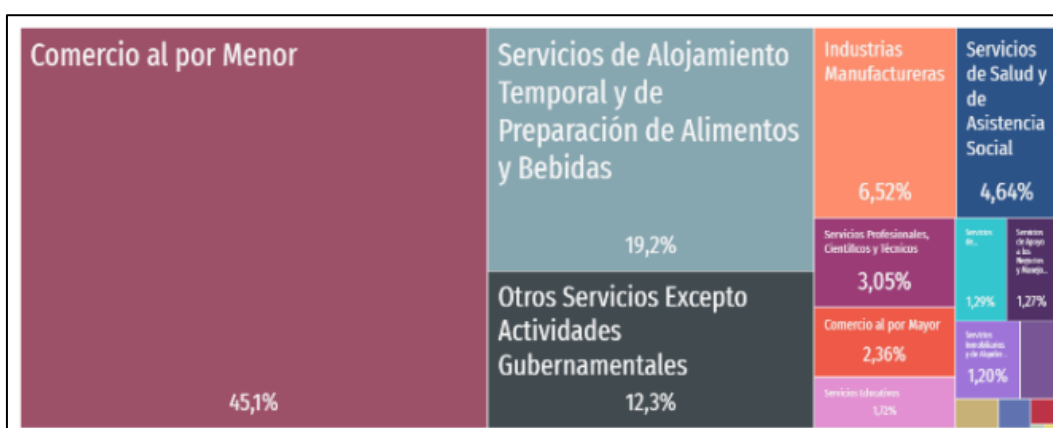


Figura 1.1 Distribución en porcentaje de demanda de servicio (Fuente PMD Orizaba 2020)

Además del desarrollo económico y urbano el municipio de Orizaba también destaca por las acciones implementadas en materia ambiental. En este sentido se caracteriza por la implementación de diversas estrategias enfocadas en el cuidado del medio ambiente como lo es la limpieza urbana y el manejo de residuos por lo que estas acciones la han brindado el municipio grandes reconocimientos entre los que destacan la Escoba de Plata y oro que se muestran en la Ilustración 1.5.



Ilustración 1.5. Escoba de oro Orizaba, Fuente: (Mexico Desconocido, 2026)

Mientras que en la ilustración 4 se muestra la Escoba de Platino obtenida en el año 2024



Ilustración 1.6, Entrega de premio al ayuntamiento de Orizaba fuente (El Sol de orizaba, 2020)

Estos reconocimientos posicionan a Orizaba como uno de los municipios más limpios y comprometidos en la sustentabilidad del estado de Veracruz, por lo que el ayuntamiento continúa impulsando programas y acciones promoviendo la participación de la sociedad en actividades que fortalecen el fortalecimiento de la cultura ambiental.

1.1.3 Sistema actual de recolección

Como parte de sus estrategias de limpieza urbana, el municipio opera un programa denominado Servicio Especializado, orientado a la recolección de residuos generados por establecimientos comerciales e instituciones que requieren horarios específicos.

Este servicio se organiza mediante cinco rutas principales:

Norte

Sur

Centro

Calle Real

Orgánica

Las cuales cubren diferentes zonas del municipio. Sin embargo, la planeación de estas rutas se ha desarrollada principalmente con base en la experiencia operativa del personal, lo que ha generado ineficiencia en los recorridos tales como tiempos de traslado y trayectos innecesarios.

1.1.4 Enfoque estratégico

Misión

Promover una cultura en la población sobre la generación y recolección de residuos sólidos no peligrosos con la finalidad de ayudar al medio ambiente mediante su correcta gestión para brindar una imagen limpia a la ciudad.

Visión

Ser una ciudad que mantenga un modelo a seguir conservando el título de la ciudad más limpia y ser un punto de referencia en la eficacia de la recolección de Residuos Sólidos Urbanos y Barrido Manual.

Valores empresariales

El ayuntamiento de la ciudad de Orizaba, Veracruz destaca los siguientes valores

Compromiso

Integridad

Disciplina

Lealtad

Pasión

1.1.5 Estructura organizacional del área

La coordinación de Limpia Pública del municipio de Orizaba cuenta con una plantilla de 238 trabajadores distribuidos en distintas áreas operativas y administrativas. Entre las principales áreas que integran la coordinación se encuentra el parque vehicular, la gestión comercial, la planta ECORI y el departamento encargado de la recolección, siendo este último el que concentra la mayor parte del personal operativo.

El área de recolección se organiza mediante cuadrillas de trabajo asignadas de acuerdo con las funciones y rutas correspondientes. La mayor parte del personal desempeña actividades en turno vespertino y matutino, con excepción a Rutas de Recolección que cuenta con turnos vespertino, matutino y nocturno, con el propósito de atender las necesidades del sistema y garantizar la cobertura del servicio.

La estructura operativa de la coordinación de Limpia Pública se describe de la siguiente manera:

Abejas (4)

Hormigas (21)

Barridos (79)

Basura y predial (6)

Descacharrización y voluminosos (2)

Rutas de recolección (96)

Actualmente, las cuadrillas con mayor número de personal corresponden al área de rutas de recolección, con 96 integrantes, equivalente al 40.33 % del total de trabajadores de la coordinación. Esta área cuenta con 18 camiones recolectores destinados a las actividades de recolección de residuos sólidos urbanos dentro del municipio.

Por otra parte, el área de barridos concentra 79 trabajadores, representando el 33.20 % del personal total, quienes se encargan principalmente de las actividades de limpieza urbana y barrido fino en las diferentes zonas de la ciudad.

La distribución del personal operativo permite atender las actividades relacionadas con la limpieza urbana, recolección y manejo de residuos sólidos urbanos en el municipio. En la Figura 1.1 Figura 1. se presenta la descripción detallada de las funciones correspondientes a cada una de las áreas que integran la coordinación de Limpia Pública.

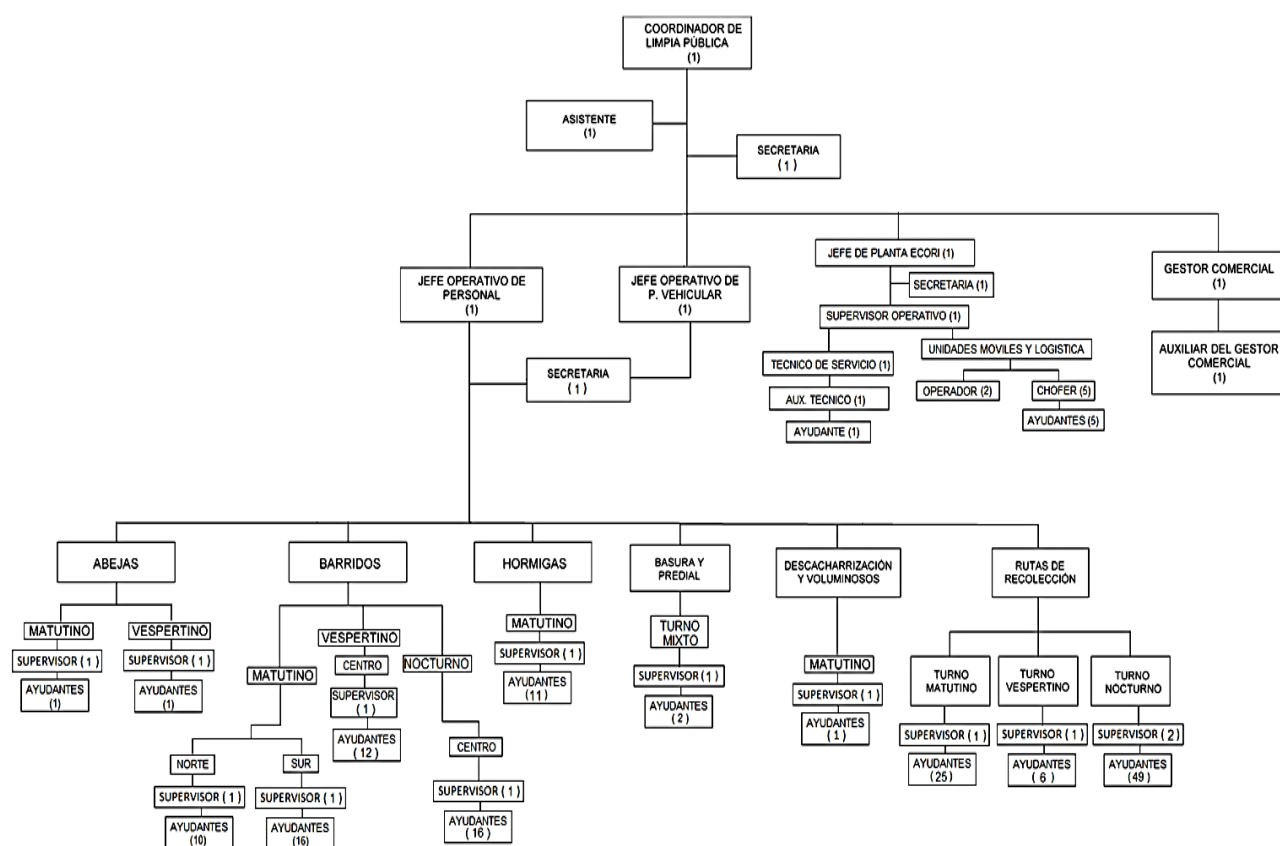


Figura 1.1 Organigrama del área de Limpia pública Fuente (Ayuntamiento de Orizaba, 2022)

1.1.6 Descripción del proceso de recolección

El proceso de recolección de residuos sólidos urbanos en el municipio de Orizaba inicia en las instalaciones de la Planta ECORI, lugar donde el personal operativo se concentra previo al inicio de las actividades correspondientes a las rutas asignadas.

El sistema de recolección opera mediante tres turnos: matutino, vespertino y nocturno. Los turnos matutino y vespertino brindan atención principalmente a comercios, oficinas, industrias, restaurantes y centros de salud, mientras que el turno nocturno se destina principalmente a la recolección de residuos domiciliarios o de casa habitación.

Como parte de este sistema opera, el programa denominado Servicio Especializado, orientado a la atención de comercios e instituciones que realizan una aportación económica por la prestación del servicio de recolección. Este programa se encuentra conformado por cinco rutas principales denominadas Norte, Sur, Centro, Calle Real y Orgánica, las cuales cubren diferentes sectores del municipio de acuerdo con las necesidades de recolección existentes.

El funcionamiento del servicio requiere la participación coordinada de diferentes puestos operativos y administrativos encargados coordinar, supervisar, ejecutar y dar seguimiento a las relacionadas con las actividades de recolección y transporte de residuos sólidos urbanos.

En la Tabla 1.2 se presentan las funciones principales de las unidades y del personal involucrado en el proceso de recolección.

Tabla 1.2. Funciones de las unidades de recolección, Fuente: (Ayuntamiento de Orizaba, 2022)

Puesto	Funciones
Supervisor	Proporcionar lista de asistencia Coordinar al personal operativo de las respectivas rutas de recolección (asignar operador, ayudantes y unidad a cada zona).

	Registrar el kilometraje proporcionado por el responsable de ruta(operador/chofer), entregando tarjeta y/o cuponera para cargar gasolina en caso de ser necesario. Mantener comunicación constante con el personal para atender situaciones no previstas, realizar recorridos en las diferentes zonas para corroborar el correcto flujo de las operaciones.
Operador	Hacer una evaluación diaria del estado y funcionamiento de la unidad asignada manteniéndola limpia y en buen estado. Supervisar que el personal cumpla con sus responsabilidades de acuerdo con las actividades asignadas, evaluando el desempeño de cada trabajador. Realizar la identificación y seguimiento a puntos de recolección críticos de disposición de basura en la ciudad. Llenar los reportes de cumplimiento. Verificar que los desechos recolectados correspondan con el programa de recolección. Transportar al sitio de transferencia los residuos recolectados en la ruta
Auxiliar	Cumplir de manera correcta con las tareas encomendadas por el jefe inmediato. Reportar al jefe inmediato los incidentes o problemas que se presenten o detecten durante su labor. Mantener el orden y el respeto en los espacios donde labore. Revisar que el parque vehicular este en buenas condiciones.

Como se observa en la Tabla 2, cada puesto desempeña funciones específicas que permiten mantener una adecuada coordinación dentro del proceso. La distribución de responsabilidades

facilita el control operativo de las rutas, la supervisión del personal y el correcto manejo de las unidades recolectoras.

A continuación, se describe el procedimiento operativo del sistema de recolección de residuos.

1. Registro de asistencia

La jornada laboral inicia con el registro de asistencia del personal operativo mediante una lista de control proporcionada por el supervisor en turno, lo que permite llevar un seguimiento del personal asignado a cada ruta de trabajo.

2. Asignación de personal y unidades

Posteriormente, el supervisor realiza la asignación del personal y de las unidades recolectoras correspondientes a cada zona de servicio. Generalmente, cada cuadrilla se integra por un operador y dos auxiliares recolectores. Los operadores suelen mantenerse en rutas específicas con la finalidad de facilitar el conocimiento del recorrido, mientras que los auxiliares pueden rotarse entre distintas unidades según las necesidades del servicio.

3. Verificación de la unidad y equipo de protección personal

Antes de iniciar el recorrido, el operador responsable debe verificar las condiciones generales del funcionamiento del vehículo recolector, así como confirmar que el personal cuente con el equipo de protección personal (EPP) y los señalamientos necesarios para realizar las actividades de manera segura. En caso de detectar alguna falla mecánica o irregularidad, esta debe ser reportada inmediatamente al supervisor correspondiente.

4. Entrega de combustible y control de kilometraje

El supervisor proporciona la tarjeta y la cuponera destinada al abastecimiento de combustible del vehículo asignado, en caso de ser necesario durante la jornada laboral. De manera general, las unidades reciben una carga aproximada de 100 litros de combustible y el abastecimiento completo se realiza los días semanalmente, principalmente los días viernes. Asimismo, se registra el kilometraje inicial de la unidad para mantener un control operativo.

5. Salida de la unidad hacia la zona de recolección

Una vez concluida las verificaciones correspondientes, el vehículo recolector sale del parque vehicular hacia la zona asignada para iniciar el servicio programado de recolección.

6. Recolección de residuos sólidos urbanos

Durante el recorrido, la unidad atiende a los diferentes puntos de recolección establecidos conforme a la programación de cada ruta. Algunos establecimientos manejan horarios específicos de atención debido al tipo de actividad que realizan, principalmente restaurantes, comercios y empresas localizadas en la zona industrial.

7. Descarga de la unidad

Al concluir la jornada laboral, el vehículo recolector regresa a la base operativa para realizar la descarga de los residuos recolectados, dejando la unidad disponible para el siguiente turno de trabajo.

8. Entrega de turno y reporte de actividades

Finalmente, el personal operativo entrega el reporte correspondiente de las actividades realizadas, informando el kilometraje recorrido, el consumo de combustible y cualquier incidente presentado durante la operación.

El desarrollo de esta actividad permite mantener el funcionamiento del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos del municipio. No obstante, aún existen áreas de oportunidad relacionadas con la optimización de rutas, la reducción de tiempos de traslado y el mejor aprovechamiento de los recursos operativos disponibles.

El procedimiento operativo descrito anteriormente se presenta de manera grafica en Figura 1.2.

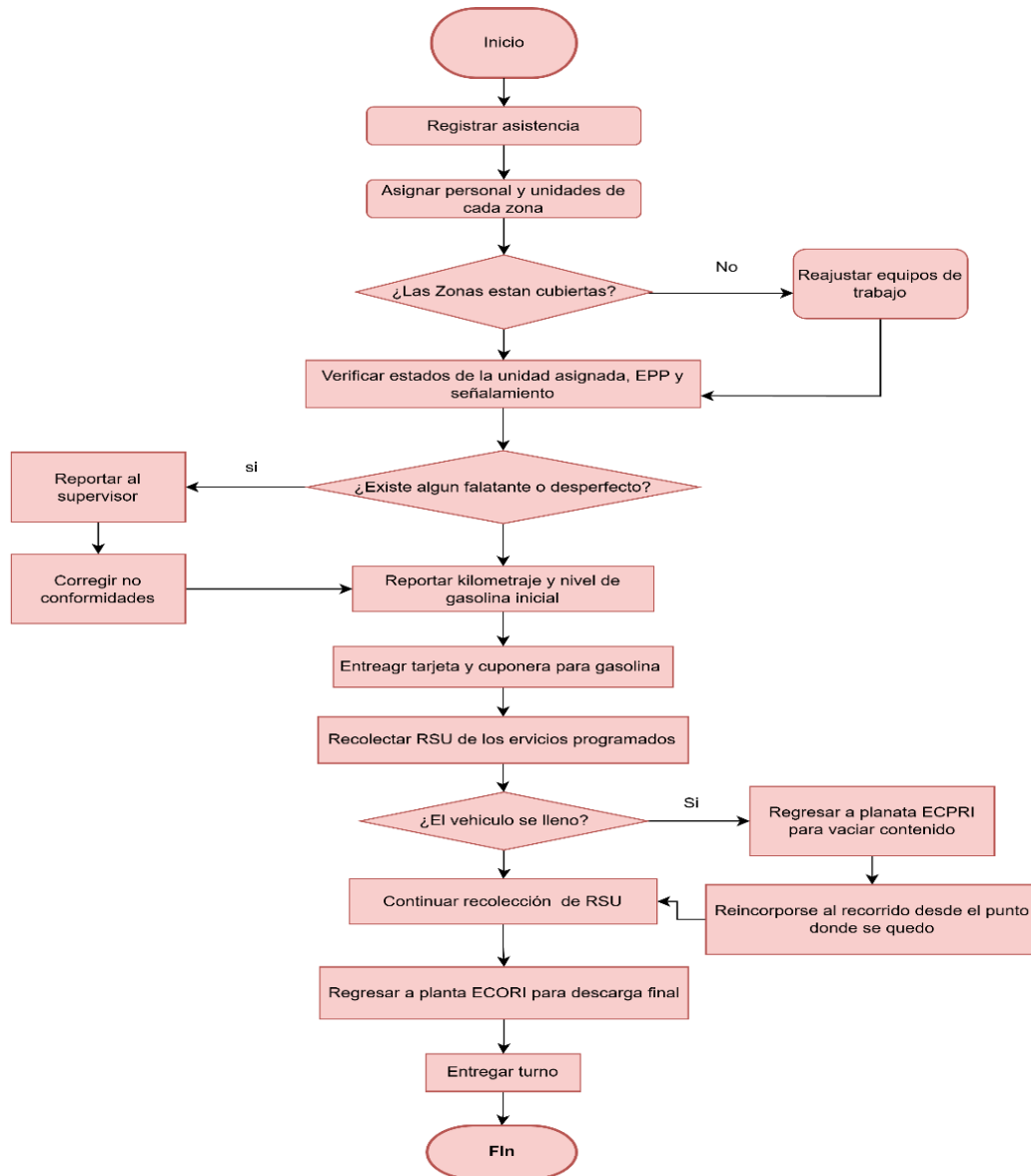


Figura 1.2 Proceso de recolección de servicios especializados. Fuente elaboración propia adaptado de (Ayuntamiento de Orizaba, 2022).

1.2 Planteamiento del problema

La recolección de residuos sólidos urbanos representa una de las actividades operativas de mayor importancia para las administraciones municipales, debido a su impacto en la limpieza urbana, la salud pública y el funcionamiento adecuado de las ciudades. El crecimiento poblacional, comercial y turístico registrado en Orizaba ha incrementado la demanda del

servicio de recolección, generando mayores requerimientos operativos y administrativos para garantizar una cobertura eficiente.

Actualmente, el municipio cuenta con un sistema de recolección especializado dirigido principalmente a industrias, empresas, escuelas, museos y establecimientos comerciales que requieren horarios específicos de atención. Este Servicio Especializado trabaja con cinco rutas que son: Norte, Centro, Calle Real, Sur y Orgánica.

Sin embargo, la planeación de dichas rutas se ha desarrollado principalmente con base en criterios operativos y experiencia del personal, sin la aplicación de herramientas técnicas que permitan evaluar la eficiencia de los recorridos. Como consecuencia, se presentan trayectos innecesarios, más tiempos de traslado y un uso considerable de los diferentes recursos como combustible, personal y unidades recolectoras.

Además, la creciente demanda del servicio ha incrementado la complejidad operativa del sistema, particularmente durante el día viernes, jornada en la que se atienden aproximadamente 193 puntos de recolección distribuidos en diferentes zonas del municipio. Esta situación dificulta la organización eficiente de las rutas y puede afectar el desempeño general del servicio.

Ante esta problemática, se propone la aplicación del modelo del Problema del Agente Viajero (TSP) y la simulación de eventos discretos mediante el software Simio, herramientas que permiten analizar y optimizar recorridos logísticos. A través de esta metodología se busca generar rutas más eficientes, reducir tiempos de operación y mejorar el aprovechamiento de los recursos disponibles.

Mediante esta investigación se pretende desarrollar una propuesta de optimización para el sistema de recolección de residuos sólidos urbanos en Orizaba, contribuyendo a mejorar la eficiencia operativa del servicio y fortaleciendo la gestión municipal en materia de limpieza urbana.

1.3 Objetivos

Para el desarrollo de la presente investigación se establecen los siguientes objetivos.

1.3.1 Objetivo general

Optimizar las rutas existentes de servicios especiales de recolección de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en la ciudad de Orizaba, Veracruz mediante la aplicación del Modelo del Problema del Agente Viajero (TSP, por sus siglas en inglés) y la simulación de eventos discretos utilizando el software de SIMIO, con el fin de mejorar la eficiencia operativa

1.3.2 Objetivos específicos

Analizar el estado actual de las rutas personalizadas utilizadas para la recolección de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Orizaba.

Diseñar y desarrollar un modelo de simulación en el software SIMIO que represente el funcionamiento actual del sistema de recolección.

Aplicar el modelo del Problema del Agente Viajero (TSP) para determinar rutas óptimas de recolección.

Comparar, mediante simulación, el desempeño de las rutas actuales y las rutas optimizadas, a través de indicadores como tiempos de recorrido y eficiencia operativa.

1.3.3 Justificación

El mejoramiento de las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos (RSU) se ha convertido en un aspecto fundamental para el adecuado funcionamiento de las ciudades, particularmente en contextos urbanos donde el crecimiento poblacional y la expansión territorial incrementan la demanda de los servicios públicos. En la ciudad de Orizaba, Veracruz, el sistema de recolección enfrenta diversas limitaciones operativas que dificultan la prestación eficiente del servicio, tales como recorridos extensos, tiempos elevados de traslado y un uso poco eficiente de los recursos disponibles.

Una gestión inadecuada de las rutas de recolección no solo repercute en el incremento de los costos operativos, sino que también afecta la calidad del servicio brindado a la población y genera impactos ambientales negativos asociados al consumo de combustible y a la emisión de contaminantes. Estas problemáticas evidencian la necesidad de incorporar herramientas analíticas que permitan mejorar la planeación y operación del sistema de recolección de RSU de manera objetiva y sustentada en datos reales.

La implementación del modelo del Problema del Agente Viajero (Traveling Salesman Problem, TSP) ofrece una alternativa eficaz para determinar recorridos óptimos que minimicen la distancia o el tiempo total de traslado entre los puntos de recolección. Este modelo matemático permite estructurar la planeación de rutas de forma sistemática, reduciendo la dependencia de criterios empíricos y contribuyendo a una toma de decisiones más eficiente y replicable.

Asimismo, la integración del modelo TSP con la simulación de eventos discretos mediante el software SIMIO permite analizar el desempeño del sistema bajo condiciones operativas reales, considerando variables como los tiempos de servicio, la utilización de los vehículos recolectores y la variabilidad inherente al proceso. Esta combinación metodológica facilita la evaluación comparativa entre las rutas actuales y las rutas optimizadas, proporcionando información confiable para proponer mejoras operativas viables.

Finalmente, esta investigación busca aportar una propuesta orientada al fortalecimiento de la gestión sostenible de los residuos sólidos urbanos, promoviendo un mejor aprovechamiento de los recursos municipales y contribuyendo a disminuir los impactos ambientales asociados a la operación del servicio. Asimismo, el estudio mantiene relación con los objetivos de los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES), particularmente en el eje de medio ambiente, al desarrollar alternativas enfocadas en la mejora de los servicios públicos municipales.

Capítulo 2

2.1 Marco Teórico.

En el presente capítulo se exponen los fundamentos teóricos y metodológicos que sustentan el desarrollo de la investigación. Se abordan los principales conceptos relacionados con la gestión integral de residuos sólidos urbanos, así como los enfoques utilizados para el análisis y optimización de los sistemas de recolección.

De igual manera, se describen los aspectos normativos asociados al manejo de residuos y las herramientas de ingeniería empleadas para evaluar el funcionamiento operativo de las rutas de recolección. Dentro de estos elementos destacan los modelos de optimización y simulación, los cuales permiten analizar diferentes escenarios y proponer alternativas de mejora en los procesos de recolección.

Asimismo, se aborda el modelo del Problema del Agente Viajero (TSP) como herramienta para la optimización de recorridos, así como la simulación de eventos discretos mediante el software Simio, empleado para representar y evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones operativas similares a las reales.

La integración de estos fundamentos proporciona el sustento teórico necesario para el desarrollo de la propuesta de optimización aplicada al sistema de recolección de residuos sólidos urbanos del municipio de Orizaba.

2.1 Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

Los residuos sólidos urbanos (RSU) corresponden a los materiales desechados que se generan principalmente en las actividades cotidianas de la población, tanto en viviendas como en establecimientos comerciales, de servicios y espacios públicos. Estos residuos forman parte de los principales problemas ambientales que enfrentan actualmente las ciudades debido al incremento en la generación de desechos y a las dificultades asociadas con su recolección y disposición final. (SEMARNAT, 2017)

Por otra parte, la PROFEPA (2015). Considera como residuos aquellos desechos que provienen de las casas habitación, así como los generados durante las actividades de limpieza de calles, parques y demás áreas públicas, siempre que no sean considerados residuos peligrosos o de manejo especial.

El manejo adecuado de los RSU resulta fundamental para prevenir afectaciones ambientales y riesgos a la salud pública, ya que una gestión deficiente puede ocasionar contaminación del suelo, agua y aire, además de afectar las condiciones sanitarias de la población (SEMARNAT, 2017).

En este sentido la SEMARNAT establece una clasificación general de los residuos como los sólidos urbanos, residuos de manejo especial y residuos peligrosos. Esta clasificación permite definir las responsabilidades y competencias de los distintos niveles de gobierno en materia de manejo de residuos.

2.1.1 Clasificación de los RSU

La clasificación de los residuos sólidos urbanos (RSU) constituye una etapa fundamental para facilitar su manejo, aprovechamiento y disposición final. Una adecuada separación de los residuos permite mejorar los procesos de recolección, reciclaje y tratamiento, además de contribuir a la reducción de impactos ambientales.

Con el propósito de fomentar una correcta separación de los residuos desde su origen, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) desarrolló una guía orientada a promover acciones relacionadas con la gestión integral de los residuos sólidos urbanos entre la población.

De acuerdo con la SEMARNAT. (2017), los residuos sólidos urbanos pueden clasificarse conforme a sus características y origen, lo que facilita su identificación, recolección y tratamiento dentro de los sistemas de manejo de residuos.

Esta clasificación permite establecer estrategias más eficientes para el aprovechamiento de materiales reciclables y para la disposición adecuada de aquellos residuos que requieren un manejo específico.

En la Ilustración 5 se presenta la clasificación general de los residuos sólidos urbanos propuesta por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la cual sirve como referencia para la correcta separación, identificación y manejo de los residuos generados por la población.



Ilustración 2.1. Clasificación, reciclaje y valoración de los RSU, Fuente: (SEMARNAT, 2017).

La información presentada en la ilustración permite identificar de manera más sencilla los diferentes tipos de los residuos sólidos urbanos y las alternativas existentes para su aprovechamiento. La correcta clasificación de los residuos facilita la implementación de estrategias enfocadas al reciclaje, reutilización y reducción de impactos medioambientales ocasionados por la acumulación de los desechos.

Los residuos se clasifican en: residuos orgánicos, residuos inorgánicos, no reciclables y los residuos voluminosos.

Residuos orgánicos:

Los residuos orgánicos están conformados principalmente por restos de alimentos, residuos de jardinería y otros materiales biodegradables que pueden ser aprovechados mediante procesos como el compostaje o tratamiento biológico.

Residuos inorgánicos reciclables:

Comprenden materiales como papel, cartón, vidrio, plásticos y metales, los cuales pueden reincorporarse nuevos procesos productivos mediante actividades de recuperación y reciclaje, contribuyendo al aprovechamiento de recursos y a la disminución de residuos enviados a la disposición final.

Residuos inorgánicos no reciclables:

Estos corresponden a materiales que, debido a sus características físicas o de composición, presentan mayores dificultades para su reutilización o aprovechamiento, como algunos tipos de plásticos, textiles y materiales compuestos.

Residuos voluminosos:

Comprenden objetos de gran tamaño, entre ellos muebles, electrodomésticos y otros artículos domésticos que requieren condiciones especiales para su recolección y transporte debido a sus dimensiones y peso.

La clasificación de los residuos sólidos urbanos resulta importante dentro de los sistemas de recolección, debido a que las características de cada tipo de residuo influyen directamente en aspectos operativos como los tiempos de servicio, la frecuencia de recolección y la capacidad necesaria de los vehículos utilizados para el transporte de los residuos.

Por lo que la adecuada separación y manejo de los residuos contribuye no solo a mejorar a la eficiencia operativa de los sistemas de recolección, sino también a fortalecer las estrategias de aprovechamiento.

2.1.2 Generación de residuos

La generación de residuos sólidos urbanos constituye uno de los principales desafíos para los sistemas de limpieza y manejo integral de residuos en las ciudades, debido al incremento constante de la población y al crecimiento de las actividades comerciales, industriales y de servicios. La cantidad de residuos producidos diariamente puede variar de acuerdo con factores sociales, económicos y culturales, por lo que su medición exacta resulta compleja.

Generalmente, la estimación de residuos se realiza mediante registros obtenidos durante las actividades de recolección, así como a través de métodos estadísticos y modelos matemáticos que permiten aproximar la cantidad generada en una determinada zona o municipio.

De acuerdo con el informe de la (SEMARNAT, s/f-b)

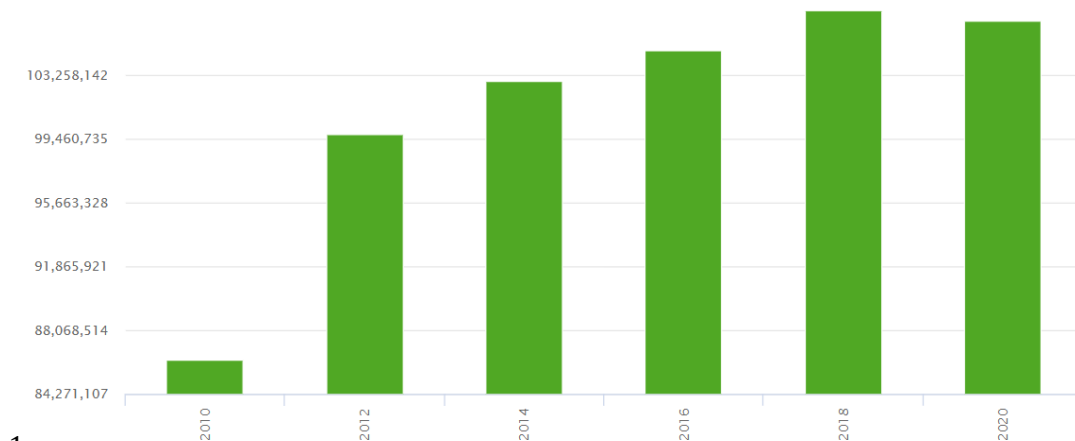


Ilustración 2.2. cantidad de promedio diaria de residuos recolectados

Mediante la gráfica podemos observar la relación que existe entre el crecimiento poblacional y el aumento de desechos de residuos solidos

2.1.2.1 Factores que influyen en la generación de residuos

La generación de residuos sólidos urbanos se encuentra directamente relacionada con factores como el crecimiento poblacional, los hábitos de consumo y el desarrollo de las actividades económicas. En México, de acuerdo con datos de la SEMARNAT, cada persona genera en promedio alrededor de un kilogramo de residuos sólidos urbanos al día, lo que representa un volumen considerable cuando se analiza a escala municipal o nacional.(SEMARNAT, s/f-a)

El incremento constante en la generación de residuos ejerce una presión significativa sobre los sistemas de recolección y disposición final, haciendo evidente la necesidad de optimizar los procesos logísticos asociados. En ciudades como Orizaba, el aumento en la generación de

residuos implica mayores recorridos, mayor consumo de combustible y una mayor demanda de recursos humanos y materiales.

2.1.2.2 Generación de residuos en México

De acuerdo con información del INEGI (2025), durante el año 2022 se recolectados en México aproximadamente 108,146 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos mediante un sistema de recolección domiciliaria de casa por casa.

Del total recolectado, alrededor de 5,661 toneladas diarias ingresaron a plantas de tratamiento, donde se realizaron procesos de separación y aprovechamiento de materiales reciclables. De esta cantidad, aproximadamente el 42.3 % logró recuperarse para su reutilización o reciclaje.

Las plantas de tratamiento de residuos sólidos urbanos corresponden a instalaciones destinadas al procesamiento y valorización de residuos, con el propósito de recuperar materiales útiles o generar alternativas de aprovechamiento energético. (INEGI, 2025)

Asimismo, en el país existen aproximadamente 874 centros de acopio distribuidos en distintas entidades federativas. Entre los estados con mayor número de instalaciones destacan Ciudad de México, Querétaro, Jalisco y Aguascalientes.

El incremento en la generación de residuos a nivel nacional evidencia la necesidad de fortalecer los sistemas de recolección y manejo integral de residuos sólidos urbanos, así como de implementar herramientas de optimización que permitan mejorar la eficiencia operativa y reducir los costos asociados al servicio.

En la Ilustración 7 se presenta el promedio diario de residuos sólidos urbanos recolectados por entidad federativa en México durante el año 2022.

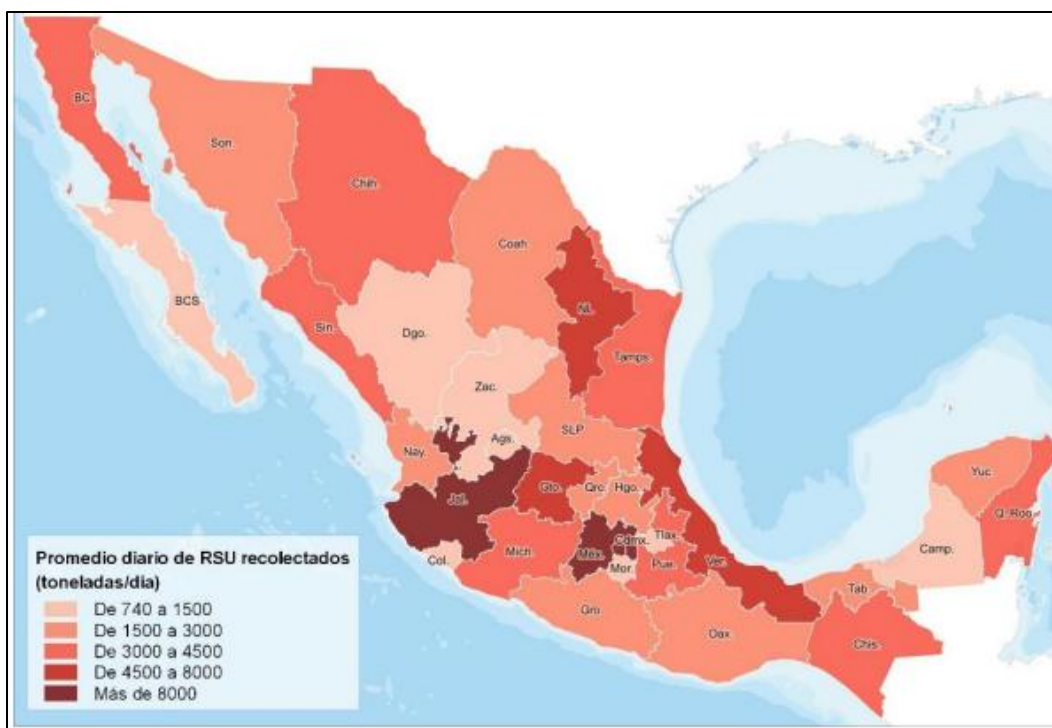


Ilustración 2.3. Promedio diario de residuos sólidos urbanos recolectados en México. Fuente: (INEGI,2022).

Como se observa en la Ilustración 7 la generación y recolección de residuos sólidos urbanos presenta diferencias significativas entre las entidades federativas del país. Estas variaciones están asociadas principalmente al tamaño de la población, el grado de urbanización, el desarrollo económico y los patrones de consumo de cada región.

Los estados con mayor concentración poblacional y actividad económica registran volúmenes más elevados de residuos, lo que implica una mayor demanda de infraestructura, personal y recursos destinados a las actividades de recolección, transporte y tratamiento. En contraste, las entidades con menor densidad poblacional presentan cantidades inferiores de residuos, aunque enfrentan desafíos relacionados con la cobertura y eficiencia de los servicios de limpieza urbana.

En este contexto, conocer los volúmenes de residuos generados permite comprender la necesidad de aplicar herramientas de optimización y simulación que contribuyan a mejorar el funcionamiento de los sistemas de recolección, tema que se abordará en los apartados siguientes.

2.1.3 Sistema de gestión de residuos sólidos urbanos

La gestión de residuos sólidos urbanos comprende el conjunto de actividades técnicas, administrativas y operativas orientadas al manejo adecuado de los residuos desde su generación hasta su disposición final. Su objetivo principal es minimizar los impactos ambientales y sanitarios asociados a los residuos, así como promover el aprovechamiento de materiales y el uso eficiente de los recursos disponibles.

De acuerdo con Tchobanoglous et al. (1994), la gestión de residuos sólidos urbanos debe analizarse como un sistema integrado conformado por diferentes elementos funcionales que interactúan entre sí. Este enfoque permite comprender el flujo de los residuos a lo largo de todo su ciclo de manejo y facilita la identificación de oportunidades de mejora dentro del sistema.

Los elementos funcionales que integran el sistema de gestión de residuos sólidos urbanos son los siguientes:

1. Generación de residuos.

Corresponde a la producción de residuos derivada de las actividades domésticas, comerciales, industriales y de servicios. En esta etapa se consideran aspectos como la cantidad generada, la composición y las características físicas y químicas de los residuos.

2. Manipulación y almacenamiento en el origen.

Comprende las actividades realizadas por los generadores para separar, clasificar y almacenar temporalmente los residuos antes de su recolección.

3. Recolección.

Consiste en la recuperación y traslado de los residuos desde los puntos de generación. Esta etapa incluye aspectos relacionados con la planeación de rutas, asignación de vehículos, consumo de combustible y optimización de recorridos.

4. Transferencia y transporte.

Involucra el traslado de los residuos hacia estaciones de transferencia o sitios de disposición final, con el objetivo de mejorar la eficiencia logística y reducir costos operativos.

5. Separación, procesamiento y transformación.

Incluye las actividades destinadas a recuperar materiales aprovechables mediante procesos como reciclaje, compostaje, tratamiento biológico o valorización energética.

6. Disposición final.

Corresponde al confinamiento controlado de los residuos en instalaciones diseñadas para minimizar los impactos ambientales y proteger la salud pública.

La adecuada integración de estos elementos permite desarrollar sistemas de gestión más eficientes y sostenibles. Sin embargo, diversos estudios señalan que la etapa de recolección representa uno de los componentes con mayor demanda de recursos económicos, humanos y materiales dentro del sistema de manejo de residuos, por lo que su optimización resulta fundamental para mejorar el desempeño operativo general.

En la Ilustración 8 se presenta de manera general el ciclo de manejo de los residuos sólidos urbanos, el cual muestra la interacción existente entre las diferentes etapas que conforman el sistema.

2.1.4 Marco normativo para la gestión de residuos sólidos urbanos

En México, el manejo de los residuos sólidos urbanos se encuentra regulado por diversos instrumentos legales que establecen las responsabilidades de los distintos niveles de gobierno y promueven una gestión integral orientada a la protección del medio ambiente y la salud pública.

Uno de los principales instrumentos normativos es la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), la cual tiene como objetivo regular la prevención de la generación de residuos, así como su valorización, manejo integral y disposición final de manera ambientalmente adecuada.

De conformidad con el artículo 10 de la LGPGIR, los municipios son responsables de la gestión integral de los residuos sólidos urbanos generados dentro de su territorio. Entre sus atribuciones se encuentran la recolección, traslado, tratamiento y disposición final de los residuos, así como la implementación de acciones orientadas a promover su aprovechamiento y minimizar los impactos ambientales asociados.

El cumplimiento de estas responsabilidades requiere que los gobiernos municipales desarrollen sistemas de recolección eficientes y técnicamente planificados, capaces de atender la demanda del servicio y optimizar el uso de los recursos disponibles.

Asimismo, la LGPGIR promueve la adopción de estrategias orientadas a la prevención, reducción, reutilización y reciclaje de residuos, fomentando la participación de la sociedad y de los sectores productivos en el manejo sustentable de los desechos.

La aplicación de este marco normativo constituye un elemento fundamental para el desarrollo de sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos más eficientes, sostenibles y acordes con los principios de protección ambiental establecidos en la legislación mexicana.

En este contexto, la optimización de las rutas de recolección representa una alternativa que contribuye al cumplimiento de los objetivos establecidos por la legislación, al permitir una utilización más eficiente de los recursos operativos y una mejora en la calidad del servicio proporcionado a la población.

Conforme al artículo 10 de la LGPGIR, los municipios son los responsables del manejo integral de los residuos sólidos urbanos dentro de su territorio, lo cual incluye las etapas de recolección, traslado, tratamiento y disposición final. Esta responsabilidad implica la necesidad de contar con sistemas de recolección eficientes y técnicamente planificados que permitan optimizar el uso de los recursos disponibles.

El sistema de gestión de residuos sólidos urbanos comprende un conjunto de etapas interrelacionadas que permiten el manejo adecuado de los residuos desde su generación hasta su disposición final. Estas etapas conforman un ciclo que debe operar de manera eficiente para minimizar impactos ambientales y costos operativos. El ciclo se muestra en la Ilustración 7.

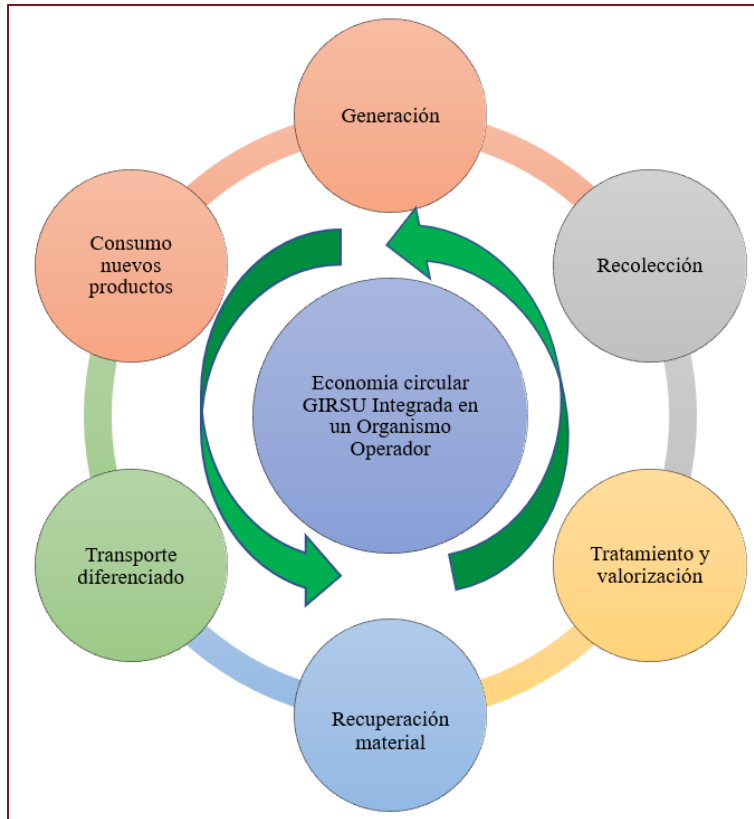


Ilustración 2.4. Ciclo del manejo de residuos sólidos urbanos. Fuente:(SEMARNAT,2024)

La gestión de los residuos sólidos urbanos incluye las siguientes etapas:

Generación:

Producción de residuos en hogares, comercios y servicios.

Recolección:

Actividad mediante la cual los residuos son retirados de los puntos de generación y transportados a instalaciones de tratamiento o disposición final. Esta etapa representa uno de los mayores costos operativos del sistema.

Transporte:

Traslado de los residuos desde los puntos de recolección hasta los sitios de tratamiento o disposición final.

Tratamiento:

Procesos físicos, químicos o biológicos que buscan reducir el volumen o el impacto ambiental de los residuos.

Disposición final

Etapas en la que los residuos son confinados de manera controlada para evitar daños al medio ambiente

Dentro de este ciclo, la etapa de recolección es crítica, ya que su eficiencia depende directamente de la correcta planeación de las rutas, los tiempos de recorrido y la utilización de los vehículos recolectores.

Para la solución de la problemática de los desechos sólidos los elementos que lo conforman se deben combinar los distintos elementos que lo conforman para que estas funciones logrando un sistema de manejo de desecho. En la mayoría de las ciudades este proceso solo considera 4 elementos para el manejo de residuos que es: producción de desechos, almacenamiento en sitio, recolección y disposición, además que uno del objetivo es la optimización de este sistema para proporcionar la solución más eficiente y económica, en concordancia con todas las restricciones impuestas por los usuarios del sistema que son afectados o controlan su uso.

2.1.2 Generación de residuos sólidos urbanos en Orizaba

El crecimiento poblacional, comercial y turístico del municipio de Orizaba ha provocado un incremento considerable en la generación de residuos sólidos urbanos, situación que representa un reto importante para los servicios municipales de limpieza y recolección.

De acuerdo con información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, el municipio registra aproximadamente 45.6 mil toneladas de residuos recolectados anualmente. Para atender esta demanda, el sistema municipal cuenta con una infraestructura integrada por 32 vehículos recolectores y dos plantas de tratamiento de aguas residuales, las cuales contribuyen al manejo y disposición de los residuos generados en la ciudad.

Asimismo, el municipio ha desarrollado diversas estrategias orientadas al cumplimiento de los objetivos establecidos en la Agenda 2030, principalmente en temas relacionados con la separación, reciclaje y aprovechamiento sustentable de los residuos sólidos urbanos.

Entre las principales acciones implementadas destacan las campañas de separación de residuos desde el origen, los programas de reciclaje y las actividades de acopio para materiales específicos, como pilas y aceite vegetal usado. De igual manera, se cuenta con procesos de tratamiento y aprovechamiento sustentable de residuos no peligrosos mediante la operación de la Planta Ecori.

Las acciones desarrolladas por el municipio en materia ambiental y de limpieza urbana han permitido que Orizaba reciba diversos reconocimientos otorgados por la Asociación Técnica para la Gestión de Residuos y Medio Ambiente (ARTEGRUS), entre los que destacan la “Escoba de Plata” en 2018 y la “Escoba de Oro” en 2021, distinciones relacionadas con las prácticas implementadas en la gestión de residuos y el mejoramiento de la imagen urbana.

Como parte de las acciones implementadas para el manejo de residuos sólidos urbanos, el municipio de Orizaba opera un programa denominado “Servicio Especializado”, enfocado principalmente en la recolección de residuos generados por establecimientos comerciales e instituciones que requieren horarios específicos de atención.

El servicio se encuentra dividido en cinco rutas principales denominadas Norte, Sur, Centro, Calle Real y Orgánica, las cuales atienden distintos sectores del municipio de acuerdo con las necesidades de recolección existentes en cada zona.

No obstante, la planificación de los recorridos ha sido realizada principalmente con base en la experiencia y conocimiento operativo del personal encargado del servicio, sin la aplicación de herramientas técnicas que permitan evaluar la eficiencia de las rutas establecidas. Como consecuencia, se presentan recorridos poco eficientes, mayores tiempos de traslado y desplazamientos innecesarios, factores que impactan directamente en el desempeño operativo y en los costos asociados al sistema de recolección.

Esta situación evidencia la necesidad de implementar métodos de optimización que permitan mejorar la organización de las rutas y aprovechar de manera más eficiente los recursos destinados al servicio de recolección de residuos sólidos urbanos.

en la Tabla 3 se puede observar las acciones que lleva realizando durante años el municipio de Orizaba

Tabla 2.1. Acciones en materia ambiental 2015

Indicador	Valor
Volumen de residuos sólidos urbanos recolectores (Miles de toneladas)	45.6
Vehículos de motor recolectados	32
Superficie de los rellenos sanitarios (hectáreas)	0.0
Capacidad disponible de los rellenos sanitarios (Metros cúbicos)	0.0
Planta de tratamiento de aguas residuales	2
Capacidad Instalada (litros/segundos)	53.1
Volumen tratado (Millones de metros cúbicos)	0.8

Fuente: tomado de (Ayuntamiento de Orizaba, 2022)

2.1.3.2 Rellenos sanitarios

el siguiente proceso es analizar a profundidad la disposición final de los desechos que es en los conocidos rellenos sanitarios que se constituyen la forma más común de disposición final de los residuos sólidos urbanos en México. Se trata de instalaciones diseñadas para confinar los residuos de manera controlada, minimizando la contaminación del suelo, el agua y el aire, de acuerdo a lo establecido por la LGPGIR. (Ambiente, 2020)

La operación de los rellenos sanitarios se encuentra regulada por la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, la cual establece las especificaciones técnicas para su diseño, operación, clausura y monitoreo. Una gestión adecuada de los residuos en las etapas previas, especialmente en la recolección y el transporte, contribuye a prolongar la vida útil de estos sitios y a reducir los impactos ambientales asociados.

En 2012, a nivel nacional la disposición final en rellenos sanitarios y sitios controlados alcanzó poco más del 74% del volumen de RSU generado, lo que representa un incremento de alrededor del 83% con respecto al año 1997, en el cual se disponía cerca del 41% de los residuos. Mientras

tanto, de los residuos generados, el 21% se depositó en sitios no controlados y el 5% restante fue reciclado. (SEMARNAT, 2017)

En la siguiente grafica se muestra la disposición final de los RSU.

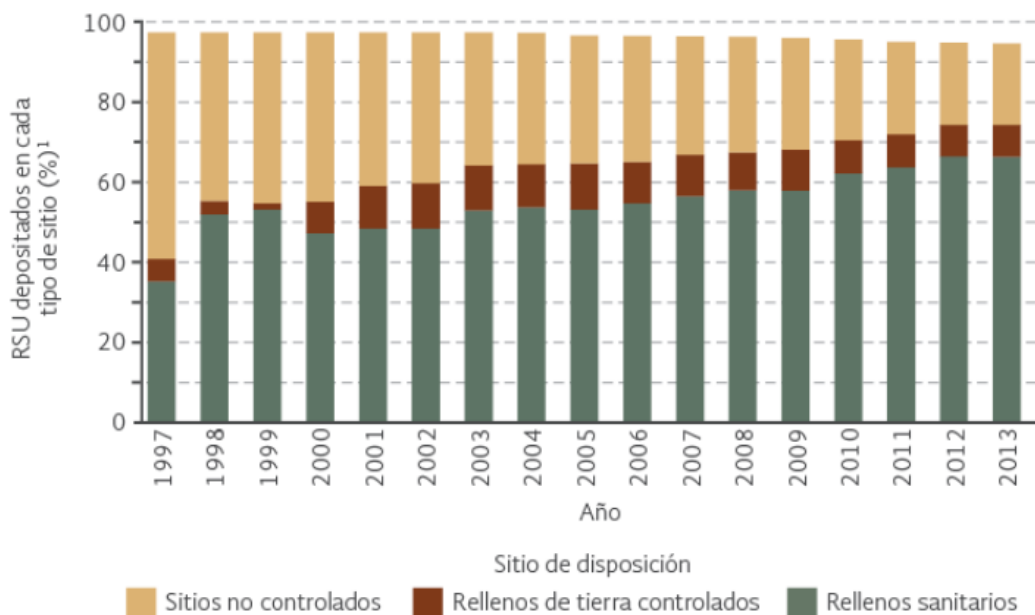


Ilustración 2.5. Disposición final de los RSU

En la Ilustración 2.5 Disposición final de los RSU del total generado en México, 1997-2023 (Fuente: Sedesol. México 2013, INEGI. México 2025)

Las entidades que cuentan con más rellenos sanitarios son:

Estado de México (28)

Jalisco (27)

Veracruz (18)

Chihuahua (18)

Guanajuato (17)

Rellenos sanitarios en Veracruz

Actualmente en Veracruz operan 14 rellenos sanitarios y 5 centros de transferencia, en los que se tratan 118 mil 186 toneladas de desechos mensuales (Gobierno del estado de Veracruz, 2024).

La siguiente tabla muestra la base de datos de los rellenos sanitarios con los que se cuenta en el estado.

Tabla 2.2 Rellenos Sanitarios de desechos sólidos reportados por los ayuntamientos

NO	LATITUD	LONGITUD	NOMBRE DEL RELLENO SANITARIO	DIRECCIÓN
1	18° 49' 20.125"	97° 12' 31.273"	Relleno Sanitario Regional de las Altas Montañas, Los Colorines, Nogales, Ver	Balastera, Km. 258 de la autopista Veracruz – México, Loc. Los Colorines
2	19° 38' 22.366"	97° 14' 18.545"	Relleno Sanitario Magueyitos, Villa Aldama, Ver.	Carretera Perote – Altotonga, Loc. Magueyitos
3	18° 53' 35.57"	96° 8' 6.34"	Relleno Sanitario, El Guayabo, Medellín de Bravo, Ver.	Domicilio conocido en Ex Hacienda
4	18° 44' 54"	96° 35' 25.1"	Relleno Sanitario, Cuitláhuac, Ver.	Carretera Federal Córdoba – La Tinaja Km. 44.5, Palma Sola
5	19° 34' 42.06"	96° 53' 23.759"	Relleno Sanitario, Xalapa, Ver.	Camino Antiguo a El Tronconal
6	17° 57' 20.91"	94° 56' 36.81"	Relleno Sanitario Acayucan, Ver	Calle La Sabana, Col. Las Cruces
7	20° 14' 4.56"	97° 37' 21.039"	Relleno Sanitario de Coyutla, Ver.	Km. 1.3 camino a la localidad Catziquilin Localidad
8	19°25' 50.19"	96°44' 32.509"	Relleno Sanitario de Pinoltepec, Emiliano Zapata, Ver	Calle La Sabana, Col. Las Cruces
9	20° 28'20"	98°32'50"	Relleno Sanitario, Huayacocotla, Ver.	Maguey Verde
10	20° 1' 39.51"	96°59' 54.91"	Relleno Sanitario San Carlos, Martínez de la Torre, Ver.	
11	19° 38' 55.82"	96°51' 31.82"	Relleno Sanitario, Naolinco, Ver	Carretera Naolinco – Las Haldas
12	21°18' 56.90"	97°41' 33.4"	Relleno Sanitario sin terminar, Naranjos Amatlán, Ver.	Domicilio conocido, Soledad Chiquita
13	21°37'40.8 2	97°52'40.53"	Relleno Sanitario de Ozuluama, Ver	Lindero camino a Magozal
14	22°5'49.36 6"	98°7' 31.832"	Relleno Sanitario Panuco, Ver.	Camino Murillo-Vega de Otates
15	20°31' 43.9"	97°24'45.7"	Relleno Sanitario, Municipio de Poza Rica de Hidalgo, Ver.	Carretera a Santa Águeda Km. 1.5

16	22°8' 6.73"	97°48'36.00"	Relleno Sanitario Tampico Alto, Ver.	Carretera entre la cabecera municipal Cd. Cuauhtémoc
17	18°23'53.678"	95°14'16.414"	Relleno Sanitario San Andrés Tuxtla, Ver.	Carretera San Andrés Tilapan Km.8
18	20°18'39.35"	96°56'16.8"	Relleno Sanitario San Rafael, Ver.	Puntilla Aldama, Zonsapotes –Rancho el Jaral Km
19	20°52'35.24"	97°26'23.48"	Relleno Sanitario, Tuxpan, Ver.	Carretera Federal México Tuxpan 252 +450, Loc.

(Fuente: procuraduría estatal de protección al medio ambiente 2024)

2.1.3 Requisitos para un Relleno Sanitario

para realizar un relleno sanitario

Oficio de solicitud de autorización de proyecto ejecutivo, dirigido al titular de la Secretaría de Medio Ambiente.

Presentación del proyecto ejecutivo impreso en original y archivo digital, el cual deberá de contener como soporte los estudios técnicos conforme a la normatividad ambiental aplicable: tales como generación y composición de los residuos, estudio topográfico (planimetría y altimetría), geología, geohidrología, geotecnia, biogás, lixiviados, planos ejecutivos, cartografía, memoria descriptiva, cálculos, manual de operación, programa de monitoreo y mantenimiento, plan de clausura y post clausura, etc. (En general lo que especifique la norma NOM-083-SEMARNAT-2003).

Constancia de zonificación y demás que resulten aplicables en el municipio en que pretenda instalarse.

En la siguiente Ilustración 2.6 se muestran los principales beneficios de los rellenos sanitarios



VERACRUZ
GOBIERNO
DEL ESTADO



SEDEMA
Secretaría de
Medio Ambiente



Ilustración 2.6. Beneficios del relleno sanitario Fuente: Gobierno del estado de Veracruz ,2024)

Sitio contaminado

Es aquel lugar, espacio, suelo, cuerpo de agua, instalación o cualquier combinación de estos que ha sido contaminado con residuos sólidos urbanos o residuos de manejo especial. (Gobierno del estado de Veracruz, 2024).

Una vez que estos lugares alcanzan su capacidad máxima se debe elaborar un plan de remediación o clausura del sitio en cual se regulan el los artículos 41,42,43 de la ley Numero 847 de Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial para el estado de Veracruz.

Para comprender mejor los riesgos de un tiradero a cielo abierto en la Ilustración 2. Ilustración 2.7 Ilustración Principales riesgos de los tiraderos a cielo abierto (Fuente: Gobierno del estado de Veracruz, 2024)se detallan cada uno de ellos.



VERACRUZ
GOBIERNO
DEL ESTADO



SEDEMA
Secretaría de
Medio Ambiente



Ilustración 2.7 Ilustración Principales riesgos de los tiraderos a cielo abierto (Fuente: Gobierno del estado de Veracruz, 2024)

2.2 Marco normativo mexicano para la gestión de residuos urbanos

La gestión de los residuos sólidos urbanos en México se encuentra regulada por un marco normativo que establece las bases legales, técnicas y administrativas para su manejo integral, con el objetivo de proteger la salud pública y el medio ambiente. Este marco normativo define

las responsabilidades de los distintos niveles de gobierno y promueve prácticas orientadas a la prevención, el aprovechamiento y la disposición adecuada de los residuos.

El principal instrumento legal en esta materia es la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), la cual tiene como finalidad regular la generación y el manejo de los residuos, así como fomentar su aprovechamiento y reducir los impactos negativos derivados de su manejo inadecuado. Esta ley establece la clasificación de los residuos en residuos sólidos urbanos, residuos de manejo especial y residuos peligrosos, lo que permite delimitar las competencias de la federación, los estados y los municipios.

De acuerdo con la LGPGIR, los municipios son los responsables del manejo integral de los residuos sólidos urbanos, lo que incluye las actividades de recolección, transporte, tratamiento y disposición final dentro de su territorio. Esta atribución implica la necesidad de diseñar y operar sistemas de recolección eficientes que permitan optimizar el uso de los recursos materiales, humanos y financieros disponibles.

Asimismo, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es la dependencia federal encargada de formular y conducir la política nacional en materia de residuos, así como de emitir normas oficiales mexicanas que regulen los aspectos técnicos del manejo de los residuos. Entre estas normas destaca la NOM-083-SEMARNAT-2003, la cual establece las especificaciones para la selección del sitio, diseño, operación, monitoreo y clausura de los rellenos sanitarios, considerados como el principal método de disposición final de los RSU en el país.

De manera complementaria, existen programas e instrumentos de planeación que fortalecen la gestión de los residuos, como los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) en el eje de Medio Ambiente, los cuales promueven el uso eficiente de los recursos y el desarrollo de soluciones sostenibles para la atención de problemáticas ambientales. En este contexto, la aplicación de herramientas de optimización y simulación en los sistemas de recolección de residuos se alinea con los objetivos de mejora continua y sostenibilidad establecidos en el marco normativo nacional.

2.2.1 Proceso de una planta recicladora

En un reciclado se lleva el siguiente proceso para el tratamiento de los residuos. En la siguiente se puede observar dicho proceso.

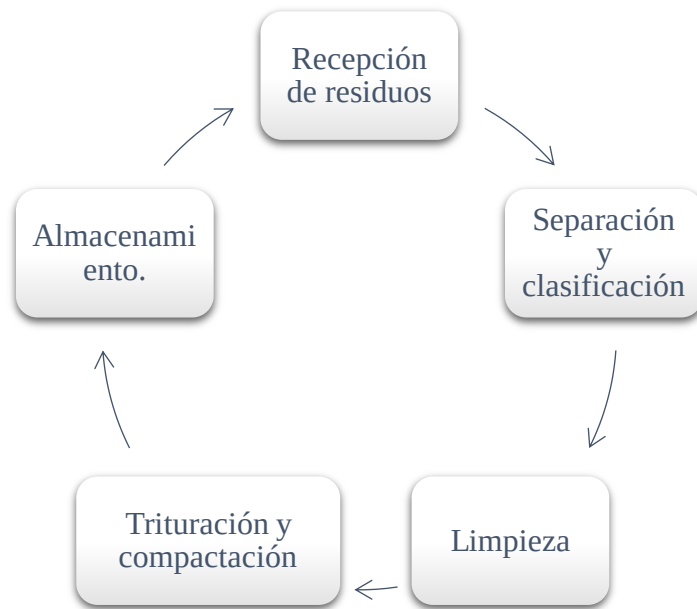


Figura 2.1. Sistema que conforma el proceso del sistema de una planta recicladora

Recepción de residuo. Este proceso consiste en la recepción de los materiales debidamente seleccionados con características indicadas para el centro de acopio pasando por una posterior selección.

Separación y clasificación a pesar de una preselección en este proceso los residuos son seleccionados manualmente o mecánicamente dependiendo de las capacidades con las que cuente la planta.

Limpieza, es una de la parte esenciales ya que los residuos deben ser sometidos a un proceso de lavado para la eliminación de impurezas.

Trituración y compactación: una vez que todos los residuos pasaron el proceso de limpieza estas son trituradas y compactadas permitiendo así un mejor almacenamiento.

Almacenamiento: es el proceso final y consiste en almacenar en lugares adecuados para su posterior envío a industrias especializadas, para su destino final.

2.3 Contexto de Residuos en Orizaba/ planta Ecori Orizaba

La ciudad de Orizaba, ubicada en la región centro del estado de Veracruz, presenta características urbanas, demográficas y económicas que influyen directamente en la generación y manejo de los residuos sólidos urbanos. Su actividad comercial, turística y de servicios, así como el crecimiento poblacional, han contribuido a un aumento progresivo en la cantidad de residuos generados diariamente.

Actualmente la ciudad de Orizaba desarrolla estrategias para el manejo y reducción de los residuos sólidos urbanos debido a que el relleno sanitario de las altas Montañas está alcanzando su capacidad máxima y la creación de un nuevo sitio de disposición final generaría grandes costos. Como parte de las estrategias las autoridades del municipio de Orizaba y representantes de Geocycle México firmaron un convenio de colaboración. Con esto se logra la inauguración de la Planta Separadora y Trituradora de Residuos Orgánicos y Sólidos (ECORI). (El Sol de orizaba, 2020)



Ilustración 2.7 Inauguración planta ECORI (Fuente: Miguel Castillo, El Sol de Orizaba 2020)

Se pretende que dar solución eficiente y sustentable a unas 18 mil toneladas de residuos inorgánicos provenientes de recolección de la ciudad.

2.4 Estado del arte en optimización de rutas

En los últimos años, diversos estudios relacionados con los sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos han demostrado que la aplicación de técnicas de optimización de rutas contribuye significativamente a mejorar la eficiencia operativa de los servicios de recolección.

La implementación de modelos matemáticos y herramientas computacionales ha permitido reducir distancias recorridas, tiempos de traslado, consumo de combustible y costos asociados a la operación de las unidades recolectoras. Estas mejoras representan beneficios tanto económicos como ambientales para los sistemas municipales de manejo de residuos.

Entre los modelos más utilizados para la optimización de recorridos destacan el Problema del Agente Viajero (TSP) y el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP), los cuales han sido ampliamente aplicados en problemas logísticos y de transporte debido a su capacidad para determinar rutas más eficientes bajo diferentes restricciones operativas.

Asimismo, la simulación de eventos discretos se ha convertido en una herramienta de apoyo importante para evaluar el comportamiento de los sistemas de recolección bajo condiciones similares a las reales. Mediante este tipo de simulación es posible analizar diferentes escenarios operativos, identificar cuellos de botella y evaluar el impacto de las propuestas de mejora antes de su implementación.

Los resultados obtenidos en investigaciones previas evidencian que la integración de modelos de optimización y simulación permite fortalecer la toma de decisiones y mejorar el desempeño de los sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos. Por ello, estas herramientas representan una alternativa viable para el análisis y optimización de las rutas de recolección en el municipio de Orizaba.

Tabla 2.3 Estado del arte (Fuente elaboración propia 2025)

Título	Autores	Problemática	Aportación	Método o Técnica
Simulación de una estación de transferencia	(Galán et al, 2017)	Debido al aumento en la generación de residuos en la ciudad	Demuestra la utilidad de la simulación	La metodología empleada es la simulación de

municipal de Residuos Sólidos urbanos con el software SIMIO		de Orizaba surge la necesidad de analizar el funcionamiento operativo de la estación de transferencia, con el fin de identificar ineficiencias para tomar decisiones hacia mejorar la capacidad, reducir tiempos de espera y optimizar el uso de recursos.	mediante SIMIO para analizar sistemas complejos sin intervenir físicamente en la infraestructura, por lo que se convierte en una alternativa económica.	eventos discretos utilizando el software SIMIO
Análisis de la red logística de un cruce vial utilizando simulación en SIMIO para evaluar la alternativa de colocar un semáforo	(Fuentes Rosas et al., 2019)	Debido al gran tránsito vehicular detectado en el cruce de las calles Lerdo de Tejada y Av. Independencia de y a la falta de cultura vial de la ciudad de Terra Blanca el cruce se convierte en un desafío para la seguridad, por lo que mediante la simulación se evalúa la viabilidad de colocación de un semáforo.	En este artículo se muestra la utilidad del Software SIMIO para modelar sistemas de tránsito y evaluar alternativas de control vial antes de su implementación	La metodología empleada corresponde a la simulación de eventos discretos mediante el software SIMIO, con el propósito de modelar el comportamiento del cruce vial y evaluar distintos escenarios de operación.
Rediseño de las Rutas de Recolección de Residuos Sólidos Urbanos en el Municipio de León, Guanajuato, México. Recorrido Mínimo Ag-Tps-Google”	(Ramos González, 2015)	Aborda una ineficiencia de rutas en la ciudad de León Guanajuato debido al diseño de manera intuitiva sin la consideración de aspectos como el modelado del sistema y la optimización mediante técnicas que permitan tener	Optimización de rutas, reducción de distancias y costos operativos, mejora de la eficiencia logística del sistema de recolección de RSU.	Para este caso se emplea una metodología cuantitativa basada en técnicas de Algoritmo Genéticos, el Problema del Agente Viajero, así como herramientas de georreferenciación

		rutas de recolección más eficientes		como Google Maps
Optimización de rutas en la recolección y transporte de los residuos sólidos domiciliarios utilizando sistemas de información geográfica en el distrito de Chaupimarca	(Valdiviezo Zevallos & Estrella Basilio, 2025)	La problemática se centra al manejo inadecuado de los residuos sólidos urbanos que genera problemas en el ámbito ambiental y social.	Este trabajo propone una metodología para optimizar rutas de recolección mediante herramientas SIG y análisis espacial.	El método desarrollado se basa en la utilización del Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la optimización de las rutas de recolección
SISTEMAS DE Información Geográfica para Optimizar la ruta de Recolección de Residuos Sólidos Municipales, Moche	(Cardenas Cabrera & Cuadra Arevalo, 2022)	Actualmente, no existe una metodología establecida para hacer la recolección de residuos sólidos, y los caminos se diseñan de manera ad hoc, lo que a menudo resulta en agujeros y mayores costos e impactos ambientales.	Demuestra la aplicación de herramientas SIG para el diseño y optimización de rutas de recolección municipal.	Se una metodología basada en Sistemas de Información Geográfica (SIG) utilizando la herramienta ArcGIS.
Diseño de rutas para la recolección de residuos sólidos urbanos en el municipio de San Juan de Betulia, Sucre, Colombia	(Aguas Gómez et al., 2024)	El problema identificado es debido a que la planeación de las rutas de recolección de basuras fue establecida de manera manual y empírica, careciendo de un estudio sistemático que garantice la eficiencia de las rutas establecidas	Desarrolla un modelo matemático de optimización aplicable a sistemas municipales de recolección de residuos sólidos urbanos	La investigación utiliza un enfoque de Investigación de Operaciones orientado al diseño y optimización de rutas. Se emplearon herramientas de programación matemática e investigación de operaciones para obtener rutas que minimizaran las distancias recorridas. Así como el uso del

				Problema del Agente Viajero (Traveling Salesman Problem) como fundamento para el diseño de rutas óptimas.
Evaluación del sistema de limpia pública del H. Ayuntamiento Camerino Z. Mendoza para mejorar su productividad mediante la simulación con Simio	(Ortega Ortiz, 2020)	El sistema de limpia publica presentaba áreas de oportunidad en la eficiencia operativa, por problemas identificados como tiempos elevados de recolección, utilización ineficiente de vehículos entre otros.	Se demuestra la aplicación de la simulación de eventos discretos para analizar sistemas municipales de limpia publica	Simulación en SIMIO con eventos discretos
Evaluación de la Ruta 8 de Recolección de Residuos Sólidos en la Ciudad de Orizaba, Veracruz, Usando Simulación en SIMIO	(Cruz Garcia et al, 2023)	La principal problemática identificada fue la necesidad de mejorar la eficiencia del servicio de recolección de residuos sólidos urbanos	Muestra la utilidad de aplicación de eventos discretos para la evaluación de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos. por lo que constituye la simulación mediante SIMIO como una herramienta eficaz para el análisis del desempeño de rutas.	Se utilizo una metodología cuantitativa basada en simulación de eventos discretos y modelado en SIMIO

2.3 El Problema del Agente Viajero (TSP)

El Problema del Agente Viajero, conocido como *Traveling Salesman Problem* (TSP), es uno de los problemas clásicos de optimización combinatoria y ha sido ampliamente estudiado en el campo de la investigación de operaciones. El objetivo del problema consiste en determinar la ruta de menor costo o distancia total que permita a un agente visitar un conjunto de puntos exactamente una vez y regresar al punto de origen. (Aplegate, et al., 2006)

Este problema resulta particularmente relevante en sistemas de transporte y logística, ya que representa de manera simplificada situaciones reales como la distribución de mercancías, la inspección de redes y la recolección de residuos sólidos urbanos. En estos contextos, cada punto corresponde a un nodo de servicio, mientras que los trayectos entre ellos representan las distancias o tiempos de traslado.

Desde el punto de vista matemático, el TSP puede formularse mediante un grafo completo en el que los nodos representan los puntos a visitar y los arcos representan el costo asociado al desplazamiento entre ellos. El objetivo es encontrar el ciclo hamiltoniano de menor costo que incluya todos los nodos del sistema. A medida que aumenta el número de puntos, la complejidad del problema crece de forma exponencial, lo que lo clasifica como un problema de tipo NP-difícil.

Debido a esta complejidad, la resolución del TSP en sistemas reales suele abordarse mediante algoritmos de optimización exactos o heurísticos, tales como métodos de ramificación y acotamiento, algoritmos genéticos o técnicas de búsqueda local. Estas estrategias permiten obtener soluciones óptimas o cercanas al óptimo en tiempos computacionales razonables.

En el contexto de la recolección de residuos sólidos urbanos, el TSP se utiliza para optimizar el orden de visita de los puntos de recolección dentro de una ruta determinada, con el propósito de minimizar la distancia recorrida, el tiempo total de operación y el consumo de recursos. La solución obtenida mediante el TSP proporciona una ruta teórica óptima, la cual puede ser evaluada posteriormente mediante herramientas de simulación para analizar su desempeño bajo condiciones reales de operación.

La integración del modelo TSP con la simulación de eventos discretos mediante el software Simio permite considerar la variabilidad inherente al sistema, como los tiempos de servicio y las condiciones de traslado, ofreciendo una evaluación más realista del impacto de la optimización de rutas en el sistema de recolección.

2.4 Simulación

La simulación es una técnica analítica que permite representar el comportamiento de un sistema real mediante un modelo computacional, con el propósito de analizar su desempeño bajo diferentes condiciones y escenarios. (Coss Bú, 2023) A través de la simulación, es posible estudiar sistemas complejos sin necesidad de intervenir directamente en la operación real, lo que reduce costos y riesgos asociados a la experimentación.

En ingeniería industrial, la simulación se utiliza ampliamente para analizar sistemas de manufactura, transporte, logística y servicios, debido a su capacidad para incorporar variabilidad, restricciones operativas y múltiples interacciones entre los elementos del sistema. De acuerdo con Law. (2015) la simulación permite representar sistemas reales mediante modelos computacionales capaces de reproducir el comportamiento de los procesos a lo largo del tiempo, facilitando el análisis y la toma de decisiones en sistemas complejos.

2.4.1 Tipos de simulación

Los modelos de simulación pueden clasificarse de acuerdo con distintos criterios, siendo los más comunes los siguientes:

Según el tiempo:

Modelos estáticos: no consideran la evolución del sistema a lo largo del tiempo.

Modelos dinámicos: representan el comportamiento del sistema en función del tiempo.

Según la naturaleza de las variables:

Modelos determinísticos: no consideran variabilidad, ya que los valores de las variables son fijos.

Modelos estocásticos: incorporan incertidumbre mediante el uso de distribuciones de probabilidad.

Según el tipo de cambio en el sistema:

Simulación de eventos discretos: el estado del sistema cambia en instantes específicos, cuando ocurre un evento.

Simulación continua: el estado del sistema cambia de manera continua en el tiempo.

Para el análisis de sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos, la simulación de eventos discretos resulta la más adecuada, ya que las actividades del sistema, como la llegada de los vehículos y la recolección en cada punto, ocurren en momentos bien definidos.

2.4.2 Ventajas y desventajas de la simulación

El uso de la simulación ofrece diversas ventajas en el análisis de sistemas complejos. Entre las principales se encuentran la posibilidad de evaluar múltiples escenarios sin afectar el sistema real, la incorporación de variabilidad y la obtención de indicadores de desempeño detallados. Asimismo, la simulación permite identificar cuellos de botella, evaluar el impacto de cambios operativos y apoyar la toma de decisiones basada en datos.

Permite la creación de múltiples escenarios dentro del modelo para su evaluación.

2.4.3 Desventajas

No obstante, la simulación también presenta algunas desventajas. El desarrollo de modelos de simulación puede requerir un tiempo considerable y conocimientos técnicos especializados. Además, los resultados obtenidos dependen en gran medida de la calidad de los datos de entrada y de los supuestos establecidos durante la modelación. Por esta razón, es fundamental validar adecuadamente el modelo para asegurar que represente de manera fiel el sistema real.

2.4.4 Aplicación de la simulación en logística

La simulación se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada dentro del área de logística y transporte debido a su capacidad para representar y analizar el comportamiento de sistemas complejos bajo diferentes condiciones operativas. Su aplicación permite estudiar

procesos relacionados con distribución, almacenamiento, tráfico vehicular y planeación de rutas sin afectar directamente las operaciones reales.

En los sistemas logísticos intervienen múltiples variables que influyen en el desempeño operativo, entre las que destacan los tiempos de recorrido, la capacidad de carga, la demanda de servicio, la disponibilidad de recursos y las condiciones de operación. Mediante la simulación es posible analizar la interacción de estas variables y evaluar su impacto sobre el funcionamiento general del sistema.

2.4.5 Metodología de la simulación

La metodología de simulación constituye una herramienta estructura que permite analizar sistemas complejos mediante la construcción de modelos capaces de representar el comportamiento de un proceso real bajo diferentes condiciones operativas. para Law. (2015) consideran que el desarrollo de estudio de simulación requiere de una secuencia organizada de etapas que permita garantizar la confiabilidad y validez de los resultados obtenidos, por lo que las etapas incluyen desde la definición del problema hasta el análisis del modelo.

para ello se considera que la metodología más utilizada es la propuesta por Law y Kelton. (2007), Figura 2. que muestra cada una de las etapas que se deben llevar a cabo en el desarrollo de un modelo de simulación y debido a su composición es aplicado en diferentes tipos de modelos de análisis.

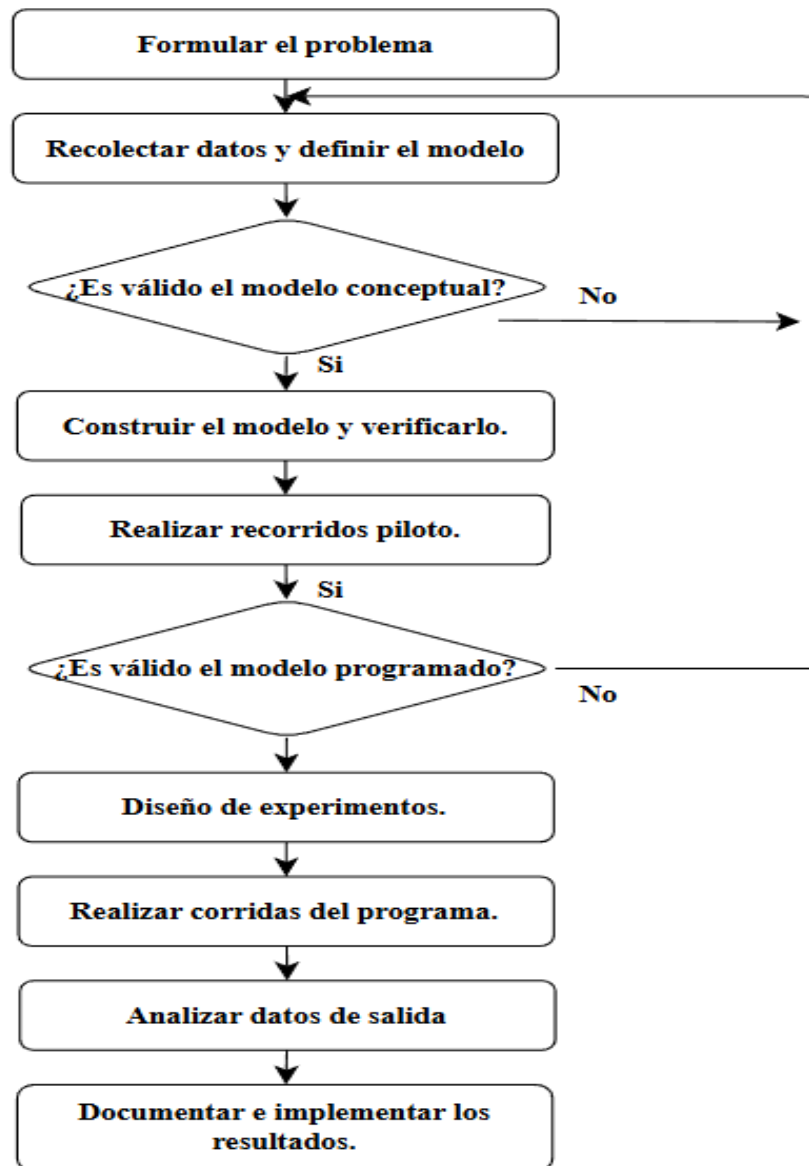


Figura 2.3 Método de simulación (Law, 2015)

a aplicación de esta metodología proporciona una base estructurada para el desarrollo de estudios de simulación, permitiendo analizar sistemas complejos mediante una secuencia organizada de etapas. Para una mejor comprensión del proceso metodológico empleado en la presente investigación, a continuación, se describen los pasos propuestos por Law y Kelton (2007).

1. Formulación del problema

Esta etapa consiste en identificar la problemática existente dentro del sistema, los objetivos específicos que se buscan alcanzar mediante un plan de trabajo para asegurar el cumplimiento de las metas planteadas.

2. Recopilación de datos y definición del modelo.

Es uno de los pasos más importantes para la construcción del modelo, ya que los datos deben de ser precisos y confiables para representar el modelo real.

3. Validación del modelo conceptual

Consiste en verificar que el modelo conceptual represente adecuadamente las condiciones y las características del sistema real.

4. Construcción y verificación del modelo

Mediante la utilización de un software especializado en simulación se construye el modelo permitiendo representar el comportamiento operativo del sistema. posteriormente, se realiza la verificación del modelo para corroborar que funcione correctamente y corregir errores en su programación o estructura.

5. Ejecución de pruebas piloto

En este paso es necesario realizar corridas preliminares del modelo de simulación con el fin de analizar el comportamiento inicial del sistema y realizar ajustes si es necesario antes de la ejecutar la simulación definitiva.

6. Validación del modelo programado

la validación es importante ya que mediante este paso se comparan los resultados obtenidos mediante el modelo de simulación con el comportamiento observado en el sistema real, con el objetivo de garantizar que el modelo represente adecuadamente las condiciones operativas.

7. Diseño de experimentos

En esta etapa se definen los escenarios y condiciones que serán evaluados mediante la simulación. Esto permite analizar distintas alternativas relacionadas con la optimización de rutas y el mejor aprovechamiento de los recursos operativos.

8. Ejecución de la simulación

Se realizan las corridas de simulación bajo las condiciones previamente establecidas, obteniendo información relacionada con el desempeño operativo del sistema y el comportamiento de las variables analizadas.

9. Análisis de los datos de salida

Los resultados obtenidos durante la simulación son analizados con el propósito de identificar áreas de oportunidad, evaluar el desempeño del sistema y comparar las diferentes propuestas de mejora planteadas.

10. Documentación e implementación de resultados

Finalmente, se documentan los resultados obtenidos, las conclusiones del estudio y las propuestas derivadas del análisis realizado. Esta etapa facilita la interpretación de los resultados y su posible implementación dentro del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos.

2.4.6 Verificación y validación del modelo de simulación

La verificación y validación del modelo de simulación constituyen etapas fundamentales dentro del desarrollo de un estudio de simulación, debido a que permiten garantizar que el modelo represente adecuadamente el comportamiento del sistema real y que los resultados obtenidos sean confiables.

De acuerdo con Law (2015), la verificación consiste en comprobar que el modelo computacional haya sido construido correctamente y funcione conforme a la lógica establecida en el diseño conceptual. Por su parte, la validación tiene como propósito determinar si el modelo representa de manera adecuada el comportamiento del sistema real bajo estudio.

La verificación del modelo implica revisar la correcta programación de procesos, variables, entidades, recursos y relaciones lógicas implementadas dentro del software de simulación. Según Banks et al. (2014), esta etapa permite identificar errores de programación,

inconsistencias en la lógica del sistema y posibles fallas en la representación de las operaciones simuladas.

Por otra parte, la validación del modelo consiste en comparar los resultados obtenidos mediante la simulación con datos reales del sistema analizado. Montgomery & Runger, (2018) señalan que la validación permite evaluar la precisión del modelo y determinar si este puede utilizarse como una representación confiable del sistema real.

Para validar el modelo de simulación pueden emplearse técnicas estadísticas, análisis comparativos y pruebas de bondad de ajuste, tales como Kolmogorov-Smirnov, Ji-cuadrada y Anderson-Darling, las cuales permiten verificar que las distribuciones probabilísticas utilizadas representen adecuadamente el comportamiento de los datos observados.

Asimismo, la validación puede complementarse mediante la comparación de indicadores operativos reales y simulados, tales como tiempos de recorrido, duración de actividades, generación de residuos, utilización de recursos y capacidad operativa del sistema.

Por lo tanto, la verificación y validación representan procesos indispensables dentro de cualquier estudio de simulación, ya que permiten garantizar la confiabilidad, precisión y utilidad del modelo desarrollado.

2.52.4 Problema del Agente Viajero (TSP)

El problema del agente viajero, conocido internacionalmente como TSP (Tráveling Salesman Problem), representa uno de los modelos más importantes dentro de la investigación de operaciones y la optimización de rutas el cual se basa en encontrar el recorrido más eficiente para visitar una sola vez cada punto o nodos y posteriormente regresar al lugar de origen.

De acuerdo con Taha, (2012).el TSP es considerado un problema clásico de optimización combinatoria debido a la gran cantidad de alternativas de soluciones que puedan generarse cuando aumenta el número de nodos en una red logística.

En l actualidad el modelo TSP posee una gran relevancia en los sistemas de transporte y distribución, ya que contribuye a mejorar el uso de los recursos mediante la reducción de

recorridos innecesarios y la optimización de tiempos operativos. Entre sus principales aplicaciones se encuentran la distribución de mercancías, servicio de mensajería, rutas escolares, transporte público y sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos.

2.5.1.1 Definición

El Problema de Agente Viajero puede definirse como un modelo matemático cuyo propósito consiste en determinar la secuencia optima de recorrido dentro de una red de ciudades o puntos de servicio.

2.5.1.2 Características del TSP

El Problema del Agente Viajero presenta características particulares que permiten identificarlo como uno de los problemas más estudiados dentro de la optimización de rutas.

Entre sus principales características destacan las siguientes:

Cada nodo debe visitarse únicamente una vez.

El recorrido debe concluir en el punto de origen.

El objetivo principal consiste en minimizar costos, distancias o tiempos.

El número de soluciones posibles crece exponencialmente.

Puede resolverse mediante algoritmos exactos o aproximados.

Tiene aplicaciones directas en logística y transporte.

Existen dos tipos principales de TSP

Modelo TSP simétrico: para este caso las distancias entre la ciudad A y la ciudad B es la misma en ambas direcciones. es decir, si $d_{ij} = d_{ji}$ para todas las i y j .

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si se llega a la ciudad } j \text{ desde la ciudad } i \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

Modelo TSP asimétrico: las distancias o costos dependen del sentido de la ruta.

2.5.1.3 Modelo TSP matemático

El modelo matemático busca minimizar una función objetivo sujeta a ciertas restricciones.

función objetivo minimizar distancia o costo total del recorrido:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}, d_{ij} = \infty \text{ para todas la } i = j$$

2.5.2 Aplicación del TSP en la Recolección de Residuos Sólidos Urbanos

La optimización de rutas representa una de las principales necesidades dentro de los sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos. En este contexto, el Problema del Agente Viajero constituye una herramienta útil para mejorar la planeación de recorridos de los vehículos recolectores.

Cada punto de recolección puede considerarse un nodo dentro de una red logística. A partir de ello, es posible diseñar rutas que reduzcan distancias recorridas, tiempos de operación y costos asociados al consumo de combustible.

Law (2015) menciona que la simulación y optimización de rutas permiten evaluar el desempeño de sistemas urbanos antes de implementar cambios operativos reales. De esta manera, los modelos TSP contribuyen a mejorar la eficiencia del servicio público y disminuir impactos ambientales relacionados con recorridos innecesarios.

Además, la utilización de herramientas de simulación como SIMIO facilita el análisis estadístico y gráfico de las rutas de recolección, permitiendo comparar distintos escenarios de operación.

2.5.3 Relación del Método Evolutionary de Excel con el TSP

El método *Evolutionary* del Solver de Microsoft Excel corresponde a una técnica de optimización basada en algoritmos evolutivos. Este método resulta adecuado para resolver problemas complejos donde existen múltiples combinaciones posibles, como ocurre en el Problema del Agente Viajero.

Su funcionamiento se basa en principios similares a los procesos de evolución natural, considerando etapas de selección, mutación y combinación de soluciones. Durante cada iteración, el algoritmo evalúa diferentes alternativas de recorrido y conserva aquellas que presentan mejores resultados respecto a la función objetivo.

Winston (2020) señala que este tipo de métodos permite obtener soluciones eficientes en problemas de optimización donde los modelos tradicionales presentan dificultades computacionales.

Dentro del TSP, el método Evolutionary busca minimizar la distancia total recorrida mediante la generación continua de rutas alternativas hasta encontrar una solución satisfactoria.

Su implementación en Excel representa una alternativa accesible para investigaciones académicas relacionadas con logística y optimización de rutas.

2.6 Distribuciones de probabilidad

Las distribuciones de probabilidad permiten modelar el comportamiento aleatorio de variables como:

- Tiempos de servicio
- Tiempos de traslado

Las más utilizadas son:

- Normal
- Exponencial
- Gamma
- Lognormal

Estas distribuciones se validan mediante pruebas de bondad de ajuste.

Las distribuciones de probabilidad constituyen una herramienta fundamental en el análisis y modelación de sistemas reales, ya que permiten representar de manera matemática el comportamiento aleatorio de las variables que intervienen en un proceso. En el contexto de la gestión de residuos sólidos urbanos, variables como los tiempos de servicio, los tiempos de traslado y la llegada de los vehículos presentan un comportamiento estocástico, lo que hace necesario el uso de distribuciones de probabilidad para su adecuada representación.

Una distribución de probabilidad describe la forma en que se distribuyen los posibles valores de una variable aleatoria y la probabilidad asociada a cada uno de ellos. Estas distribuciones pueden ser discretas o continuas, dependiendo de la naturaleza de la variable analizada. Entre las distribuciones más utilizadas en estudios de simulación se encuentran la distribución normal, exponencial, uniforme y lognormal, cada una de las cuales se selecciona en función de las características observadas en los datos reales.

La correcta identificación de la distribución de probabilidad que mejor representa los datos es un paso clave en el desarrollo de modelos de simulación confiables, ya que influye directamente en la validez de los resultados obtenidos. Para este fin, se emplean pruebas estadísticas de bondad de ajuste, como la prueba de Anderson–Darling, que permiten evaluar el grado de ajuste de los datos a una distribución teórica. en la Tabla 2.4 Se presenta las principales distribuciones continuas utilizadas en estadística y simulación, destacando sus características.

Tabla 2.4 Distribuciones continuas y sus características (*Fuente elaboración propia 2025*)

Distribución	Características	Función de densidad
Normal	La distribución normal representa una de las distribuciones más utilizadas en la estadística y la modelación. Walpole et al. (2012). En área de investigación aplicada principalmente al análisis de datos, su grafica tiene una forma simétrica y unimodal. en variables continuas se utiliza para modelar variables continuas como tiempos, peso, distancias o cantidades. (Depool Rivero & Monasterio, 2013)	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$
Gamma	Este modelo es comúnmente aplicado al análisis de tiempos de servicio, duración de actividades operativas y simulación de sistemas, particularmente cuando se requiere de una representación más realista del comportamiento del proceso. (Hines & Montgomery, 1996)	$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx, \text{ para } \alpha > 0$
Exponencial	La distribución exponencial es un modelo probabilístico continuo empleado para describir el tiempo transcurrido hasta que ocurre un	$f(x; \beta) = \int \frac{1}{\beta} e^{-x/\beta}, x > 0 \text{ en otro caso } 0,$

	evento específico.(Walpole et al., 2012)	
Ji-Cuadrada (x^2)	Compara datos reales con la función densidad o masa de una contribución asociada. De acuerdo con Levin & Rubín, (2004) la distribución ji-cuadrada es una herramienta fundamental para evaluar diferencias entre frecuencias observadas y esperadas dentro de estudios estadísticos y experimentales.	$f(x; v)$ $= \int \frac{1}{2^{v/2} \Gamma(v/2)} x^{v/2-1} e^{-x/2},$ $x > 0 \text{ en otro caso } 0,$
Logarítmica normal	La distribución lognormal, también conocida como distribución logarítmica normal, es una distribución de probabilidad continua utilizada para modelar variables positivas cuyos valores presentan asimetría hacia la derecha. Esta distribución se caracteriza porque el logaritmo natural de la variable sigue una distribución normal(Hines & Montgomery, 1996)	$f(x; \mu, \sigma)$ $= \int \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{\frac{1}{2\sigma^2}[\ln(x)-\mu]^2},$ $x \geq 0 \text{ o } , x < 0$
Weibull	Esta distribución fue desarrollada por Waloddi Weibull y se caracteriza por adaptarse a diferentes formas dependiendo de sus parámetros. Debido a ello, es frecuentemente utilizada para representar tiempos de falla,	$f(t)$ $= \beta \frac{(t - \delta)^{\beta-1}}{\theta} \exp \left[\left(\frac{t - \delta}{\theta} \right)^\beta \right], t$ $\geq \delta$ Donde: t $= \text{tiempo entre fallas}$ $(0 < \beta < \infty)$

	duración de actividades y comportamiento de sistemas sometidos a desgaste o variabilidad operativa.(Depool Rivero & Monasterio, 2013)	$(0 < \theta < \infty)$ $(-\infty < \delta < \infty)$
--	---	--

Fuente elaboración propia

2.7 Distribuciones discretas

Las distribuciones discretas son herramientas estadísticas utilizadas para describir variables aleatorias que únicamente pueden tomar valores enteros y contables. De acuerdo con Walpole et al. (2012), las distribuciones discretas permiten analizar fenómenos probabilísticos relacionados con conteos y frecuencias, logrando facilitar el comportamiento de los datos en un sistema. por lo que en la Tabla 2.5 muestra las principales distribuciones discretas empleadas en estadística y simulación, así como sus aplicaciones dentro de sistemas operativos y modelos probabilísticos relacionados con la recolección de residuos sólidos urbanos.

Tabla 2.5 Distribuciones discretas y sus características

Distribución	Características	Función densidad
Uniforme	Su principal característica es que la distribución uniforme discreta es una probabilidad utilizada para representar variables aleatorias discretas en las que todos los valores posibles tienen la misma probabilidad de ocurrir.	$f(x) = \frac{1}{\sqrt[n]{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$
Binomial	De acuerdo con Walpole et al. (2012), la distribución binomial	$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx, para \alpha > 0$

	permite analizar situaciones donde la probabilidad de éxito permanece constante en cada ensayo y los resultados obtenidos son independientes entre si	
Hipergeométrica	Para Montgomery & Runger, (2018), la distribución binomial permite analizar situaciones donde la probabilidad de éxito permanece contante en cada ensayo y los resultados son independientes entre sí.	$f(x; \beta)$ $= \int \frac{1}{\beta} e^{-x/\beta}, x$ $> 0 \text{ en otro caso } 0,$
Poisson	Para Levin & Rubín. (2004), esta distribución es útil para representar fenómenos donde se requiera analizar frecuencias de ocurrencia dentro de los procesos operativos y sistemas dinámicos. Asimismo, esta distribución permite representar de forma más realista el comportamiento de los eventos aleatorios.	$f(x; v)$ $= \int \frac{1}{2^{v/2} \Gamma(v/2)} x^{v/2-1} e^{-x/2}, x$ $> 0 \text{ en otro caso } 0,$

2.8 Pruebas de bondad de ajuste

Todas de las técnicas de estadística inferencias son eficientes en la medida que se cumplen sus supuestos, uno de los más importantes es que la población con la que se esté trabajando esté definida por una variable que siga una cierta distribución de probabilidad. (Arriola Rodriguez, 2019).

Las pruebas de bondad de ajuste son técnicas que permiten comprobar el tipo de distribución que sigue un conjunto de datos y dentro de las más valiosas se encuentran las desarrollada por k. Pearson, la kolmogorov- Sminvov, y Anderson -Darling, en la siguiente tabla se describe cada una de estas técnicas con sus respectivas formulas.

Tabla 2.6 Principales pruebas de bondad de ajuste (Fuente: elaboración propia 2025)

Tipo de prueba	Descripción	Formula
Kolmogorov-sminov (k-s)	Esta prueba se utiliza en estadística para determinar si un conjunto de datos se ajusta adecuadamente a una distribución de probabilidad teórica. Esta prueba compara la distribución acumulada observada de los datos con la distribución acumulada esperada, permitiendo evaluar el nivel de similitud entre ambas distribuciones (Montomery & Runger, 2018)	$D^+ = \max\{i/n - F^*(Xi)\}$ $D = \max\{F^*(Xi) - (i - 1)/n\}$
Ji-cuadrada	Se utiliza para analizar la relación entre variables categóricas, es decir variables	$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(Oi - Ei)^2}{Ei}$

	que se expresan en categorías o clases. Su principal función es determinar si existe una diferencia significativa entre los valores observados y los valores esperados.	
Anderson-Darling (A-D)	Es una prueba estadística no paramétrica de bondad de ajuste que se utiliza para evaluar si un conjunto de datos proviene de una distribución específica. Esta prueba se basa en la comparación entre la distribución acumulada observada y la distribución acumulada esperada, otorgando mayor importancia a las diferencias presentes en los extremos de la distribución (Montgomery & Runger, 2018).	$A^2 = -n - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [(2i-1) * (\ln F(x_i) + \ln(1 - F(X_{n+1-i})))]$

2.9 Software Simio

Simio es un software de simulación de eventos discretos que combina la modelación orientada a objetos con herramientas avanzadas de análisis y visualización. Su diseño permite representar sistemas complejos de forma flexible, integrando entidades, recursos, procesos y restricciones operativas en un entorno gráfico intuitivo.

Una de las principales características de Simio es su capacidad para modelar sistemas dinámicos de transporte y logística, lo que lo convierte en una herramienta adecuada para el análisis de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos. A través de Simio, es posible simular tanto

las rutas actuales como las rutas optimizadas, incorporando tiempos de servicio, velocidades de desplazamiento y capacidad de los vehículos recolectores.

Además, Simio ofrece herramientas estadísticas que facilitan el análisis de resultados, permitiendo comparar distintos escenarios y evaluar indicadores clave de desempeño, como el tiempo promedio en el sistema y la utilización de los recursos. De esta manera, el uso de Simio complementa la optimización de rutas mediante el modelo TSP, proporcionando una evaluación integral del desempeño operativo del sistema de recolección.

2.9.1 Características

Simio es un software de simulación de eventos discretos que permite modelar y analizar sistemas complejos mediante un enfoque orientado a objetos. Sus características facilitan la incorporación de variabilidad, la comparación de escenarios y el análisis estadístico de resultados, lo que lo convierte en una herramienta adecuada para evaluar el desempeño de sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos.

Tabla 2.7 Elementos del simulador (Fuente elaboración propia 2025)

Nombre	Símbolo	Descripción
Source		Genera entidades (clientes, camiones, productos)
Sink		Elimina entidades al final del sistema.
Server		Representa procesos donde se realiza un servicio o actividad.
Combiner		Se utiliza para combinar varias entidades en un solo grupo principal.
Separator		Separa los miembros de un grupo de entidades, genera copias de una entidad o crea nuevas al concluir el proceso y dejar de emplear las copias.
Resource		Representan los recursos limitados para llevar a cabo una operación o servicio dentro del sistema simulado
Vehicle		Recursos móviles con capacidad (camiones recolectores).
Worker		Recursos móviles (operadores, personal).

BasickNode		Puntos de conexión o decisión. Generalmente se usa para nodos inputs de objetos como el sink, server, etc.
TransferNode		Controla el flujo entre procesos. Tiene la capacidad de elegir el destino de la entidad.
Connector		Tiene la función de establecer una dirección sin distancias entre un nodo de ubicación y otro.
Path		Se utiliza para representar un trayecto físico por el cual se desplazan entidades, trabajadores o vehículos dentro del sistema
TimePath		Representa un trayecto en el cual el tiempo de desplazamiento es fijo o definido por una distribución independientemente de la distancia física.
Converyour		Se utiliza para trasladar entidades entre dos nodos, empleando una acumulación o sin ninguna en este proceso.

Capitulo 3 Metodología

En este capítulo se describe el procedimiento metodológico empleado para analizar y optimizar las rutas de recolección de los residuos sólidos del programa de Servicios Especializados de la ciudad de Orizaba. La investigación se desarrolló mediante la integración de técnicas de optimización y simulación, tomando como referencia la metodología para el desarrollo de modelos de simulación propuesta por Law & Kelton (2015), reconocida por proporcionar una estructura ordenada para el desarrollo de modelos de simulación aplicados a sistemas complejos.

En la presente investigación, la aplicación de esta metodología permitió analizar el funcionamiento actual de las rutas de recolección, identificar áreas de oportunidad y evaluar alternativas orientadas a mejorar la eficiencia operativa del sistema. Para ello, se realizaron actividades relacionadas con la recopilación de información, observación del proceso de

recolección, análisis de tiempos y recorridos, así como la identificación de variables que influyen en el desempeño del servicio.

Asimismo, se desarrolló un modelo de simulación utilizando el software Simio, herramienta que permitió representar el comportamiento del sistema de recolección y analizar distintas propuestas de optimización bajo condiciones operativas similares a las existentes en el municipio.

3.1 Formulación del problema

El presente estudio parte de la identificación de condiciones de operación que pueden afectar el desempeño de las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos correspondientes al programa de Servicios Especializados de la ciudad de Orizaba, Veracruz. El sistema contempla cinco rutas: Norte, Sur, Centro, Calle Real y Orgánica, cuya configuración se ha establecido principalmente con base en la experiencia del personal operativo.

La planeación de los recorridos sin un análisis cuantitativo de la secuencia de atención de los puntos de recolección dificulta determinar si las rutas actuales corresponden a alternativas eficientes.

Para valorar objetivamente estas condiciones, es necesario considerar indicadores que permitan comparar el comportamiento de las rutas bajo diferentes configuraciones.

3.2 Recopilación de datos y definición del modelo

Para caracterizar el sistema de recolección de residuos sólidos urbanos del programa de **Servicios Especializados** de la ciudad de Orizaba, Veracruz, se recopiló información correspondiente a las cinco rutas analizadas, con el apoyo del Departamento de Limpia Pública. El levantamiento de información se realizó durante **cinco días consecutivos**, considerando el horario de operación comprendido entre las **6:00 y las 15:00 horas**.

Durante este proceso se registraron las principales condiciones de operación de las rutas, incluyendo la secuencia de atención de los puntos de recolección, los tiempos asociados

a las paradas, la duración de los recorridos y las condiciones observadas durante el desplazamiento de las unidades. Asimismo, se consideraron parámetros relacionados con la operación de los vehículos recolectores, tales como velocidad promedio, capacidad y horario de servicio. Esta información permitió establecer las condiciones iniciales necesarias para representar el funcionamiento del sistema mediante simulación.

A partir de los datos obtenidos se desarrolló el modelo conceptual del sistema, identificando sus principales elementos, relaciones y condiciones de operación. Para su estructuración se consideraron como elementos del modelo las rutas, los vehículos y los puntos de recolección, además de los recursos y restricciones asociados al proceso de servicio.

Posteriormente, el modelo conceptual fue implementado en el software **SIMIO**, incorporando los parámetros obtenidos durante el levantamiento de información con el propósito de representar el comportamiento operativo de las rutas estudiadas. Para la representación de la variabilidad de determinados procesos se utilizaron distribuciones de probabilidad de acuerdo con las características de los datos disponibles. En particular, se consideró la distribución uniforme para aquellos parámetros cuya variación fue representada mediante valores mínimos y máximos, conforme al criterio establecido en la investigación de Cruz García et al. (2023).

La información recopilada constituyó la base para la construcción y posterior evaluación del modelo de simulación, permitiendo analizar el comportamiento de las rutas bajo las condiciones actuales de operación y, posteriormente, comparar su desempeño con las alternativas obtenidas mediante el proceso de optimización.



Figura 3. Taller del Servicio Municipal Orizaba SERMUN (Fuente elaboración propia 2025)

La siguiente tabla muestra los datos que se recolectaron por cada ruta.

3.2.1 Ruta Norte

La ruta norte comprende 26 lugares visitados realizando un recorrido de un total 9 hora aproximadamente ya que las distancias recorridas en un punto a otro son considerables.

Los valores recolectados ayudaron a construir la tabla 3.1 el cual incluye la programación que se introduce en el simulador Simio

Tabla 3.1. datos recolectados de la ruta Norte (Fuente elaboración propia 2025)

CV O	Servicio	Hora de llegada	Hora de salida	Tiempo de traslado (min)	Tiempo de servicio (min)	Tiempo de trayectoria	Tiempo de procesamiento
	SERMUN		06:15			Random.Uniform(10,20)	
1	Panadería Flores	06:45	07:26	30	41	Random.Uniform(29.5,30.5)	Random.Uniform(40.5,41.5)
2	Plaza valle	07:33	09:43	7	133	Random.Uniform(6.5,7.5)	Random.Uniform(132.5,133.5)
3	Esc. Primaria Hermenegildo	09:59	10:08	16	9	Random.Uniform(15.5,16.5)	Random.Uniform(8.5,9.5)
4	Little Caesars	10:15	10:30	7	15	Random.Uniform(6.5,7.5)	Random.Uniform(14.5,15.5)
5	Reciclados Beto	10:35	10:52	5	17	Random.Uniform(4.5,5.5)	Random.Uniform(16.5,17.5)

6	.Coppel	11:00	11:12	8	12	Random.Uniform(7.5,8.5)	Random.Uniform(11.5,12.5)
7	.Elektra	11:14	11:19	2	5	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(4.5,5.5)
8	Centro de atención primaria	10:30	10:33	11	3	Random.Uniform(10.5,11.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
...	.						
...	.						
...	.						
25	Pastelería Mayita	14:41	14:49	8	8	Random.Uniform(7.5,8.5)	Random.Uniform(7.5,8.5)
26	Hotel Rio	14:57	14:59	8	2	Random.Uniform(7.5,8.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)

En la Ilustración 1.1 Ilustración 3.1 Visión general del recorrido que se realiza de la Ruta Norte.

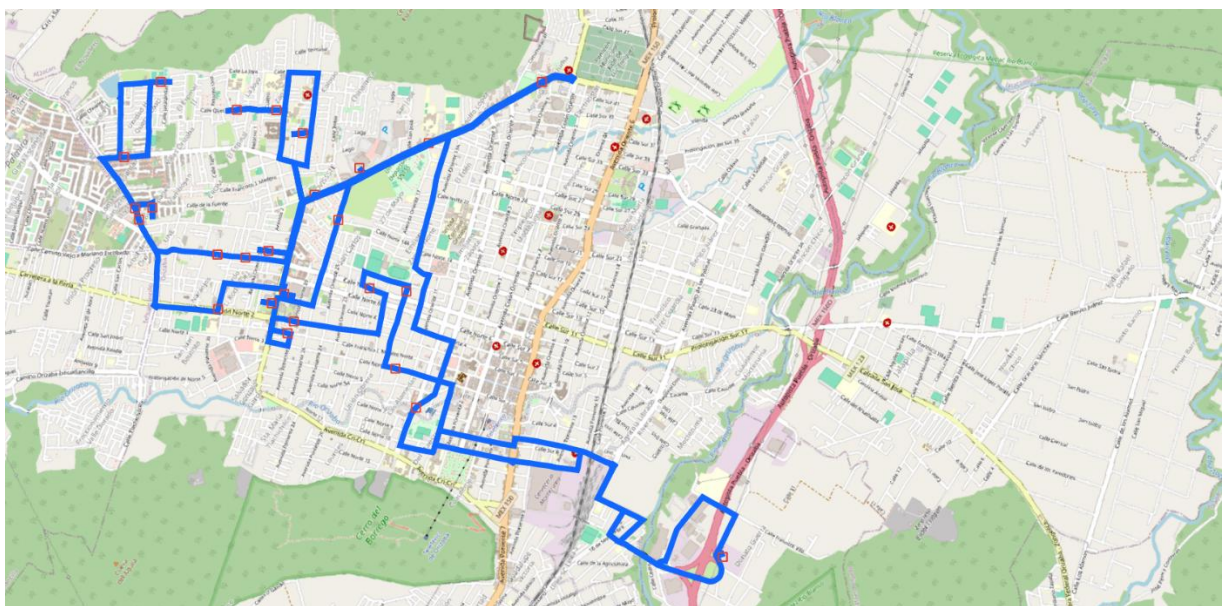


Ilustración 3.1. Mapa del recorrido de la Ruta Norte del Servicio Especializado (Fuente elaboración propia 2025)

3.2.2 Ruta orgánica

Esta ruta se caracteriza principalmente por que incluye la recolección de los principales mercados con los que cuenta la ciudad de Orizaba como son: el mercado Zapata, mercado San Juan de los Cerritos, mercado de las Flores, mercado Melchor Ocampo, además debido al gran volumen que se recolecta de residuos en ocasiones fue necesario ir a descargar el camión

recolector debido a que esta logra su capacidad máxima y posteriormente inicia el recorrido en el punto siguiente

Tabla 3.2. Datos recolectados de la Ruta Orgánica (Fuente: Elaboración propia 2025)

CV O	Servicio	Hora de llegad a	Hora de salid a	Tiempo de traslad o (min)	Tiemp o de servici o (min)	Tiempo de trayectoria	Tiempo de procesamiento
	SERMUN		06:15			Random.Uniform(10,20)	
1	M.Melchor ocampo	06:34	06:47	30	13	Random.Uniform(29.5,30.5)	Random.Uniform(12.5,13.5)
2	H. Casa Mision O.	06:54	06:57	7	3	Random.Uniform(6.5,7.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
3	H. Pluvosilla	07:01	07:16	4	15	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(14.5,15.5)
4	M.Venustiano .C	07:17	07:18	1	1	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
5	M. Cerritos	07:34	08:10	15	36	Random.Uniform(14.5,15.5)	Random.Uniform(35.5,36.5)
6	Frutería los Bukis	08:22	08:43	12	21	Random.Uniform(11.5,12.5)	Random.Uniform(20.5,21.5)
7	M. Zapata	08:47	09:13	4	26	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(25.5,26.5)
8	DACSA	09:14	09:19	1	5	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(4.5,5.5)
...	.						
...	.						
...	.						
19	Guarderia Happy Drops	13:36	13:39	5	3	Random.Uniform(4.5,5.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
20	M. Emiliano Zapara	13:58	14:20	20	22	Random.Uniform(19.5,20.5)	Random.Uniform(21.5,22.5)

El recorrido realizado de la ruta Orgánica con la representación de los puntos se pueden observar en la ilustración 3.2 donde se puede identificar el cambio de ruta tras el nuevo seguimiento consecutivo de los puntos de recolección

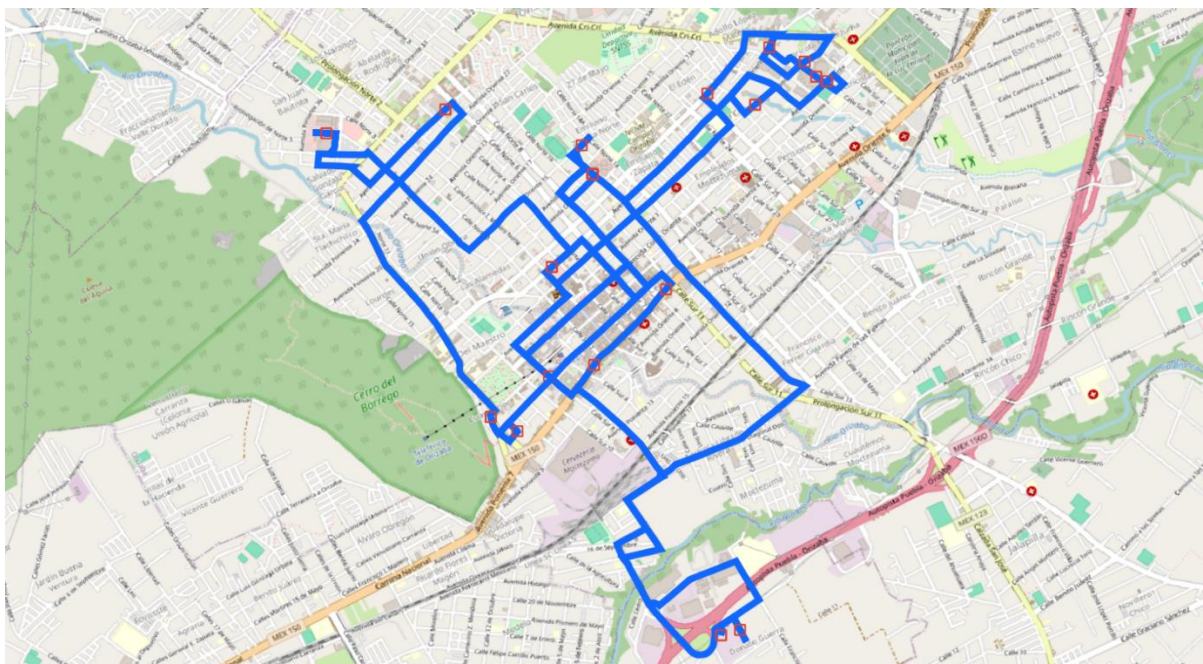


Ilustración 3.2. Mapa del recorrido de la Ruta orgánica. (Fuente: Elaboración Propia 2025)

3.2.3 Ruta sur

La ruta sur cuenta con 37 puntos de recolección, debido a la distribución geográfica los puntos se encuentran en distancias más largas entre uno y otro y representa un recorrido largo, además que integra principalmente guarderías y centros educativos por lo que abarca gran parte de la ciudad.

Tabla 3.3 Datos recolectados de la Ruta Sur (Fuente: elaboración propia 2025)

CVO	Servicio	Hora de llegada	Hora de salida	Tiempo de traslado (min)	Tiempo de servicio (min)	Tiempo de trayectoria	Tiempo de procesamiento
	SERMUN		06:00			Random.Uniform(10,20)	
1	Montosa	06:06	06:21	30	13	Random.Uniform(29.5,30.5)	Random.Uniform(12.5,13.5)
2	Carnitas Cadena	06:31	06:39	8	7	Random.Uniform(7.5,8.5)	Random.Uniform(6.5,7.5)
3	Rastro Municipal	06:47	07:02	15	6	Random.Uniform(14.5,15.5)	Random.Uniform(5.5,6.5)
4	Plaza Faro	07:10	07:25	8	15	Random.Uniform(7.5,8.5)	Random.Uniform(14.5,15.5)
5	Gasolinera Sur 33	07:27	07:28	3	1	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
6	Starbucks	07:30	07:34	2	4	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(3.5,4.5)
7	Esc. Felipe Suberbie	07:48	07:54	14	6	Random.Uniform(13.5,14.5)	Random.Uniform(5.5,6.5)

8	Mtto. Promotoría	08:02	08:06	8	4	Random.Uniform(7.5,8.5)	Random.Uniform(3.5,4.5)
...							
...							
...							
36	Esc. Primaria Aztlán	14:37	14:43	6	3	Random.Uniform(5.5,6.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
37	Jardín, Cri-Cri	14:44	14:48	1	4	Random.Uniform(19.5.,20.5)	Random.Uniform(3.5,4.5)

En la ilustración. 10 se representa el área de la ciudad que abarca el recorrido realizado por la ruta sur que es uno de los que abarca más área como se mencionó anteriormente.

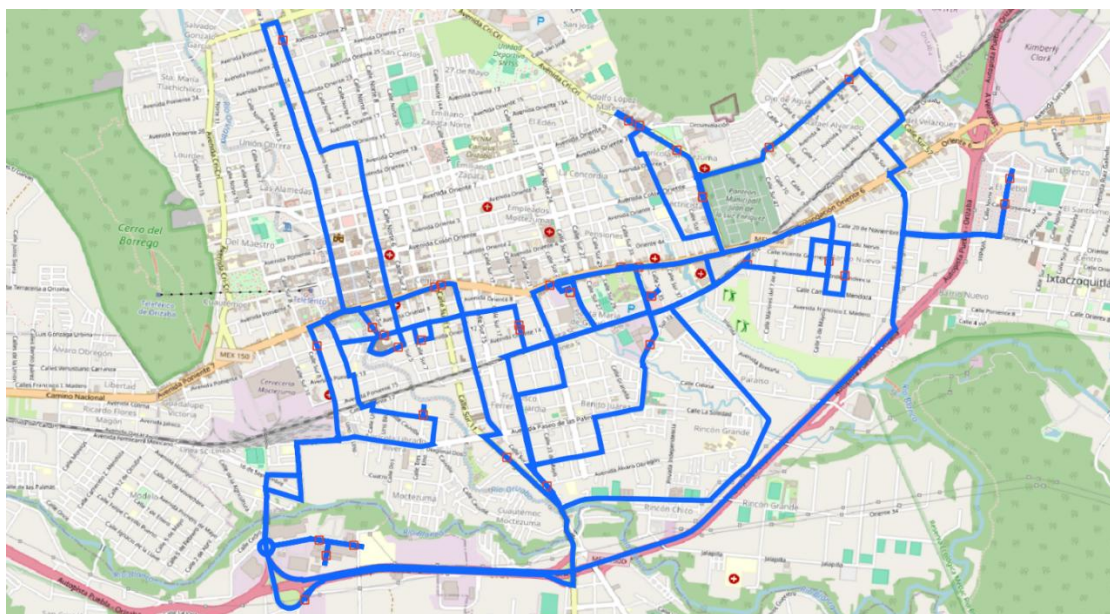


Ilustración 3.3 Mapa de recorrido de la Ruta Sur. (Fuente: elaboración propia 2025)

3.2.4 Ruta Centro

Esta ruta representa uno de los mayores puntos de recolección, ya que con 54 lugares visitados y una de las ventajas es que los lugares se encuentran concentradas en el centro de la ciudad, lo que a su vez también se vuelve una desventaja debido a que Orizaba tiene calles muy estrechas por lo que dificulta estacionarse en algunas áreas por lo que se tienen que hacer varios

recorridos hasta encontrar un punto medio y adecuado para la recolección, otra desventaja es el tráfico que se presenta en la mayoría de las calles por lo que hace que el recorrido sea más lento en esta área. En la siguiente tabla se concentran los datos recolectados de esta ruta.

Tabla 3.4. Datos recolectados de la Ruta Centro (Fuente: Elaboración Propia 2025)

CV O	Servicio	Hora de llegad a	Hora de salida	Tiempo de traslado (min)	Tiempo de servicio (min)	Tiempo de trayectoria	Tiempo de procesamiento
	SERMUN		6:15			Random.Uniform(10,20)	
1	Manitas que trabajan	6:34	6:47	30	13	Random.Uniform(29.5,30.5)	Random.Uniform(12.5,13.5)
2	Panadería Ara	06:56	06:58	9	3	Random.Uniform(0.8,0.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
3	Guardería Rébsamen	07:02	07:05	4	3	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
4	Quitakilos	07:09	07:15	4	6	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(5.5,6.5)
5	Guardería Cendimerelo	07:19	07:22	4	3	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
6	Cometra	07:23	07:26	1	3	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
7	Guardería Chiquitines	07:30	07:37	4	7	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(6.5,7.5)
8	Panadería los Ángeles	07:38	07:39	1	1	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
53	Scatttola	14:37	14:43	6	3	Random.Uniform(5.5,6.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
54	Soriana	14:44	14:48	1	4	Random.Uniform(19.5.,20.5)	Random.Uniform(3.5,4.5)

En la ilustración 11. Se puede observar la concentración de los puntos de recolección de la Ruta Centro.

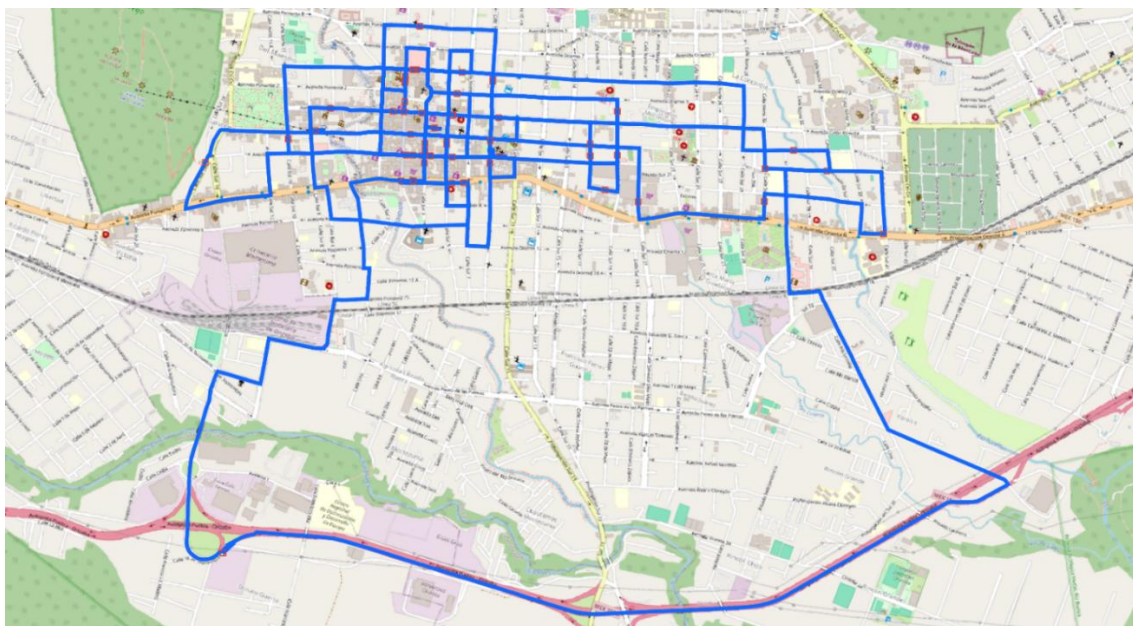


Ilustración 3.4. Mapa del recorrido de la Ruta Centro. (Fuente: Elaboración propia 2025)

3.2.5 Calle real

esta ruta recorre una de las calles principales de la ciudad de Orizaba, además de que recolecta residuos desechados por hospitales y centros de salud, además estos son desechados en el relleno sanitario de las Altas Montañas, por lo que representa una de las rutas que mayor recorrido hace a veces extendiéndose hasta 13 horas.

Tabla 3.5 Datos recolectados de la Ruta Calle Real (Fuente: Elaboración propia 2025)

CV O	Servicio	Hora de llegada	Hora de salida	Tiempo de traslado (min)	Tiempo de servicio (min)	Tiempo de trayectoria	Tiempo de procesamiento
	SERMUN		06:15			Random.Uniform(10.,20)	
1	La braza	7:21	7:23	45	2	Random.Uniform(43,44.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
2	Hospital concordia	07:28	07:31	5	3	Random.Uniform(4.5,5.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
3	Clínica 1 IMSS	07:32	07:44	1	12	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(11.5,12.5)
4	Centro de salud	07:47	08:29	3	42	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(41.5,42.5)
5	Plaza sora	08:29	08:40	1	11	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(10.5,12.5)
6	Análisis Chopo	08:42	08:43	2	1	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
7	ADO	08:44	08:53	1	9	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(8.5,9.5)
8	Centro CRIO	08:57	09:06	4	9	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(8.5,9.5)

38	UMF 3 Nogales	15:06	15:18	8	12	Random.Uniform(7.5,8.5)	Random.Uniform(11.5,12.5)
39	UMF 5, C.D Mendoza	15:29	15:36	11	7	Random.Uniform(10.5,11.5)	Random.Uniform(6.5,7.5)

Em el mapa de la Ruta Calle Real se puede observar que es la que hace un mayor recorrido debido a la disposición final de los desechos recolectados que tiene como destino final el relleno sanitario y por lo tanto representa mayor carga laboral. Véase ilustración 12.

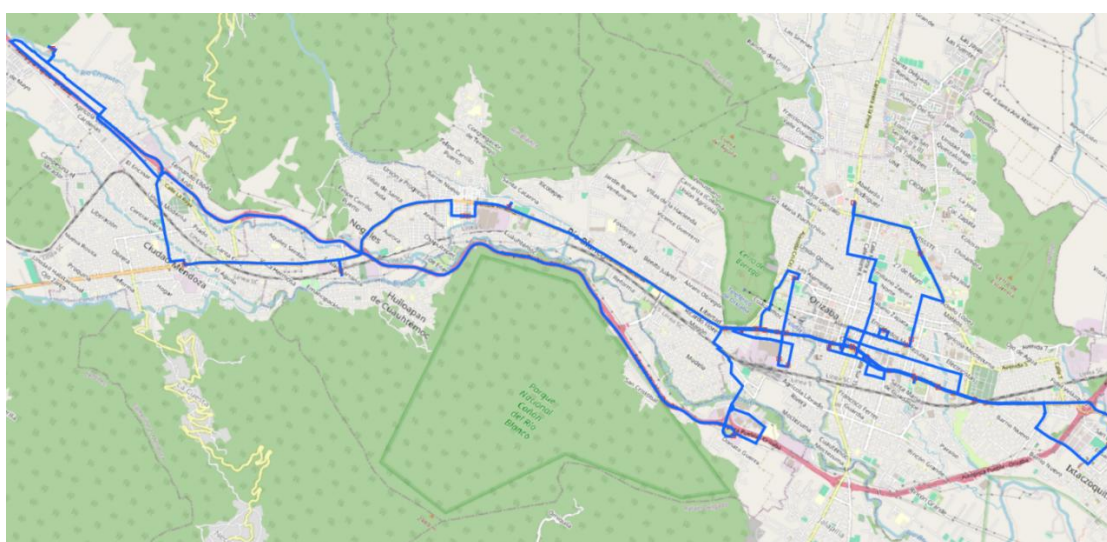


Ilustración 3.5. Mapa del recorrido de la Ruta Calle Real (Fuente: elaboración propia 2025)

3.3 Validación del modelo

La validación consistió en la revisión del modelo conceptual de manera que esta se asemeje lo más posible a las condiciones del sistema real de recolección. La revisión se llevó a cabo con la participación del personal encargado de la operación y del responsable del área de Limpia Pública, quienes aportaron información basada en su experiencia y conocimiento de las actividades realizadas en campo. Mediante entrevistas y sesiones de retroalimentación fue posible contrastar los supuestos establecidos inicialmente con la forma en que el servicio se desarrolla en la práctica.

A partir de esta revisión se realizaron los ajustes necesarios al planteamiento conceptual, con el propósito de asegurar que las variables y condiciones consideradas fueran consistentes con el funcionamiento del sistema real. Una vez comprobada esta correspondencia, se pudo continuar con la construcción y programación del modelo de simulación en SIMIO.

3.4 Construcción del modelo

Al concluir la validación del modelo conceptual, se procedió a la construcción del modelo en el software de simulación SIMIO. En esta etapa se trasladaron al entorno de simulación los elementos y condiciones previamente definidos, considerando las características de operación del servicio de recolección de residuos sólidos urbanos.

El modelo se construyó a partir de cinco rutas analizadas: Norte, Sur, Calle Real y Orgánica. Cada recorrido fue presentado de manera independiente respetando la secuencia de los puntos de recolección y las condiciones establecidas para la operación de los vehículos. Asimismo, se incorporaron al modelo los tiempos correspondientes a las actividades de servicio y desplazamiento, de acuerdo con la información obtenida durante la etapa de recolección y análisis de datos.

Para representar con mayor fidelidad la distribución del sistema, se utilizaron herramientas de georreferencia como Google Maps y Google My Maps estas herramientas fueron utilizadas como apoyo para identificar y ubicar los puntos de recolección, mientras que QGIS, en su versión 3.42 permitió trabajar con la información geográfica y preparar los elementos especiales necesarios para su incorporación al modelo.

Con la información geográfica obtenida fue integrada a SIMIO con el propósito de representar los recorridos de los vehículos y la ubicación de los puntos atendidos en cada ruta. De esta manera, modelo computacional permitió contar con una representación visual y operativa del sistema real, constituyendo la base para las posteriores corridas de simulación y el análisis de las alternativas de optimización.



Figura 3.1. Software QGIS (Fuente: Tomado de Google 2025)

Una vez teniendo las imágenes en el mapa se procede a cargarlos en el programa de simio para que mediante ella se puedan realizar el recorrido habitual de cada una de las rutas, para realizar dicho procedimiento se utilizan los comandos facility, DrawingVisibility Run. Como se muestra a continuación en la Ilustración 3.6

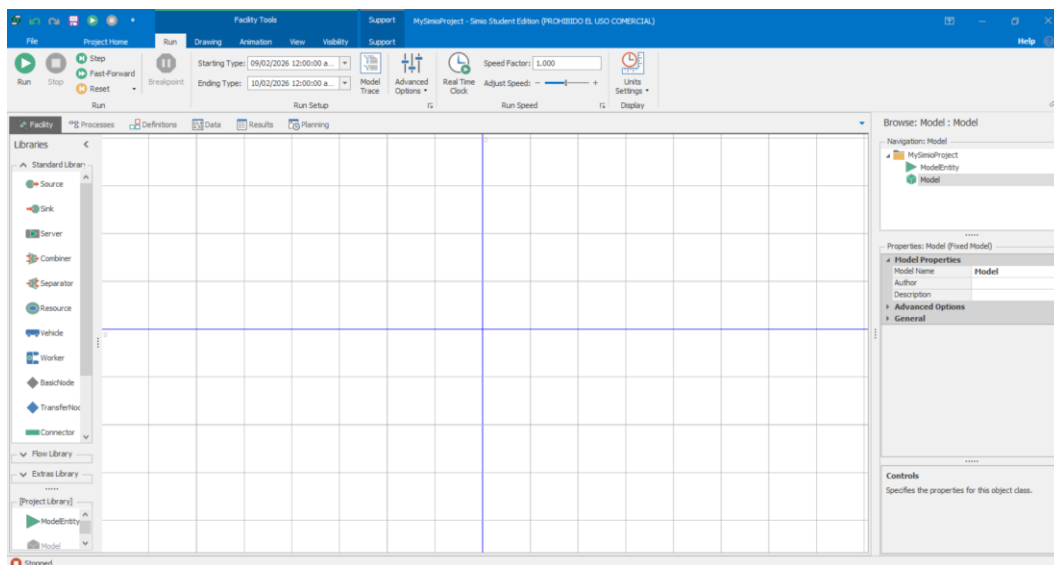


Ilustración 3.6. Interfaz principal de Simio (Fuente: elaboración propia 2025)

Una vez que nos encontramos en esta pantalla el siguiente paso es selección la pestaña Drawing nos permite agregar elementos gráficos o complementos que nos ayudaran en el desarrollo de

la simulación. Posteriormente la opción Place Symbol nos permite importar cada uno de los elementos que consideremos necesario, para este caso nos apoyaremos de los mapas creados con QGIS, como se muestra en la siguiente Ilustración 3.7 Pestaña Darwin, para cargar elementos Ilustración 3.7.

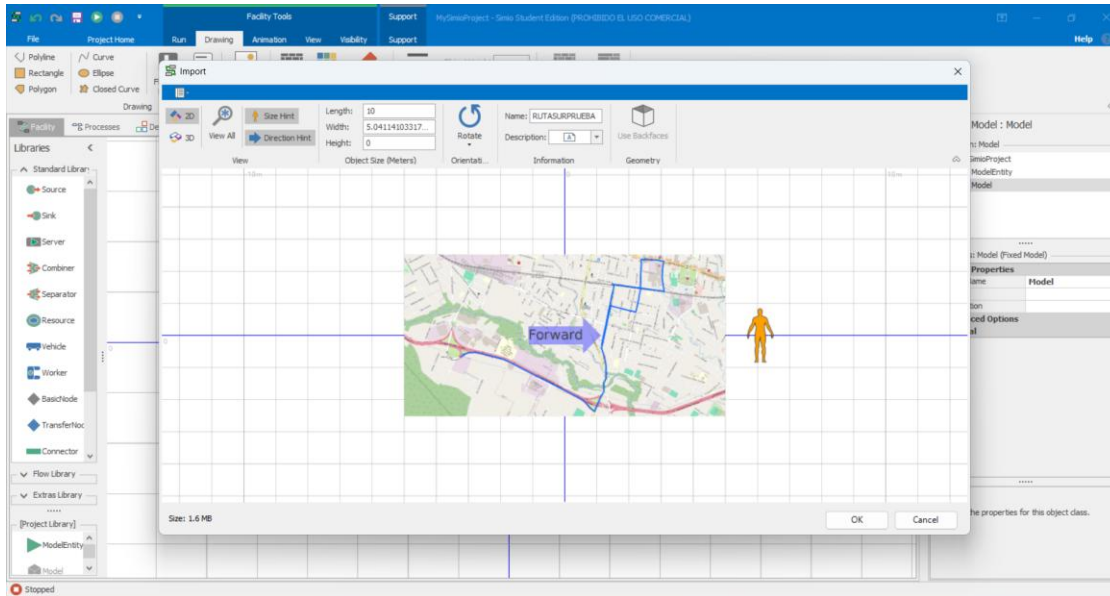


Ilustración 3.7 Pestaña Darwin, para cargar elementos (Fuente: elaboración propia 2025)

Antes de cargar la imagen o elemento se nos muestra una vista previa y si los que se selecciona es correcto procedemos oprimir el botón ok, una vez realizado esto nuestra venta que como se muestra a continuación en la Ilustración 3.8.

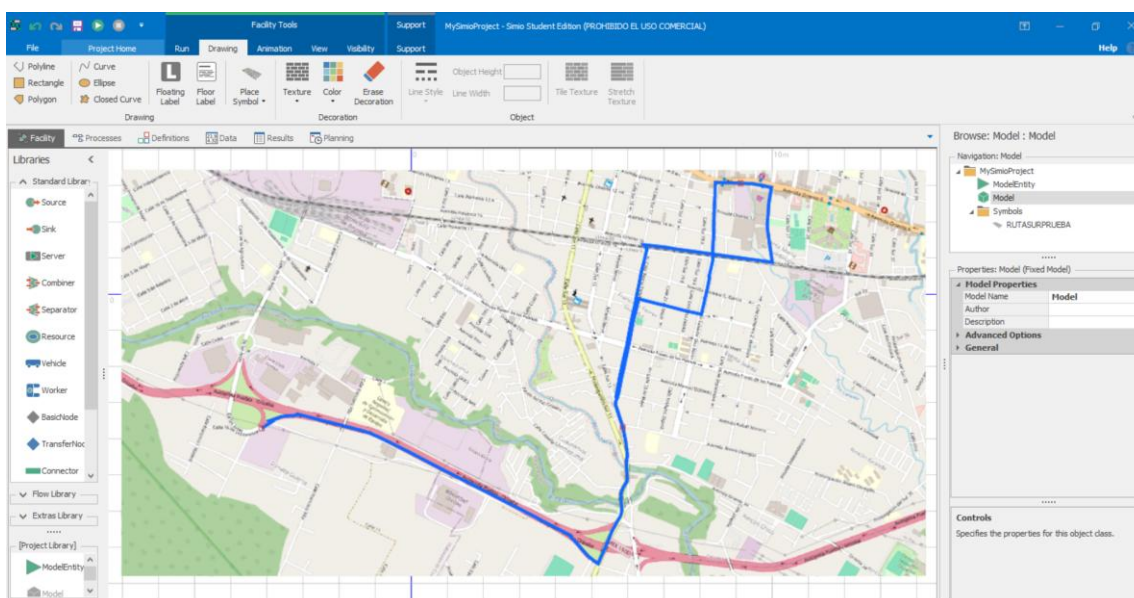


Ilustración 3.8, Mapa guía para desarrollo del modelo (Fuente:elaboración propia 2025)

EL comando visibility, permite tener una visión del entorno de trabajo, el cual es de gran ayuda para la gestión de visibilidad de distintos elementos, mientras que, la pestaña run, es el área con elementos que permiten la ejecución del programa y de esta forma analizar si el desarrollo del modelo es correcto.

3.4.1 Modelo de simulación en Simio de la Ruta Norte.

La ruta norte se caracteriza por concentrar un menor número de puntos de recolección en comparación con otras rutas establecidas dentro del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos de Orizaba. No obstante, una de sus principales particularidades radica en que la distancia existente entre cada punto de recolección es considerablemente mayor, lo que incrementa los tiempos de traslado y, en consecuencia, genera un mayor consumo de combustible y desgaste operativo de las unidades recolectoras.

Durante el análisis realizado mediante el modelo de simulación en Simio, se identificó que parte de la problemática de esta ruta se relaciona con el orden actual en el que se atienden los puntos de recolección, ya que en algunos tramos los vehículos recorren calles innecesarias o realizan desplazamientos que podrían optimizarse. Esta situación provoca recorridos más largos de lo requerido y reduce la eficiencia general del servicio.

A través de la simulación fue posible representar el comportamiento actual de la ruta, considerando variables como tiempos de traslado, distancias recorridas, capacidad de las unidades y tiempos de recolección en cada punto. Asimismo, el modelo permitió evaluar escenarios alternativos enfocados en la reestructuración del orden de atención de los puntos de recolección, con el objetivo de reducir distancias recorridas, minimizar tiempos muertos y mejorar el aprovechamiento de los recursos disponibles.

Los resultados obtenidos muestran que una adecuada reorganización de la secuencia de recorrido puede contribuir significativamente a eliminar trayectos innecesarios, optimizar el desplazamiento de las unidades recolectoras y mejorar la eficiencia operativa de la ruta norte.

La representación gráfica del recorrido y la distribución de los puntos de recolección puede observarse en la donde se muestra la configuración actual de la ruta dentro del modelo de simulación desarrollado en Simio.

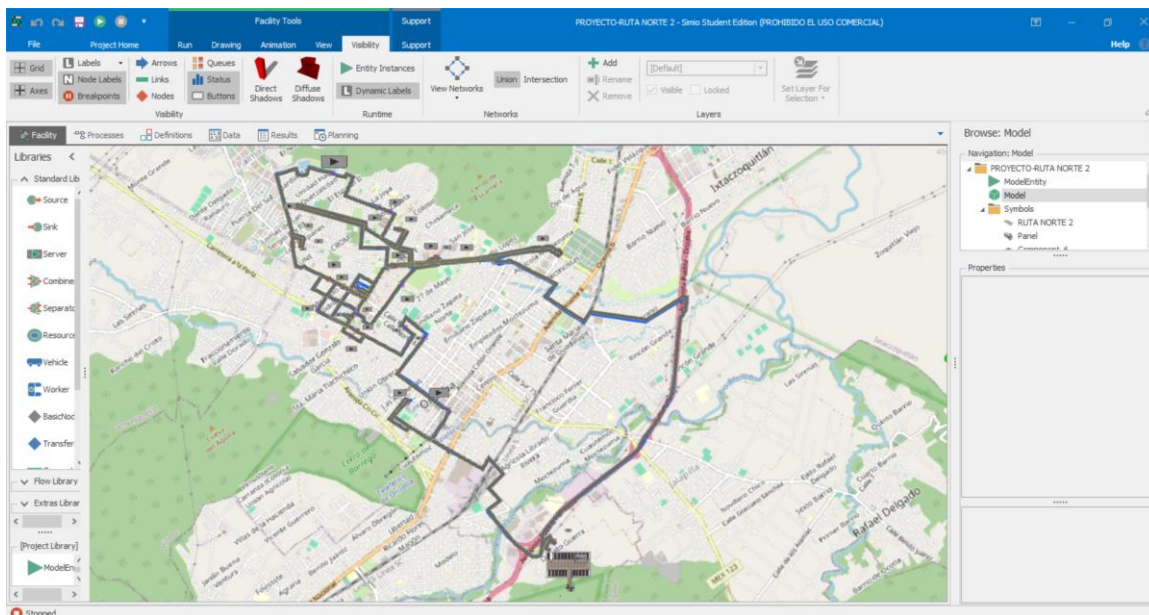


Ilustración 3.9 Modelo ruta norte. (Fuente: elaboración propia 2025)

Esta ruta consta de un menor número de puntos de recolección.

Gracias al simulador Simio fue posible representar el comportamiento del sistema de recolección de una manera más realista, permitiendo visualizar el funcionamiento de las rutas optimizadas dentro de un entorno dinámico de simulación. Esta herramienta facilitó el análisis

del recorrido de las unidades recolectoras, los tiempos de operación y la interacción entre los diferentes puntos de recolección.

Asimismo, la simulación en 3D permitió observar de forma gráfica el comportamiento de las rutas propuestas, brindando una mejor comprensión del desempeño operativo del sistema y facilitando la identificación de áreas de mejora. A continuación, se presenta la ilustración correspondiente a la representación tridimensional del modelo desarrollado en Simio.



Ilustración 3.10 Modelo 3D en Simio (Fuente: elaboración propia 2025)

3.4.2 Modelo de simulación en Simio de la Ruta Orgánica.

La ruta orgánica, como su nombre lo indica, está destinada a la recolección de residuos sólidos orgánicos generados principalmente en los mercados de la ciudad de Orizaba. Esta ruta se

distingue por contar con el menor número de puntos de recolección en comparación con las demás rutas; sin embargo, presenta una particularidad importante: los residuos recolectados se generan en grandes volúmenes debido a su naturaleza.

Esta situación ocasiona diversos desafíos operativos, entre los que destaca el rápido llenado de los camiones recolectores, limitado por su capacidad de carga. Como consecuencia, en determinadas ocasiones es necesario que la unidad interrumpa temporalmente su recorrido para trasladarse a la planta de almacenamiento y realizar la descarga correspondiente. Alternativamente, cuando existe disponibilidad de otra unidad, se puede asignar un nuevo camión para continuar con la recolección, permitiendo que el proceso se reincorpore a la ruta desde el punto donde fue interrumpido.

El modelo de simulación desarrollado en Simio permite representar estas condiciones operativas, analizar el comportamiento de la ruta y evaluar alternativas que contribuyan a mejorar la eficiencia del proceso de recolección.

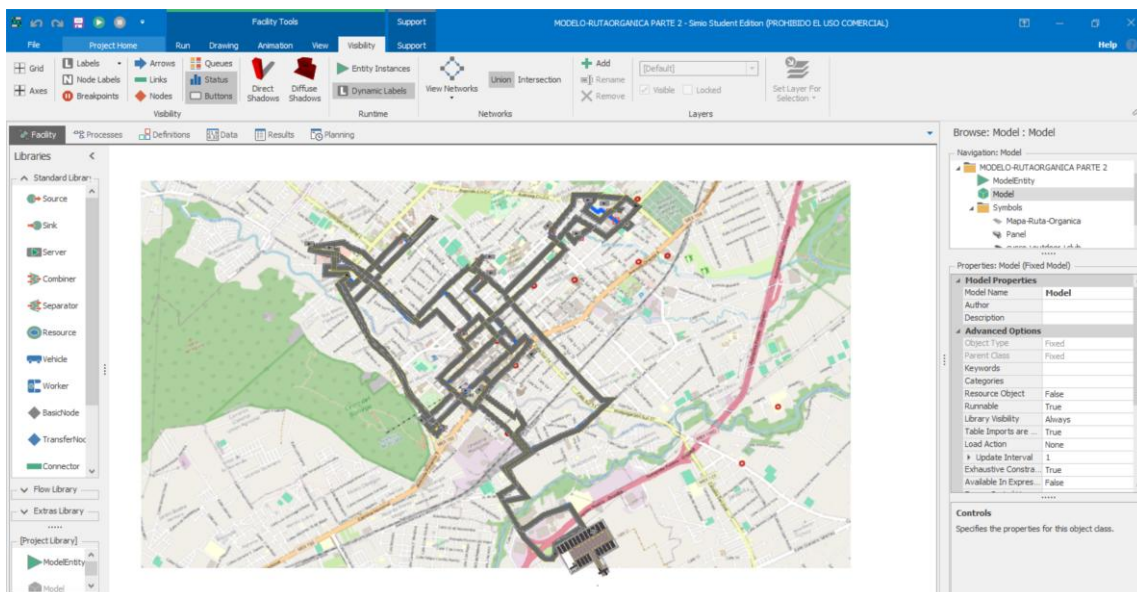


Ilustración 3.11 Simulación de la ruta Orgánica. (Fuente: elaboración propia 2025)

3.4.3 Modelo de simulación en Simio de la Ruta Real

La ruta Real se distingue por realizar el recorrido más extenso dentro del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos de Orizaba, ya que atraviesa principalmente la vialidad principal

de la ciudad y está enfocada en la recolección de residuos generados, en su mayoría, por clínicas y hospitales tanto públicos como privados. Una vez concluida la recolección en los puntos asignados, la unidad tiene como destino final el relleno sanitario ubicado en Ciudad Mendoza para la disposición final de los residuos.

Aunque esta ruta no cuenta con un número elevado de puntos de recolección, presenta retos operativos importantes debido a las grandes distancias entre cada punto y al volumen considerable de residuos recolectados en cada parada. Estas condiciones provocan que los tiempos de traslado y recolección sean significativamente mayores en comparación con otras rutas.

Mediante el modelo de simulación desarrollado en **Simio**, fue posible representar de manera detallada el comportamiento operativo de esta ruta, considerando variables como tiempos de desplazamiento, capacidad de carga de las unidades, volumen de residuos recolectados y tiempo total de recorrido. El análisis evidenció que la combinación de largas distancias y altos volúmenes de recolección convierte a esta ruta en una de las más demandantes en términos de tiempo y recursos operativos.

Como resultado, se determinó que el tiempo total de operación de la ruta Real puede alcanzar aproximadamente 12 horas por jornada, lo que la posiciona como una de las rutas con mayor duración dentro del sistema. A partir de la simulación, se pueden plantear estrategias de optimización orientadas a reducir tiempos de traslado, mejorar la asignación de recursos y aumentar la eficiencia del servicio.

La representación gráfica de esta ruta dentro del modelo de simulación puede observarse en la Ilustración 3.12 donde se muestra el recorrido completo y la ubicación de los puntos de recolección considerados.

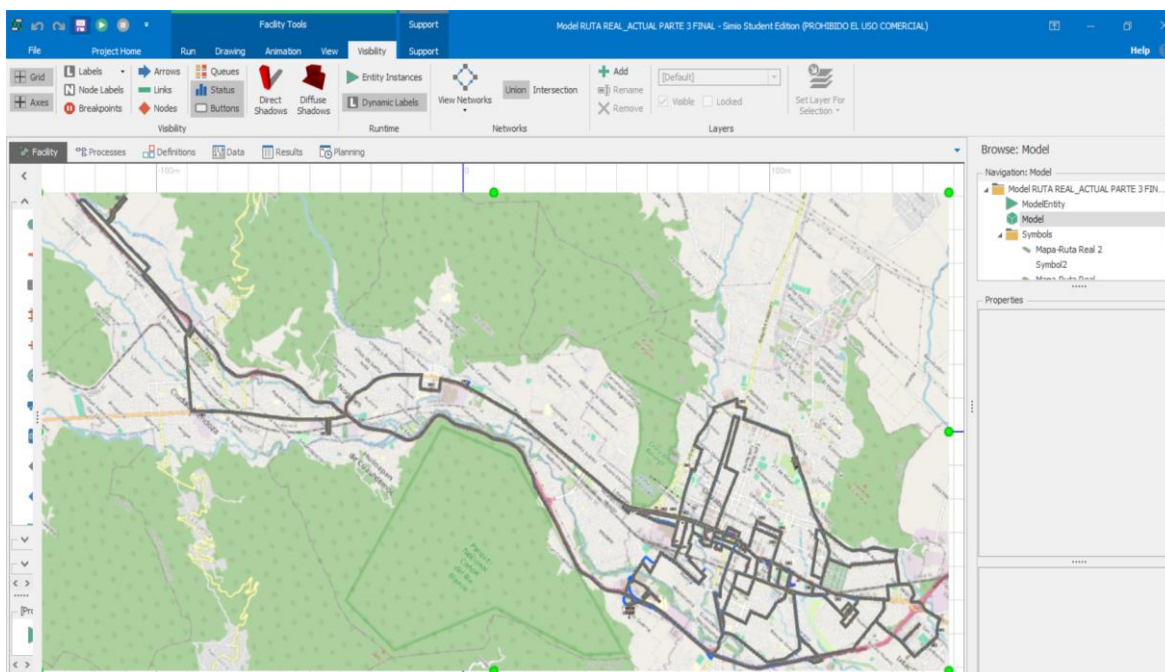


Ilustración 3.12 Simulación ruta Real (Fuente: elaboración propia 2025)

3.4.4 Modelo de simulación en Simio de la Ruta sur

La ruta sur está conformada por servicios de recolección enfocados principalmente en los residuos generados por el sector industrial, lo que implica que las unidades recorran una parte importante de la zona industrial de Orizaba. Asimismo, esta ruta también atiende diversos comercios ubicados dentro de la ciudad, lo que genera una combinación de puntos de recolección con características operativas distintas.

Una de las principales particularidades de esta ruta es la diversidad en los volúmenes y tipos de residuos recolectados, ya que los residuos provenientes de la industria suelen generarse en cantidades mayores y requieren tiempos específicos para su carga, mientras que los comercios presentan volúmenes más variables dependiendo de su actividad económica. Esta situación provoca que los tiempos de servicio en cada punto no sean homogéneos y que la planificación de la ruta requiera una mayor coordinación.

La representación de esta ruta dentro del modelo de simulación puede observarse en la Ilustración 3.13, donde se muestra la distribución de los puntos de recolección y el recorrido realizado por la unidad.

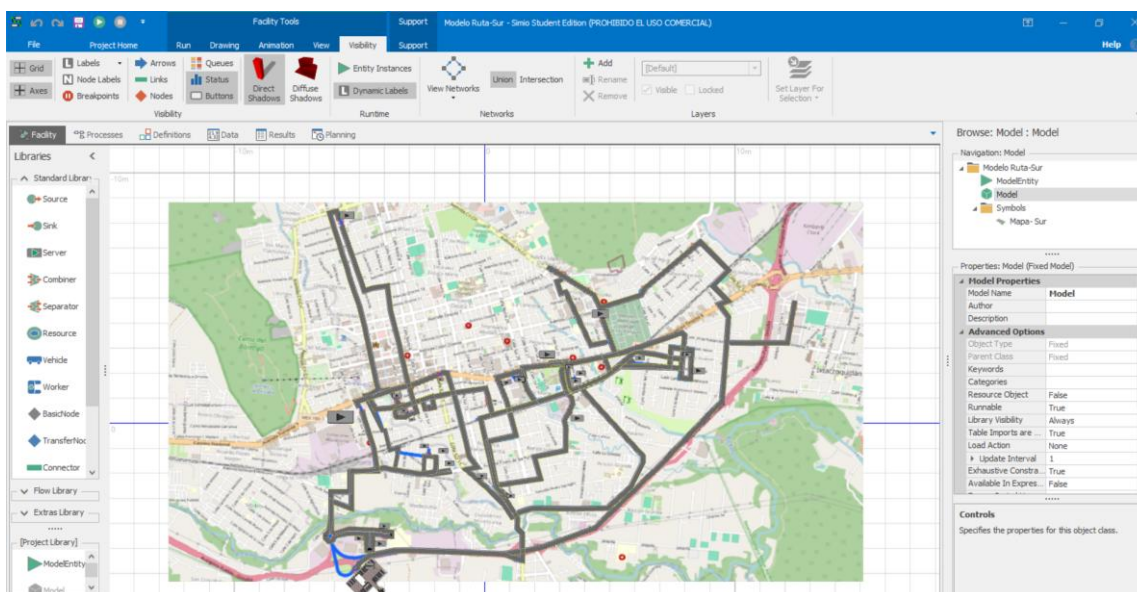


Ilustración 3.13 Simulación Ruta Sur (Fuente: elaboración propia 2025)

3.4.5 Modelo de simulación en Simio de la Ruta Centro

La ruta centro es una de las más congestionadas dentro del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos de Orizaba, debido a que concentra una alta densidad de puntos de recolección, contando con un total de 56 puntos, lo que la convierte en una de las rutas con mayor carga operativa.

Una de las principales características de esta ruta es el intenso flujo vehicular que se presenta en las calles del centro de la ciudad, lo que dificulta el acceso de las unidades recolectoras a ciertos establecimientos y retrasa el proceso de recolección. En diversos casos, el camión debe estacionarse en puntos estratégicos que le permitan realizar la recolección simultánea de residuos de varios comercios cercanos, buscando reducir maniobras innecesarias y optimizar el tiempo de servicio.

Esta situación puede generar un mayor consumo de combustible, debido a los tiempos de espera ocasionados por el tráfico, las constantes detenciones y las maniobras requeridas para acceder a determinados puntos de recolección. Sin embargo, a diferencia de otras rutas, una ventaja significativa de la ruta centro es que las distancias recorridas entre cada punto son considerablemente más cortas, lo que reduce los tiempos de traslado y permite una mayor frecuencia de atención.

La representación gráfica de esta ruta dentro del modelo de simulación puede observarse en la Ilustración 3.14

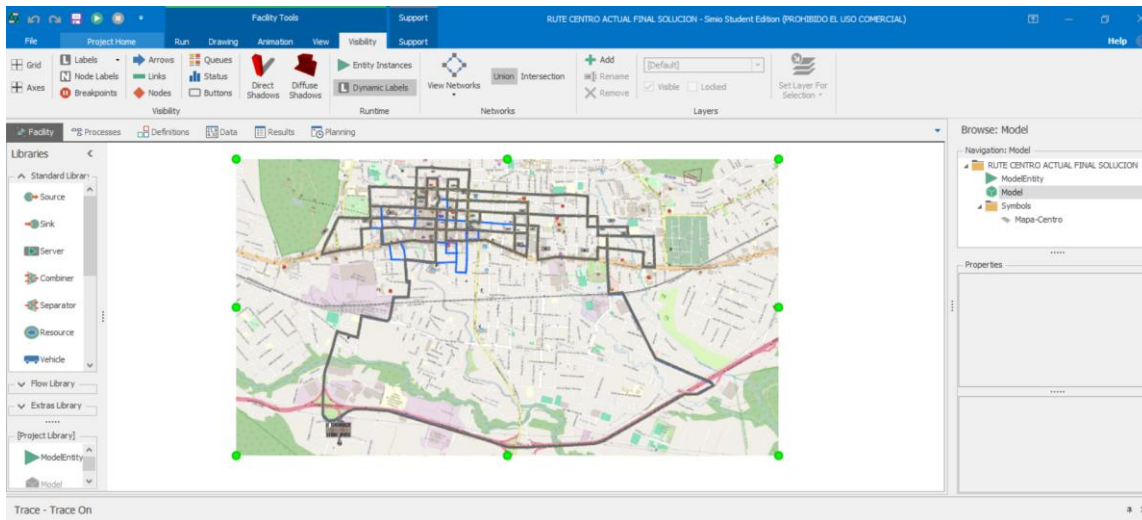


Ilustración 3.14 Simulación Ruta Centro (Fuente: elaboración propia 2025)

3.5 Ejecución de pruebas pilotos

Para la ejecución de las corridas piloto del modelo de simulación, no existe una fórmula específica que permita determinar de manera exacta el número óptimo de corridas iniciales requeridas. Por esta razón, la selección del número de pruebas se realizó con base en un criterio práctico y de manera arbitraria, considerando la necesidad de obtener resultados preliminares que permitieran evaluar el comportamiento del sistema.

En este sentido, se determinó realizar un total de **18 corridas piloto**, las cuales sirvieron para identificar la variabilidad de los resultados, verificar el correcto funcionamiento del modelo y obtener información inicial para el análisis posterior.

Los datos obtenidos en estas pruebas permitieron establecer parámetros de referencia para la etapa de experimentación formal y contribuyeron a validar que el modelo representara

adecuadamente las condiciones operativas del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos.

Tabla 3.6. Corridas piloto de rutas en SIMIO

Tabla 3.7 Corridas piloto de rutas en SIMIO

Ruta	Corridas piloto	Tiempo promedio en el sistema(horas)
Centro	18	7.394
Norte	18	8.7031
Sur	18	8.1224
Orgánica	18	8.2612
Calle real	18	10.144

Fuente: elaboración propia 2025.

3.6 Validación del modelo programado

La validación del modelo representa una de las fases fundamentales dentro del proceso de simulación, debido a que permite verificar que el modelo desarrollado reproduzca de manera adecuada el comportamiento del sistema real. Según señalan Banks et al. (2010), la validación consiste en determinar si el modelo construido es una representación suficientemente precisa del sistema para cumplir con los objetivos del estudio.

En esta etapa se comparan los resultados generados por el modelo de simulación con los datos reales obtenidos durante el trabajo de campo, con la finalidad de evaluar el grado de precisión y confiabilidad de las estimaciones realizadas. De acuerdo con Law. (2015) un modelo validado proporciona mayor certeza en la toma de decisiones y en la evaluación de escenarios de mejora.

Para validar el modelo programado se utilizaron dos métodos estadísticos: el Error Cuadrático Medio (MSE, *Mean Squared Error*) y la prueba estadística t-pareada. Ambos procedimientos permitieron medir el nivel de diferencia existente entre los datos observados y los valores obtenidos mediante la simulación.

El Error Cuadrático Medio (MSE) es un indicador ampliamente utilizado para cuantificar la precisión de un modelo, ya que mide el promedio de los errores al cuadrado entre los valores reales y los valores estimados. Este método eleva las diferencias al cuadrado con el propósito de evitar que los errores positivos y negativos se cancelen entre sí, permitiendo obtener una medida más precisa del error total del modelo (Montgomery & Runger, 2018).

La ecuación utilizada para el cálculo del MSE fue la siguiente:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

Donde:

(MSE) = *Error Cuadrático Medio*.

Y_i = *valor real observado*.

$\hat{Y}_i$ = *valor estimado por el modelo*.

(n) = *número total de observaciones*.

$(Y_i - \hat{Y}_i)^2$ = *Diferencia al cuadrado entre el valor real y el estimado*

Un valor reducido de MSE indica que el modelo presenta un comportamiento cercano al sistema real, lo cual refleja una adecuada capacidad de predicción y una menor variabilidad en los resultados obtenidos.

De manera complementaria, se aplicó la prueba estadística t-pareada con el propósito de determinar si existían diferencias significativas entre los datos reales y los datos simulados. Esta prueba es utilizada cuando se comparan dos conjuntos de datos relacionados entre sí, permitiendo evaluar estadísticamente la diferencia entre sus medias. (Walpole et al., 2012)

La hipótesis planteada para la validación del modelo fue la siguiente:

Hipótesis nula (H_0): no existen diferencias significativas entre los datos reales y los datos simulados.

Hipótesis alternativa (H_1): existen diferencias significativas entre los datos reales y los datos simulados.

La expresión matemática empleada para el cálculo de la prueba t-pareada fue:

$$t \frac{\bar{d}}{s_d / \sqrt{n}}$$

Donde:

(t) = valor calculado de la prueba t.

$\bar{d}$ = promedio de las diferencias entre datos reales y simulados.

s_d = desviación estándar de las diferencias.

(n) = número de observaciones analizadas.

La validación del modelo se consideró aceptable cuando el valor de significancia obtenido fue mayor al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0.05$), indicando que no existen diferencias estadísticamente significativas entre el comportamiento del sistema real y el modelo desarrollado.

A partir de los resultados obtenidos mediante ambas pruebas estadísticas, fue posible comprobar que el modelo programado representa adecuadamente las condiciones operativas del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos, permitiendo utilizarlo como herramienta de apoyo para el análisis y optimización de rutas.

3.7 Validación del modelo de la Ruta Real

La validación del modelo de la Ruta Real se realizó con la finalidad de verificar que los resultados obtenidos mediante el software de simulación presentaran un comportamiento similar al sistema real analizado. Esta etapa permitió evaluar el grado de precisión del modelo desarrollado y determinar si las condiciones operativas representadas en la simulación reproducen adecuadamente el funcionamiento de la ruta de recolección estudiada. Para efectuar esta validación se empleó el método del Error Cuadrático Medio (ECM), el cual permitió comprar los tiempos promedio observados en el sistema real con los tiempos obtenidos mediante la simulación desarrollada en el software Simio. La representación de los datos se presenta Tabla 3.8 que se muestra a continuación.

Tabla 3.8 Validación del MSE de la Ruta Real (Fuente: Elaboración propia 2025)

N°	Tiempo promedio en el sistema		Validación MSE	
	Real	Simio	e	e ²
1	8.4683	8.4574	0.0109	0.0001188
2	8.4771	8.4676	0.0095	0.0000903
3	8.4161	8.4192	-0.0031	0.0000096
4	8.4249	8.4238	0.0011	0.0000012
5	8.4285	8.4264	0.0021	0.0000044
6	8.4501	8.4463	0.0038	0.0000144
7	8.4394	8.4357	0.0037	0.0000137
8	8.4162	8.4213	-0.0051	0.0000260
9	8.4333	8.4284	0.0049	0.0000240
10	8.4073	8.4028	0.0045	0.0000203
11	8.4131	8.4212	-0.0081	0.0000656
12	8.4243	8.4189	0.0054	0.0000292
13	8.4095	8.4191	-0.0096	0.0000922
14	8.4389	8.4209	0.018	0.0003240
15	8.4573	8.4622	-0.0049	0.0000240
16	8.4182	8.4144	0.0038	0.0000144
17	8.4639	8.4658	-0.0019	0.0000036
18	8.4912	8.4841	0.0071	0.0000504
			TOTAL	0.0009261
			MSE	0.0000514

De acuerdo con los resultados obtenidos, el valor total acumulado del error cuadrático fue de 0.0009261, mientras que el valor del Error Cuadrático Medio correspondió a 0.0000514. Este resultado indica que la diferencia entre los tiempos promedio reales y los tiempos generados por el modelo de simulación es mínima.

El bajo valor del MSE obtenido demuestra que el modelo programado presenta un alto nivel de precisión y un comportamiento muy cercano al sistema real. Lo anterior permite concluir que la simulación desarrollada representa adecuadamente las condiciones operativas de la ruta analizada, validando así su utilización para la evaluación de propuestas de mejora y optimización de rutas.

Asimismo, puede observarse que la mayoría de los errores calculados presentan valores cercanos a cero, lo cual evidencia que las variaciones entre los datos reales y los simulados son

reducidas. Esto confirma que el modelo construido en Simio reproduce de manera confiable el comportamiento operativo del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos.

La validación realizada proporciona confiabilidad estadística al modelo desarrollado, permitiendo utilizarlo como herramienta de análisis para la implementación de estrategias de optimización orientadas a reducir tiempos de recorrido, mejorar la eficiencia operativa y optimizar el uso de recursos dentro del sistema de recolección. Este proceso se realizó para cada una de las rutas.

3.8Diseño de experimentos

En esta fase se analiza el comportamiento del sistema simulado mediante la experimentación, debido a que permite evaluar diferentes escenarios y analizar el comportamiento del sistema ante posibles cambios en sus variables de operación. Mediante esta técnica es posible identificar alternativas de mejora y determinar aquellas condiciones que generan un mejor desempeño del sistema. Además, ayuda a encontrar el número óptimo de replicaciones que ayuda a garantizar que los resultados sean estadísticamente representativos.

Para la realización de los experimentos se utilizó la siguiente ecuación:

$$n * (\beta) = \left\{ i \geq n: t_{i-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S^2(n)}{i}} \leq \beta \right\} \text{ ecuación 1.1}$$

3.9Ejecución de simulación

Una vez validado el modelo de simulación y determinado el número óptimo de corridas para cada una de las rutas analizadas, se procedió a la ejecución de las simulaciones correspondientes. Esta etapa tuvo como finalidad generar resultados estadísticamente confiables que permitieran evaluar el comportamiento operativo del sistema y analizar el desempeño de las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos.

La ejecución de las simulaciones se realizó utilizando el software Simio, mediante el cual se modelaron las condiciones reales de operación del sistema, considerando variables tales como tiempos de recorrido, tiempos de atención, secuencia de rutas y capacidad operativa.

3.10 Análisis de los datos de salida

Consiste en una de las etapas más importantes dentro del proceso de simulación, debido a que permite interpretar los resultados obtenidos durante la ejecución de los modelos y evaluar el comportamiento del sistema bajo las condiciones establecidas. A través de esta fase es posible identificar patrones, comparar escenarios y determinar el desempeño operativo de las rutas analizadas. De acuerdo con Banks et al. (2010), el análisis de datos de salida en simulación tiene como propósito transformar la información generada por el modelo en resultados útiles para la toma de decisiones, permitiendo evaluar la eficiencia del sistema y validar el cumplimiento de los objetivos planteados en la investigación.

Para complementar y realizar una conclusión más sólida del modelo se realizó la prueba t-pareada con los datos de la real el cual se muestra Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Prueba t-pareada de la Ruta Real (Fuente: Elaboración propia 2025)

Corridas	Xj	Yj		
1	8.4683	8.4574	0.0109	0.000103904
2	8.4771	8.4676	0.0095	7.73227E-05
3	8.4161	8.4192	-0.0031	1.44907E-05
4	8.4249	8.4238	0.0011	1.54711E-07
5	8.4285	8.4264	0.0021	1.94138E-06
6	8.4501	8.4463	0.0038	9.56871E-06
7	8.4394	8.4357	0.0037	8.96004E-06
8	8.4162	8.4213	-0.0051	3.37174E-05
9	8.4333	8.4284	0.0049	1.7584E-05
10	8.4073	8.4028	0.0045	1.43894E-05
11	8.4131	8.4212	-0.0081	7.75574E-05
12	8.4243	8.4189	0.0054	2.20274E-05
13	8.4095	8.4191	-0.0096	0.000106227
14	8.4389	8.4209	0.018	0.000299059
15	8.4573	8.4622	-0.0049	3.14347E-05
16	8.4182	8.4144	0.0038	9.56871E-06
17	8.4639	8.4658	-0.0019	6.79471E-06
18	8.4912	8.4841	0.0071	4.08747E-05
Total				0.000875577
Promedio	8.437644444	8.435305556	0.002338889	

Capítulo 4 Análisis de alternativas

En el presente capítulo se exponen las propuestas de mejora derivadas del análisis de las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos del municipio de Orizaba, con la finalidad de optimizar los recorridos actuales y mejorar la eficiencia operativa del sistema de recolección.

Para ello, se empleó el modelo del Problema del Agente Viajero (Travelling Salesman Problem, TSP) mediante la herramienta Solver de Microsoft Excel, la cual permitió reorganizar el orden de atención de los puntos de recolección correspondientes a cada una de las rutas analizadas.

El procedimiento consistió en la elaboración de una matriz de distancias entre los distintos puntos de recolección asignados a las rutas existentes. Posteriormente, mediante el uso de Solver, se determinó una nueva secuencia de recorrido orientada a minimizar la distancia total recorrida, eliminando trayectos innecesarios y mejorando la distribución de los desplazamientos.

Como resultado de este proceso, se obtuvo una propuesta optimizada para cada ruta, en la cual se presenta el nuevo orden de atención de los puntos de recolección. Dichas propuestas fueron posteriormente evaluadas a través del modelo de simulación desarrollado en Simio, con el propósito de comparar el desempeño del sistema actual respecto a los escenarios propuestos y medir indicadores de desempeño tales como el tiempo total de recorrido y la distancia recorrida.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las rutas analizadas, así como la comparación entre el sistema actual y las alternativas de optimización propuestas.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las rutas analizadas.

4.1 Optimización de rutas

Ruta norte

El método Solver Evolutionary de Excel fue utilizado para optimizar las rutas del recorrido mediante la minimización de la distancia total entre puntos de recolección. Como parte inicial del procedimiento se elaboró una matriz de distancias que permitió representar las conexiones entre cada punto de recolección que representan cada nodo del sistema de la Ruta norte. Esta matriz sirvió como base para el desarrollo del proceso de optimización se presenta en la Ilustración 4.1

AH4		Plaza Valle /Liverpool																												
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
1																														
2																														
3																														
4																														
5																														
6																														
7																														
8																														
9																														
10																														
11																														
12																														
13																														
14																														
15																														
16																														
17																														
18																														
19																														
20																														
21																														
22																														
23																														
24																														
25																														
26																														
27																														
28																														
29																														
30																														

Ilustración 4.1 Matriz de distancia de la ruta norte. (Fuente: Elaboración propia 2025)

Posteriormente, la matriz de distancia fue procesada mediante la herramienta de Solver Evolutionary de Excel, el cual se presenta en la Ilustración 4.2, se evaluaron múltiples combinaciones de ruta hasta encontrar la secuencia más eficiente.

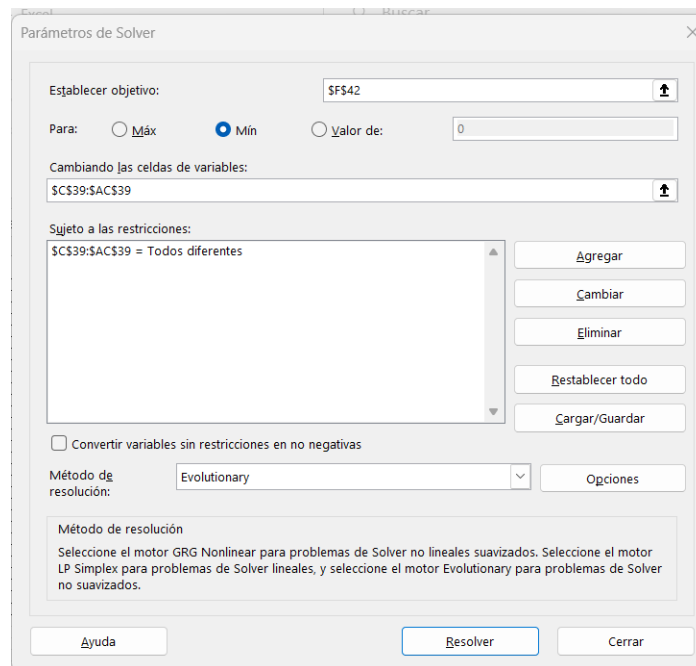


Ilustración 4.2 Ventana de optimización de solver. (Fuente: elaboración propia 2025)

La configuración de los parámetros utilizados que se mostraron en la ilustración anterior fue posible reorganizar el orden de atención de los puntos de recolección, reduciendo trayectos innecesarios y mejorando la continuidad del recorrido.

Como resultado se obtuvo una disminución significativa en la distancia total recorrida.

En la ruta norte, el principal problema identificado fue la gran distancia entre puntos de recolección. Mediante la aplicación del método solver evolutionary de Excel a la matriz de distancias se logró reordenar la secuencia de atención para reducir trayectos largos e innecesarios.

Los resultados reflejaron una disminución en la distancia total recorrida y un mejor aprovechamiento del tiempo operativo.

Asimismo, una vez aplicado el método Solver Evolutionary a la matriz de distancias, se generó una nueva secuencia optimizada de recorrido, la cual permitió establecer una propuesta de ruta más eficiente para la zona norte. El resultado obtenido se presenta en la Ilustración 4.3.

Nodo de Inicio				Nodo Final																									Nodo Final
28	27	18	19	16	14	15	9	20	7	2	13	11	12	10	21	6	17	4	3	5	8	22	23	24	25	26	1	25	
	4.4	2.5	0.9	0.6	1.2	0.15	1.3	0.5	0.21	1.4	0.75	1.5	0.19	0.13	1.1	0.7	3.1	1.3	0.1	0.5	0.95	0.55	0.35	1	0.55	0.65	4.1	0.2	

Ilustración 4.3 Resultado de procesamiento de datos de la Ruta norte. (Fuente: elaboración propia 2025)

La nueva configuración de la ruta permitió obtener un recorrido total de 30.88 km, representando una mejora respecto al recorrido original. Posteriormente, la ruta optimizada fue incorporada al modelo de simulación desarrollado en Simio, con la finalidad de evaluar su comportamiento operativo y comparar su desempeño respecto al sistema actual. la representación gráfica del recorrido optimizado de la ruta norte se muestra en la Ilustración 4.4.

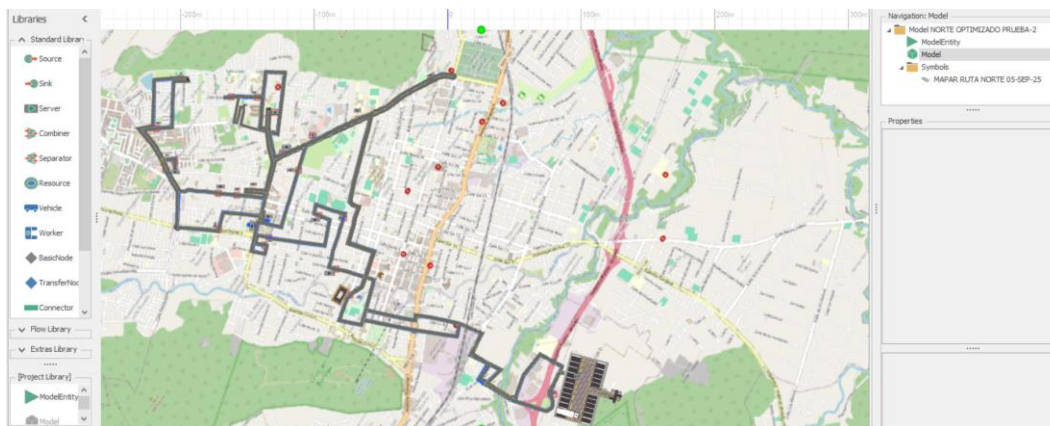


Ilustración 4.4 Recorrido de la ruta norte. (Fuente: elaboración propia 2025)

Una vez implementada la ruta optimizada dentro del modelo de simulación en Simio, se obtuvieron los resultados correspondientes al desempeño operativo de la ruta norte. Los datos generados permitieron evaluar indicadores relacionados con el tiempo de recorrido y el comportamiento general del sistema durante la simulación.

Average							Drop Column Fields Here				
Object Type	Object Name	Data Source	Category	Data Item	Statistic	Average Total					
ModelEntity	CAMION_RSU	[Population]	Content	NumberInSystem	Average	0.9707					
					Maximum	1.0000					
			FlowTime	TimeInSystem	Average (Hou...	6.6655					
					Maximum (Ho...	6.6655					
					Minimum (Hou...	6.6655					
					Observations	1.0000					
			Throughput	NumberCreated	Total	1.0000					
				NumberDestroyed	Total	1.0000					
			Server	AbastecedoraM	[Resource]	Capacity	ScheduledUtilization	Percent	1.8204		
							UnitsAllocated	Total	1.0000		
UnitsScheduled	Average	1.0000									
	Maximum	1.0000									
UnitsUtilized	Average	0.0182									
	Maximum	1.0000									
ResourceState	TimeProcessing	Average (Hou...				0.1250					
		Occurrences				1.0000					
		Percent				1.8204					
		Total (Hours)				0.1250					
	TimeStarved	Average (Hou...				3.3709					
		Occurrences				2.0000					
	Percent	98.1796									
	Total (Hours)	6.7417									
InputBuffer	Throughput	NumberEntered				Total	1.0000				
		NumberExited				Total	1.0000				
	OutputBuffer	NumberEntered				Total	1.0000				
		NumberExited				Total	1.0000				

Ilustración 4.5 Resultados de desempeño operativo de la Ruta Norte. (Fuente: elaboración propia 2025)

De acuerdo con los resultados obtenidos, el camión recolector presentó un tiempo promedio en el sistema de 6.6655 horas, lo que representa el tiempo total requerido para completar el recorrido de la ruta optimizada.

Object Type	Object Name	Data Source	Category	Data Item	Statistic	Average Total
ModelEntity	CAMION_RSU	[Population]	Content	NumberInSystem	Average	0.9707
					Maximum	1.0000
			FlowTime	TimeInSystem	Average (Hou...	6.6655
					Maximum (Ho...	6.6655
					Minimum (Hou...	6.6655

Ilustración 4.6 Tiempo promedio en el sistema. (Fuente: elaboración propia 2025)

Mientras que, el sistema mostró un valor promedio de permanencia de 0.9707, indicando un comportamiento estable durante la ejecución del modelo.

Ruta Real

La Ruta Real representó una de las principales áreas de oportunidad dentro del sistema de recolección. La aplicación del modelo TSP permitió reorganizar el recorrido para disminuir tiempos muertos y optimizar los traslados entre clínicas, hospitales y el destino final en Ciudad Mendoza.

Como parte inicial del procedimiento, se elaboró una matriz de distancias que permitió identificar la relación existente entre cada uno de los puntos de recolección considerados dentro de la ruta. Dicha matriz se presenta en la Ilustración 4.7.

Los resultados obtenidos mostraron una reducción en el tiempo total de operación y una mejora significativa en la eficiencia general de la ruta.

The image shows a screenshot of a Microsoft Excel spreadsheet. The active cell is B46, and the formula bar shows a checkmark icon and the number 40. The spreadsheet contains a large table of numerical data, which is a distance matrix. The matrix is 40 rows by 40 columns, with the diagonal elements being zero. The values represent distances between 40 different points. The spreadsheet interface includes a status bar at the bottom indicating 40 rows and 40 columns.

Ilustración 4.7 matriz de distancia de la Ruta Real. (Fuente: elaboración propia 2025)

A partir de este proceso fue posible reorganizar el orden de atención de los puntos de recolección, disminuyendo tiempos muertos y mejorando la continuidad de los desplazamientos. Como resultado, se obtuvo una reducción en el tiempo total de operación y una mejora significativa en la eficiencia general de la ruta. Logran un recorrido total de 58.83km.

Una vez generada la propuesta optimizada, esta fue incorporada al modelo de simulación desarrollado en Simio con la finalidad de evaluar su comportamiento operativo y analizar el desempeño de la nueva secuencia de recorrido respecto al sistema actual.

La representación del recorrido optimizado dentro del entorno de simulación se muestra en la Ilustración 4.8, donde se observa el comportamiento de la Ruta Real optimizada durante el proceso de recolección

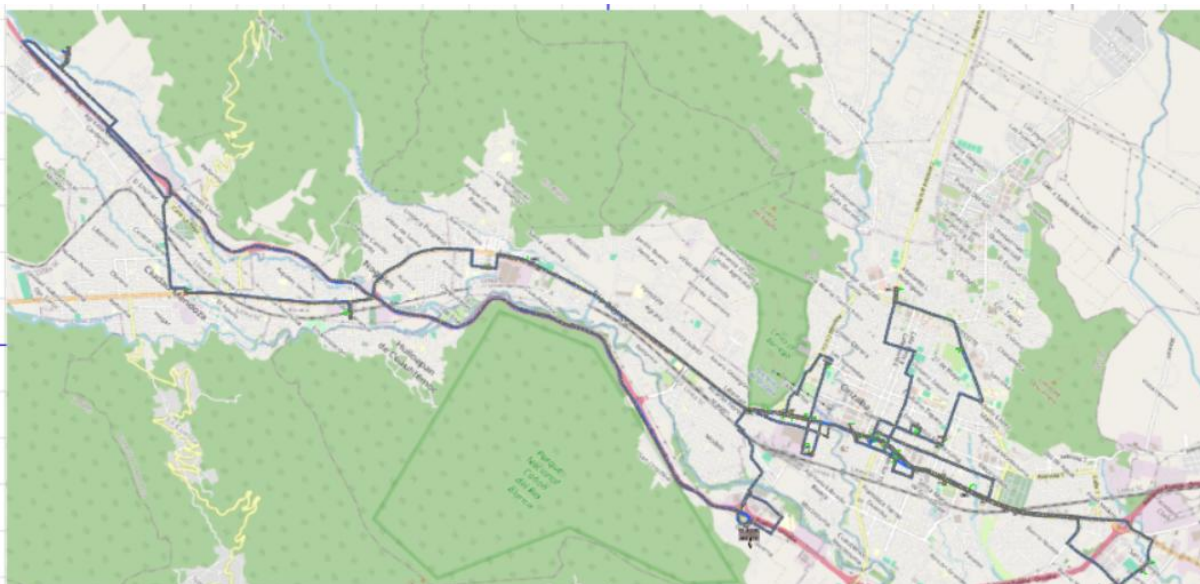


Ilustración 4.8 Recorrido simulado en Simio de la Ruta Real optimizada. (Fuente: elaboración propia 2025).

Una vez implementada la propuesta optimizada de la Ruta Real dentro del modelo de simulación en Simio, se obtuvieron los resultados correspondientes al desempeño operativo de la nueva secuencia de recorrido. Estos resultados permitieron analizar el comportamiento del sistema y evaluar la eficiencia de la ruta optimizada en comparación con las condiciones originales de operación.

De acuerdo con los datos obtenidos durante la simulación, el camión recolector presentó un tiempo promedio en el sistema de 9.6056 horas, correspondiente al tiempo total requerido para completar el recorrido de la ruta optimizada. Asimismo, el sistema registró un valor promedio de permanencia de 0.9795, reflejando un comportamiento estable durante la ejecución del modelo. Los resultados del procesamiento de datos obtenidos en la simulación se presentan en la Ilustración 4.9 Resultados del procesamiento de datos de la Ruta Real en Simio.

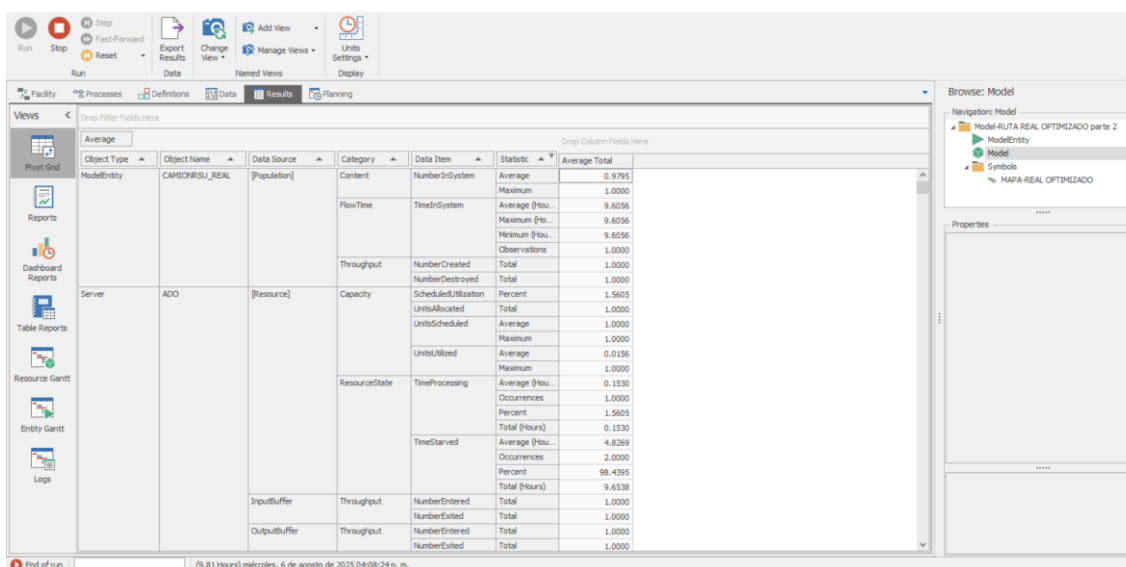


*Ilustración 4.9 Resultados del procesamiento de datos de la Ruta Real en Simio.
(Fuente: elaboración propia 2025)*

Ruta sur

La Ruta Sur presentó áreas de oportunidad relacionadas principalmente con los desplazamientos realizados dentro de la zona industrial y los diferentes puntos comerciales atendidos en la ciudad. En el recorrido original se identificaron trayectos poco continuos y desplazamientos entre zonas alejadas.

La simulación permitió identificar una reducción en tiempos de operación y una mejor distribución de los recursos asignados a esta ruta. Para este caso la matriz de distancias se muestra en la Ilustración 4.10, permitiendo representar la relación existente entre cada nodo del sistema y analizar las posibles alternativas de recorrido.

Drop Filter Fields Here

Average

Drop Column Fields Here

Object Type ▲	Object Name ▲	Data Source ▲	Category ▲	Data Item ▲	Statistic ▲ ▼	Average Total				
ModelEntity	CAMION_RSU	[Population]	Content	NumberInSystem	Average	0.9726				
					Maximum	1.0000				
			FlowTime	TimeInSystem	Average (Hou...	7.1542				
					Maximum (Ho...	7.1542				
					Minimum (Hou...	7.1542				
					Observations	1.0000				
			Throughput	NumberCreated	Total	1.0000				
					NumberDestroyed	Total	1.0000			
			Server	AURITEL_PARADISE	[Resource]	Capacity	ScheduledUtilization	Percent	0.4827	
							UnitsAllocated	Total	1.0000	
UnitsScheduled	Average	1.0000								
Maximum	1.0000									
UnitsUtilized	Average	0.0048								
Maximum	1.0000									
ResourceState	TimeProcessing	Average (Hou...				0.0355				
		Occurrences				1.0000				
		Percent				0.4827				
	TimeStarved	Total (Hours)				0.0355				
		Average (Hou...				3.6600				
		Occurrences				2.0000				
InputBuffer	Throughput	NumberEntered				Total	1.0000			
		NumberExited				Total	1.0000			
OutputBuffer	Throughput	NumberEntered				Total	1.0000			
		NumberExited				Total	1.0000			

Ilustración 4.12 Desempeño operativo de la Ruta Sur (Fuente: elaboración propia 2025)

Object Type ▲	Object Name ▲	Data Source ▲	Category ▲	Data Item ▲	Statistic ▲ ▼	Average Total
ModelEntity	CAMION_RSU	[Population]	Content	NumberInSystem	Average	0.9726
					Maximum	1.0000
			FlowTime	TimeInSystem	Average (Hou...	7.1542
					Minimum (Hou...	7.1542

Ilustración 4.13 Tiempo promedio en el sistema Ruta sur. (Fuente: elaboración propia 2025)

De acuerdo con los resultados obtenidos durante la simulación, el camión recolector presentó un tiempo promedio en el sistema de 7.1542 horas, correspondiente al tiempo total requerido para completar el recorrido de la ruta optimizada. Asimismo, el sistema registró un valor promedio de permanencia de 0.9726, indicando un comportamiento estable durante la ejecución del modelo de simulación.

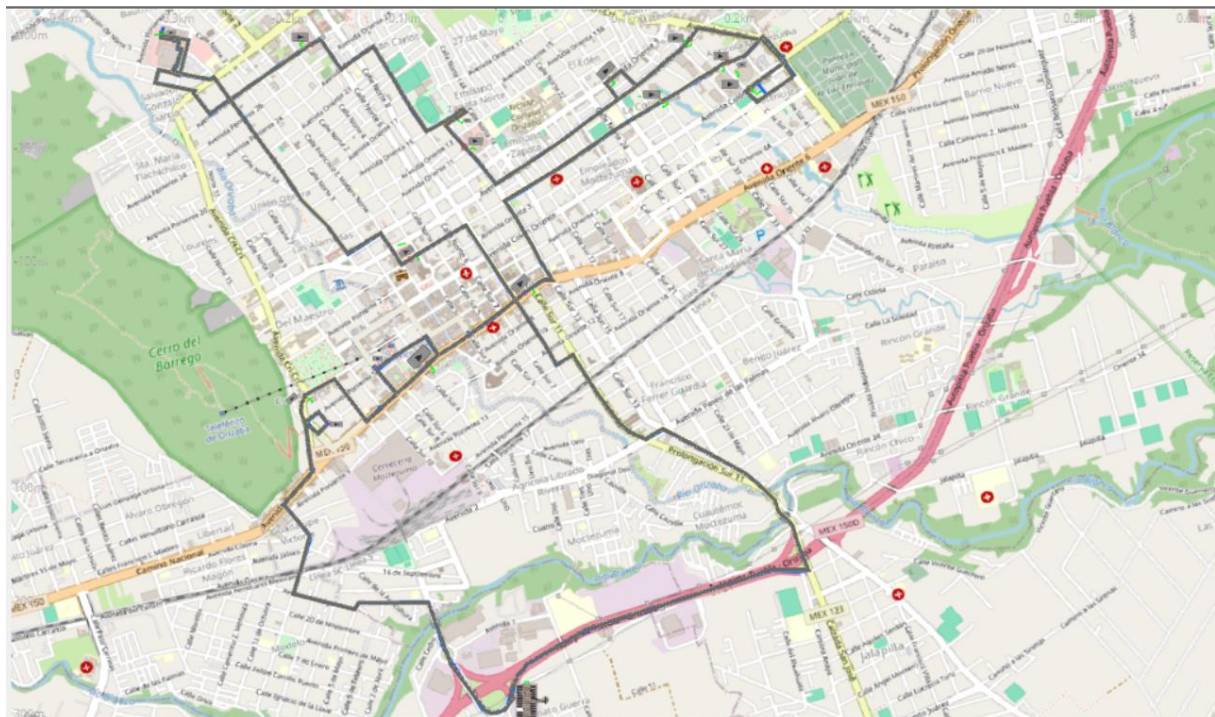
Ruta orgánica

La Ruta Orgánica presentó características particulares debido al alto volumen de residuos recolectados durante la operación, por lo que además de optimizar el orden de atención de los puntos de recolección, fue necesario considerar la capacidad de carga de los vehículos utilizados en el recorrido. Esta situación representaba un factor importante dentro de la operación, ya que

en algunos casos se generaban interrupciones relacionadas con descargas no programadas en la planta de almacenamiento.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1																									
2		1	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
3	1	0	4.2	4.1	3.7	3.3	6	4.9	5.1	5	6.5	6.2	4.2	6.5	6.6	6.6	4.2	6	6.3	3.9	3.4	5.1	3.3	0.2	
4	2	4.3	0	1.2	1	1.4	1.9	1.1	1.1	0.99	2.1	2.3	2.5	2.5	1.9	1.7	0	1.9	1.6	1.5	1.7	1.1	1.4	4.3	
5	3	3.4	1	0	0.6	1	3	1.3	1.4	1.2	2.3	1.9	2.5	2.6	2.2	2	1	3	2.2	1.5	1.7	1.4	1	3.6	
6	4	2.8	1.3	1.6	0	0.4	3	2.6	2.6	2.5	3.3	3.1	3.7	3.8	3.4	3.2	1.3	3.3	2.9	0.9	1	2.6	0.4	3	
7	5	3.3	1.9	1	0.5	0	3.5	2	3	1.8	2.9	2.6	3.2	3.2	2.8	2.6	1.9	3.5	2.5	1.4	1.5	2	0	3.4	
8	6	3.4	2.3	3.3	2.7	2.7	0	2.4	2.7	2.5	3.7	4	3.9	4	3.6	3.4	2.5	0	1.2	2.4	2.7	2.7	2.7	5.6	
9	7	4.9	1.3	1.9	1.9	2.3	2.2	0	0.4	0.26	1.7	2	1.9	2	1.7	1.4	1.3	2.2	3.4	2.3	2.6	0.4	2.3	5.1	
10	8	4.6	1	0.99	1.6	2	2.6	0.35	0	0.4	1.8	2.1	2.2	2.2	1.7	1.4	1	2.6	1.8	2.1	2.3	0	2	4.8	
11	9	4.7	1.1	1	1.6	2	2.4	0.5	0.34	0	1.7	1.9	2.1	2.1	1.5	1.3	1.1	2.4	1.5	2.1	2.4	0.34	2	4.9	
12	10	6	1.7	1.6	2.2	2.6	3.7	1.5	1.9	1.7	0	1	1.2	1.2	0.6	0.4	1.7	3.7	2.9	2.7	3	1.9	2.6	6.2	
13	11	6.2	2.7	2.1	2.7	3.1	4.1	2.4	2.8	2.6	0.8	0	0.6	0.65	0.85	1.2	2.7	4.1	3.3	3.8	3.7	2.8	3.1	7	
14	12	6.4	2.1	2	2.7	3.1	3.7	1.9	2.3	2.2	0.45	0.7	0	0.66	0.35	0.85	2.1	3.7	2.9	3.2	3.4	2.3	3.1	6.6	
15	13	6.4	2	2	2.8	3	3.6	1.9	2	2.1	0.4	0.65	0.85	0	0.29	0.8	2	3.6	2.8	3.1	3.4	2	3	6.6	
16	14	9.5	2.7	2.3	2.9	3.3	3.4	1.8	2	2.1	1	1	0.55	0.6	0	0.7	2.7	3.4	2.6	3.4	3.7	2	3.3	10	
17	15	6.1	1.7	1.6	2.2	2.6	3.3	1.1	1.2	1.3	0.73	1.1	1.2	1.3	0.65	0	1.7	3.3	2.5	2.7	3	1.2	2.8	6.3	
18	16	4.3	0	1.2	1	1.4	1.9	1.1	1.1	0.95	2.1	2.3	2.5	2.5	1.9	1.7	0	1.9	1.6	1.5	1.7	1.1	1.4	4.3	
19	17	5.4	2.5	3.3	2.7	2.7	0	2.4	2.7	2.3	3.7	4	3.9	4	3.6	3.4	2.5	0	1.2	2.4	2.7	2.7	2.7	5.6	
20	18	5.3	1.9	2.3	2.5	2.96	0.95	1.4	1.9	1.3	2.8	2.89	2.8	2.9	1.5	2.3	1.9	0.95	0	2.7	2.9	1.6	2.9	5.5	
21	19	3.7	1.5	1.6	1.1	0.6	2.5	2.5	2.6	2.4	3.5	3.1	3.8	3.8	3.5	3.2	1.5	2.5	2.8	0	0.28	2.6	0.6	2.9	
22	20	2.8	1.5	1.6	5	0.6	2.5	2.9	2.6	2.5	3.5	3.2	3.8	3.9	3.5	3.2	1.5	2.5	2.9	4	0	2.6	0.6	3	
23	21	4.6	1	0.99	1.6	2	2.6	0.35	0	0.4	1.8	2.1	2.2	2.2	1.7	1.4	1	2.6	1.8	2.1	2.3	0	2	4.8	
24	22	3.3	1.3	1	0.5	0	3.5	2	1	1.8	2.9	2.6	3.2	3.2	2.8	2.6	1.3	3.5	1.5	1.4	1.5	2	0	3.6	
25	23	0.2	4.2	4.5	3.6	3.3	5.5	5.4	5.6	5.4	6.7	6.3	6.7	6.7	6.7	6.8	4.2	5.5	6.4	3.9	3.4	5.6	3.3	0	
26																									
27																									
28																									
29																									
30																									
31																									

Ilustración 4.14 Matriz de distancia de la Ruta Orgánica. (Fuente: elaboración propia 2025)



Se presentan los resultados de la simulación de la ruta orgánica en la Ilustración 4.15 y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** lo cuales se describen a c ontinuación.

Ilustración 4.15 Simulación de la Ruta Orgánica optimizada. (Fuente: elaboración propia 2025)

Average							Drop Column Fields Here	
Object Type ▲	Object Name ▲	Data Source ▲	Category ▲	Data Item ▲	Statistic ▲ ▼	Average Total		
ModelEntity	CAMION_RSU	[Population]	Content	NumberInSystem	Average	0.9715		
					Maximum	1.0000		
			FlowTime	TimeInSystem	Average (Hou...	6.8681		
					Maximum (Ho...	6.8681		
					Minimum (Hou...	6.8681		
			Throughput	NumberCreated	Observations	1.0000		
					Total	1.0000		
Server	ADRENALINE_FITNESS	[Resource]	Capacity	ScheduledUtilization	NumberDestroyed	1.0000		
					Total	1.0000		
					UnitsAllocated	1.0000		
					Average	1.0000		
					Maximum	1.0000		
			ResourceState	TimeProcessing	UnitsUtilized	0.0100		
					Average	1.0000		
					Maximum	1.0000		
				TimeStarved	Average (Hou...	0.0708		
					Occurrences	1.0000		
					Percent	1.0015		
					Total (Hours)	0.0708		
			InputBuffer	Throughput	Average (Hou...	3.4993		
					Occurrences	2.0000		
					Percent	98.9985		
					Total (Hours)	6.9985		
			OutputBuffer	Throughput	NumberEntered	1.0000		
					NumberExited	1.0000		
			OutputBuffer	Throughput	NumberEntered	1.0000		
					NumberExited	1.0000		

Drop Filter Fields Here							Drop Column Fields	
Average								
Object Type ▲	Object Name ▲	Data Source ▲	Category ▲	Data Item ▲	Statistic ▲ ▼	Average Total		
ModelEntity	CAMION_RSU	[Population]	Content	NumberInSystem	Average	0.9715		
					Maximum	1.0000		
			FlowTime	TimeInSystem	Average (Hou...	6.8681		
					Maximum (Ho...	6.8681		
					Minimum (Hou...	6.8681		

Ilustración 4.16 Promedio en el sistema sistema Ruta Orgánica. (Fuente: elaboración propia 2025)

De acuerdo con los resultados obtenidos durante la simulación, el camión recolector presentó un tiempo promedio en el sistema de 6.8681 horas, reflejando una mejora en la continuidad del recorrido y en el aprovechamiento operativo de la unidad recolectora. Asimismo, el sistema registró un valor promedio de permanencia de 0.9715, indicando un comportamiento estable durante la ejecución del modelo.

En términos generales, la optimización de la Ruta Orgánica permitió mejorar la planificación del recorrido, reducir desplazamientos innecesarios y favorecer una operación más eficiente en el proceso de recolección y traslado de residuos orgánicos.

Ruta centro

La Ruta Centro representó una de las rutas con mayor complejidad operativa debido a la concentración de puntos de recolección en zonas comerciales y calles con alta afluencia vehicular. En el recorrido original se identificaron desplazamientos repetitivos, trayectos innecesarios y maniobras constantes dentro de vialidades congestionadas, situación que incrementaba los tiempos de traslado y reducía la eficiencia operativa del sistema.

Con la aplicación del modelo del Problema del Agente Viajero (Travelling Salesman Problem, TSP), fue posible reorganizar los 56 puntos de recolección que integran la ruta, permitiendo generar una secuencia de recorrido más eficiente. La nueva propuesta redujo desplazamientos repetitivos dentro de las zonas con mayor congestión vehicular, disminuyó recorridos innecesarios entre comercios cercanos y favoreció la agrupación estratégica de los puntos de atención, mejorando así la continuidad y organización del recorrido.

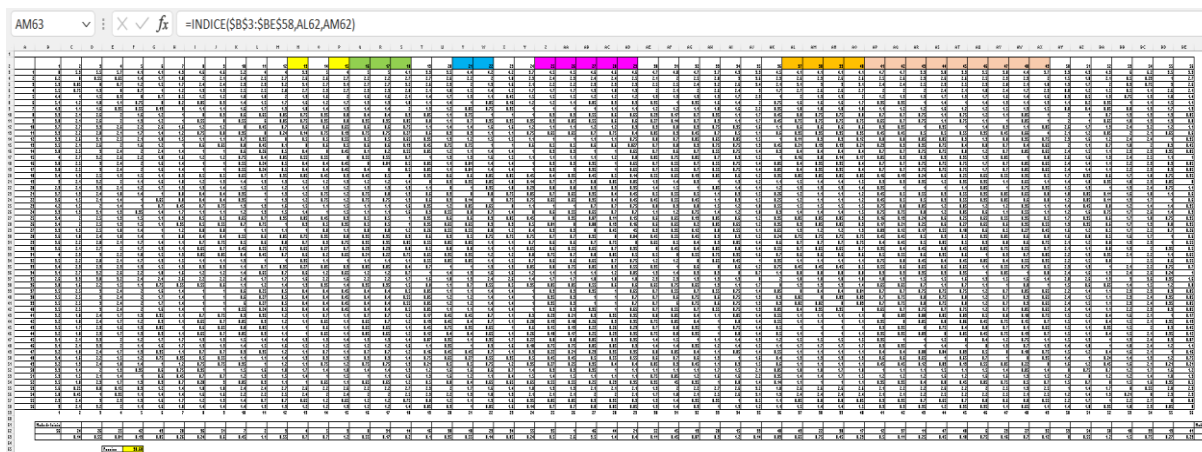


Ilustración 4.18 Matriz de distancias de la Ruta Centro. (Fuente: elaboración propia 2025)

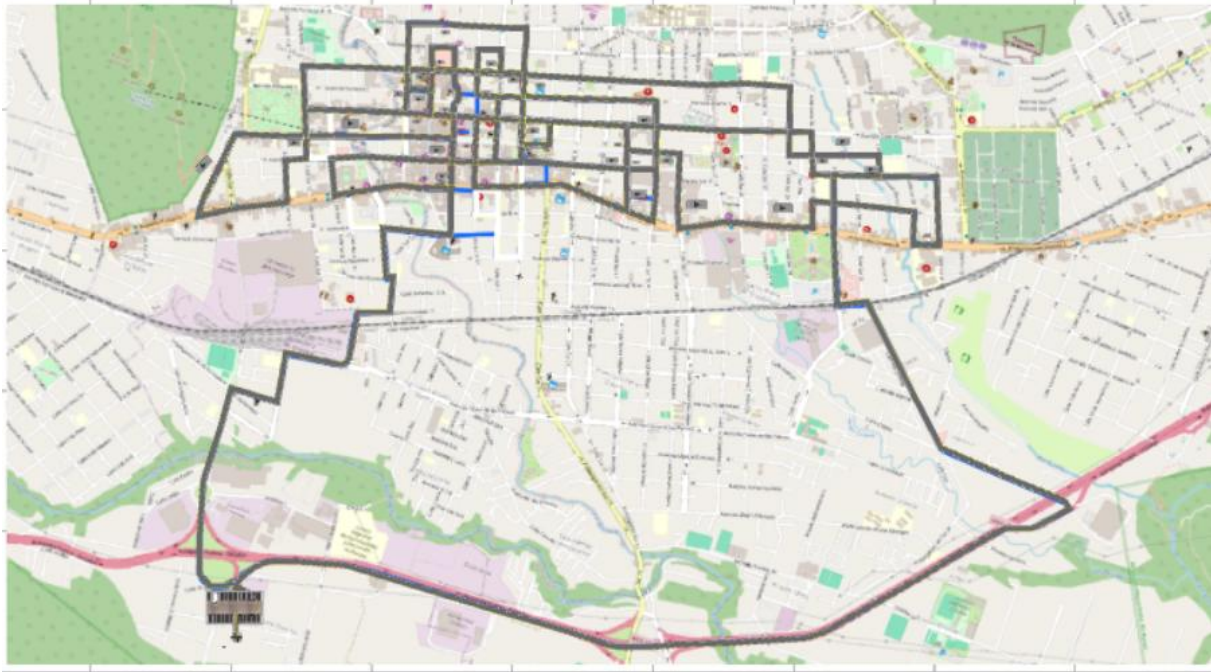


Ilustración 4.17 Simulación de la Ruta Centro optimizada. (Fuente: elaboración propia 2025)

Los resultados de la simulación mostraron una reducción en los tiempos de traslado y una mejora en la eficiencia del recorrido, principalmente por la disminución de maniobras dentro de calles con alta afluencia vehicular.

Views							
Drop Filter Fields Here							
Average							
Object Type	Object Name	Data Source	Category	Data Item	Statistic	Average Total	
ModelEntity	CAMION_RSUCENTRO	[Population]	Content	NumberInSystem	Average	0.9735	
					Maximum	1.0000	
			FlowTime	TimeInSystem	Average (hou...	7.3940	
					Maximum (hou...	7.3940	
			Throughput	NumberCreated	Total	1.0000	
				NumberDestroyed	Total	1.0000	
			Capacity	ScheduledUtilization	Percent	0.5365	
				UnitsAllocated	Total	1.0000	
Server	ANEJO_TORTASGR...	[Resource]		UnitsScheduled	Average	1.0000	
					Maximum	1.0000	
				UnitsUtilized	Average	0.0054	
					Maximum	1.0000	
			ResourceState	TimeProcessing	Average (hou...	0.0407	
					Occurrences	1.0000	
					Percent	0.5365	
				TimeStatust	Total (hours)	0.0407	
					Average (hou...	3.7272	

Ilustración 4.18 Promedio en el sistema Ruta Centro. (Fuente: elaboración propia 2025)

De acuerdo con los resultados obtenidos durante la simulación, el camión recolector presentó un tiempo promedio en el sistema de 7.3940 horas, mientras que el sistema registró un valor promedio de permanencia de 0.9735, indicando un comportamiento estable durante la ejecución del modelo.

Object Type ▲	Object Name ▲	Data Source ▲	Category ▲	Data Item ▲	Statistic ▲ ▼	Average Total
ModelEntity	CAMION_RSUCENTRO	[Population]	Content	NumberInSystem	Average	0.9735
					Maximum	1.0000
			FlowTime	TimeInSystem	Average (Hou...	7.3940
					Maximum (Ho...	7.3940
					Minimum (Hou...	7.3940

Ilustración 4.19 Promedio de utilización en el sistema. (Fuente: elaboración propia 2025)

4.2 Resultados de la optimización de rutas.

Con el propósito de evaluar el impacto de las propuestas de mejora desarrolladas mediante el modelo del Problema del Agente Viajero (Travelling Salesman Problem, TSP), se realizó una comparación entre las rutas actuales y las rutas optimizadas utilizando el modelo de simulación desarrollado en Simio. Para ello, se ejecutaron 18 corridas piloto por cada ruta, considerando indicadores de desempeño como el tiempo promedio de operación y el porcentaje de utilización de los recursos.

Los resultados obtenidos evidenciaron mejoras importantes en el comportamiento operativo de las rutas optimizadas respecto a las condiciones iniciales del sistema. En general, la reorganización de los puntos de recolección permitió reducir recorridos innecesarios, mejorar la continuidad de los desplazamientos y disminuir los tiempos empleados durante las operaciones de recolección.

En la Ruta Centro, la optimización permitió reducir el tiempo promedio de recorrido de 7.394 horas a 6.798 horas. Asimismo, el porcentaje de utilización disminuyó de 82.15 % a 75.53 %, lo que refleja una operación más equilibrada y una mejor distribución de las actividades dentro de la ruta. Estas mejoras estuvieron relacionadas principalmente con la reducción de maniobras repetitivas y desplazamientos innecesarios en zonas con alta congestión vehicular.

Por su parte, la Ruta Norte presentó una disminución del tiempo promedio de operación de 8.7031 horas a 7.4817 horas. De igual manera, la utilización del recurso se redujo de 90.76 % a 83.12 %, indicando una mejora significativa en la eficiencia del recorrido y en el aprovechamiento operativo del vehículo recolector.

En la Ruta Sur también se observaron resultados favorables, ya que el tiempo promedio de recorrido disminuyó de 8.6117 horas a 7.1542 horas. Además, el porcentaje de utilización pasó de 95.68 % a 79 %, reflejando una mejor distribución de los desplazamientos y una reducción de tiempos improductivos durante la operación.

Respecto a la Ruta Orgánica, los resultados mostraron una disminución en el tiempo promedio de operación de 8.2612 horas a 7.6181 horas, mientras que la utilización del recurso se redujo de 91.79 % a 84.64 %. Estas mejoras estuvieron asociadas a una mejor planificación de los recorridos y a la disminución de interrupciones relacionadas con descargas no programadas en la planta de almacenamiento.

Finalmente, la Ruta Calle Real presentó una reducción en el tiempo promedio de operación de 10.144 horas a 9.6056 horas. Aunque esta ruta continuó registrando el mayor porcentaje de utilización debido a la longitud del recorrido y a la distancia hacia el destino final, el indicador logró disminuir de 112.71 % a 106.72 %, evidenciando una mejora operativa derivada de la reorganización de la secuencia de atención.

De manera general, los resultados obtenidos demuestran que la aplicación del modelo TSP y la implementación de rutas optimizadas permitieron mejorar el desempeño operativo del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos. La reducción de tiempos de recorrido, la disminución de trayectos innecesarios y el mejor aprovechamiento de los recursos contribuyeron a generar rutas más eficientes y organizadas.

Capítulo 5

Conclusiones

La presente investigación permitió analizar el funcionamiento de las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos del municipio de Orizaba y proponer alternativas de mejora mediante la aplicación del modelo del Problema del Agente Viajero (Travelling Salesman Problem, TSP), apoyado en herramientas como Solver Evolutionary de Microsoft Excel y el simulador Simio.

Durante el desarrollo del estudio se identificaron diversas problemáticas en las rutas actuales, principalmente relacionadas con recorridos largos, desplazamientos innecesarios, tiempos elevados de operación y una distribución poco eficiente de los puntos de recolección. Estas condiciones ocasionaban un mayor desgaste operativo y un menor aprovechamiento de los recursos disponibles.

A través de la elaboración de matrices de distancias y la aplicación del método Solver Evolutionary, fue posible reorganizar la secuencia de atención de los puntos de recolección en cada una de las rutas analizadas. Esto permitió generar recorridos más ordenados y eficientes, reduciendo trayectos repetitivos y mejorando la continuidad de los desplazamientos.

Posteriormente, las rutas optimizadas fueron evaluadas mediante modelos de simulación desarrollados en Simio, lo que permitió representar el comportamiento del sistema en un entorno más realista y analizar el desempeño operativo de cada propuesta. Gracias a la simulación fue posible observar el funcionamiento de las rutas, medir tiempos de operación y evaluar el aprovechamiento de los recursos utilizados durante el proceso de recolección.

Los resultados obtenidos demostraron mejoras importantes en todas las rutas analizadas, principalmente en la reducción de tiempos de recorrido y en la disminución de desplazamientos innecesarios. Asimismo, se observó una mejor distribución de los recursos operativos y una mayor continuidad en los recorridos, contribuyendo a una operación más eficiente del sistema de recolección.

De igual manera, el uso de Simio permitió visualizar los modelos mediante representaciones en 3D, facilitando una mejor comprensión del comportamiento de las rutas optimizadas y apoyando el análisis de los diferentes escenarios planteados durante la investigación.

En términos generales, esta investigación demuestra que la combinación de técnicas de optimización y simulación representa una alternativa viable para mejorar la planeación y operación de las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos. Además de contribuir a la reducción de tiempos y recorridos, estas herramientas permiten apoyar la toma de decisiones y generar propuestas de mejora aplicables a sistemas reales de recolección.

Finalmente, se concluye que la implementación de modelos de optimización como el TSP puede contribuir significativamente a mejorar la eficiencia operativa de los servicios de recolección de residuos, favoreciendo un mejor aprovechamiento de los recursos y una organización más eficiente de las rutas de trabajo.

Referencias

- Ambiente, S. d. (septiembre de 2020). *sma.gob.mx*. Obtenido de *sma.gob.mx*:
https://sma.gob.mx/wp-content/uploads/2022/07/Bordeando_73.pdf
- Aplegate, D. L., Bixby, R., Chavátal, V., & Cook, W. J. (2006). *The Traveling Salesman Problem a Computation Study*. New Jersey: Princeton University Press.
- Arrijoa Rodriguez, M. L. (2019). Estadística Aplicada a la Evaluación de Proyectos. En M. L. Arrijoa Rodriguez, *Estadística Aplicada a la Evaluación de Proyectos* (págs. 130-133). Orizaba: Tecnológico Nacional de México.
- Ayuntamiento de Orizaba. (2022). Orizaba.
- Coss Bú, R. (2023). Simulación un enfoque práctico. México: Limusa. S.A de C.V.
- El Sol de orizaba. (20 de julio de 2020). *El Sol de Orizaba*. Obtenido de El Sol de Orizaba:
<https://oem.com.mx/elsoldeorizaba/local/se-inaugura-planta-ecori-ayuntamiento-firma-convenio-con-geocycle-medio-ambiente-basura-reciclaje-orizaba-14972336>
- Fuentes Rosas, L., López Cabrera, A., Tobón Galicia, L., & Moras Sánchez, C. (2019). Análisis de la red logística de un cruce vial utilizando. *Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Lerdo*, 20-26. Obtenido de
<http://repocid.itslerdo.edu.mx/coninci2019/CID016.pdf>
- Galán, Y. S., Moras, S. C., Cortes, R., Ojeda, J., & Martínez, H. (2017). Simulación de una estación de transferencia municipal de Residuos Sólidos Urbanos con el Software SIMIO. *Journal CIM Vol.5 Núm 2*, 559-566.
- Gobierno del estado de Veracruz. (12 de agosto de 2024). Obtenido de
<https://www.veracruz.gob.mx/>

INEGI. (s.f.).

INEGI. (2000). *inegi*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx?ag=30118>

INEGI. (2020). *INEGI*. Obtenido de https://ceieg.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2020/12/Orizaba_2020.pdf

INEGI. (3 de Junio de 2025). *INEGI.gob.mx*. Obtenido de [INEGI.gob.mx: negi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2025/EAP_MedioAmb_25.pdf](https://inegi.gob.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2025/EAP_MedioAmb_25.pdf)

José, C. G., Moras Sánchez, C. G., Heredia Roldán, M. J., & Bello Castellanos, L. Á. (2023). Evaluación de la Ruta 8 de Recolección de Residuos Sólidos en la Ciudad de Orizaba, Veracruz, Usando Simulación en SIMIO. Obtenido de *El libro online* con iss 1946-5351

Mexico Desconocido. (2026). *Mexico desconocido*. Obtenido de <https://www.mexicodesconocido.com.mx/orizaba-gana-la-escoba-de-oro-por-ser-la-ciudad-mas-limpia.html>

Orizaba, E. S. (18 de 07 de 2024). *El sol de orizaba*. Obtenido de <https://oem.com.mx/elsoldeorizaba/ciencia-y-salud/orizaba-recibe-el-premio-internacional-escoba-de-platino-que-significa-13216214>

Ortega Ortiz, B. (2020). *Evaluación del sistema de limpia pública del H. Ayuntamiento Camerino Z. Mendoza para mejorar su productividad mediante la simulación con Simio*. Obtenido de <http://repositorios.orizaba.tecnm.mx:8080/xmlui/handle/123456789/654>

PMD. (2020). *PMD ORIZABA*. Obtenido de <https://www.veracruz.gob.mx/finanzas/wp-content/uploads/sites/2/2022/PMD/PMD%20Orizaba.Veracruz.2022-2025..pdf>

PROFEPA. (22 de 05 de 2015). Obtenido de https://www.gob.mx/profepa/documentos/ley-general-para-la-prevencion-y-gestion-integral-de-los-residuos-62914?utm_source=chatgpt.com

Sectur. (07 de octubre de 2019). *Seretaria de Turismo*. Obtenido de Secretaria de Turismo: <https://www.gob.mx/sectur/articulos/orizaba-veracruz>

SEMARNAT. (10 de enero de 2017). *Gobierno de Mexico*. Obtenido de Gobierno de Mexico: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap7.html>

Aguas Gómez, C. D., Rivera Berrio, H. de J., Posada Cuaba, J. C., 1005627149, 1193080975, & 1104871077. (2024). *Diseño de rutas para la recolección de residuos sólidos urbanos en el municipio de San Juan de Betulia, Sucre, Colombia*. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/62944>

Cardenas Cabrera, C., & Cuadra Arevalo, J. A. (2022). *SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA OPTIMIZAR LA RUTA DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES, MOCHE*. <https://orcid.org/0000-0002-4039-2825>

Depool R, R., & Monasterio, D. (2013). *PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA. APLICACIONES A LA INGENIERÍA*. <http://www.bqto.unexpo.edu.ve/>

Fuentes Rosas, L., López Cabrera, A. G., Tobón Galicia, L. G., & Moras Sánchez, C. G. (2019). *Análisis de la red logística de un crucero vial utilizando simulación en SIMIO para evaluar la alternativa de colocar un semáforo*. <http://repocid.itslerdo.edu.mx/coninci2019/CID016.pdf>

Hines, W. W., & Montgomery, D. C. (1996). *Probabilidad y estadística para ingeniería y administración: Segunda edición*.

Walpole, R. E., Myers, R. H., & Myers, S. L. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias: Novena edición*.

Ramos González, J. L. (2015). *REDISEÑO DE LAS RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL MUNICIPIO DE LEÓN, GUANAJUATO, MÉXICO. RECORRIDO MÍNIMO AG-TPS-GOOGLE*. https://ciatec.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1019/112/1/Tesis_Jose%20Luis_Ramos.pdf

- SEMARNAT. (s/f-a). *Informe del Medio Ambiente*. Recuperado el 21 de mayo de 2026, de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap7.html>
- SEMARNAT. (s/f-b). *RESIDUOS*. Recuperado el 22 de mayo de 2026, de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/pdf/Cap7_Residuos.pdf
- SIEGVER. (2020). *Sistema de Información Estadística y Geografía del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave*. www.orizaba.gob.mx
- Tchobanoglous, G., Thcissen, H., & Eliassen, R. (1994). *Gestión integral de residuossolidos: Ingeniería y principios de gestión*. <https://www.calameo.com/read/00627451833aa51dd0272>
- Valdiviezo Zevallos, K. R., & Estrella Basilio, G. E. (2025). Optimización de rutas en la recolección y transporte de los residuos sólidos domiciliarios utilizando sistemas de información geográfica en el distrito de Chaupimarca. En *Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión*. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/5284>

Anexos

Servicios Especializados de Recolección de RSU Orizaba, Veracruz

Ruta propuesta			
Ruta:		Sur	
Dia:		Viernes	
Método		Algoritmo TSP /Evolutionary Solver Excel	
No. De secuencia	Punto de recolección	No. de secuencia	Punto de recolección
1	SERMUN	20	Esc. Adolfo López Mateo
2	Montosa	21	Empacadora CIANCA
3	Carnitas Cadena	22	Rovianda Complejo ind.
4	Rastro Municipal	23	FRYMSA
5	Plaza Faro	24	Comedor Bla Bla
6	Starbucks	25	Hotel Trueba
7	Gasolinera sur 33	26	Hotel Hause
8	Esc. Felipe Soberbié	27	Motel Euro
9	MH. Promotoría de Seguro	28	Farm. Guadalajara R. Alvarado
10	Chedraui	29	Rest. Quinta Escámela
11	Jardín de Niños Margarita Maza de Juárez	30	Instituto de Estudio Superiores (COLATE)
12	Farm. Guadalajara Plaza Faro	31	Motel Paradise
13	C.E.I.C. O	32	Llantera Rojo
14	Cendi Abejitas	33	Fypa
15	DIF de Orizaba	34	Serv. Diez
16	Parroquia de San Juan de Dios	35	Esc. Primaria Aztlán
17	Tenería Company	36	Jardín de Niños Cri-Cri
18	Guardería Nenitos	37	ECORI/ SERMUN
19	Hotel Mirador		

Tiempo promedio en el sistema optimizado	7.15
Reducción de horas respecto al tiempo promedio en el sistema actual	1.46
Porcentaje de mejora respecto al sistema actual	12.79%

Servicios Especializados de Recolección de RSU Orizaba, Veracruz	
Ruta propuesta	
Ruta:	Norte
Día:	Viernes
No. De Secuencia	Punto de recolección
1	Hotel del Rio
2	Técnica 84
3	Colegio Guillaumin
4	Delegación Regional SEV Orizaba
5	Ramon López Velarde
6	Jardín de niños Ernesto Guraieb Shible
7	Elektra
8	GYM IPE Canchas norte
9	Reciclados Beto
10	Panadería Flores
11	CDO Norte
12	Esc. Francisco Gabilondo
13	Abastecedora de Materiales
14	Centro de Atención Primaria en Adicciones
15	Fundación Nicolas Casa hogar
16	Little Caesars
17	Inspección Policía Municipal Orizaba
18	Sanborns
19	Plaza Valle /Liverpool
20	Esc. Primaria Hermenegildo
21	Coppel
22	Guardería nenitos
23	Carnicería Wendy
24	Jabonera
25	Talabartería Orizaba
26	PASTELERIA MAYITA
27	ECORI
28	SERMUN

Tiempo promedio en el sistema optimizado	7.48
Reducción de horas respecto al tiempo promedio en el sistema actual	1.22
porcentaje de mejora respecto al sistema actual	7.64%

Servicios Especializados de Recolección de RSU Orizaba, Veracruz

Ruta propuesta			
Ruta:		Real	
Día:		Viernes	
Método		Algoritmo TSP /Evolutionary Solver Excel	
No. De Secuencia	Punto de recolección	No. De Secuencia	Punto de recolección
1	Delegación Regional Veracruz	21	El Jarocho (restaurant)
2	El pollo Sinaloense	22	Airé Refacciones
3	Limers Lab	23	IMSS Hospital General Regional de Orizaba
4	Auditoria, quejas y responsabilidades	24	Dflorencia Orizaba
5	Oficinas Administrativas/Delegación del Instituto Mexicano	25	Florería Lulu
6	UMF #7/Clinica del IMSS	26	Central de Bomberos
7	Pollo Feliz	27	Unidad de medicina familiar 5 (Ixtaczoquitlán)
8	Análisis Clínicos el Chopo	28	Restaurant YAM-BO
9	La Braza	29	La Braza
10	ADO	30	Dominós
11	Centro de rehabilitación CRIO/Sanatorio Orizaba	31	El Pozolazo
12	Caja Popular Mexicana	32	Unidad de Hemodiálisis Covadonga
13	McDonald's	33	Colegio Educativo Guillaumin
14	Clinica 1 IMSS	34	Sanatorio Escudero
15	Centro de salud regional	35	Almacén Delegacional IMSS (Rio Blanco)
16	Hospital Concordia	36	UMF Rio Blanco
17	Centro de Capacitación y Calidad IMSS-SNTSS	37	UMF #3 IMSS (Nogales)
18	UMF No6 IMSS	38	UMF #4 (C.D Mendoza)
19	Canaco	39	Relleno Sanitario
20	Plaza Sora	40	Taller municipal (SERMUN

Tiempo promedio en el sistema optimizado	9.60
Reducción de horas respecto al tiempo promedio en el sistema actual	0.54
porcentaje de mejora respecto al sistema actual	5.99%

Servicios Especializados de Recolección de RSU Orizaba, Veracruz	
Ruta propuesta	
Ruta:	Orgánica
Día:	Viernes
Método	Algoritmo TSP /Evolutionary Solver Excel
No. De Secuencia	Punto de recolección
1	SERMUN
2	M. Melchor Ocampo
3	H Casa Misión Orizaba
4	H Pluvosilla
5	M Venustiano Carranza
6	M Cerritos
7	Frutería los Bukis
8	M. Emiliano Zapata
9	Dacsa
10	Fogón Do Brasil
11	Casa Hogar Sta. Isabel
12	Plaza de Toros la Concordia
13	Adrenalina Fitness Center
14	Estrella Do Brasil
15	Partida Lab
16	M. Melchor Ocampo
17	M.Cerritos
18	Soriana Circunvalación
19	Jugos Miguel Colohua
20	Guardería Happy Drops Preescolar
21	M. Emiliano Zapata
22	ECORI/ SERMUN

Tiempo promedio en el sistema optimizado	7.61
Reducción de horas respecto al tiempo promedio en el sistema actual	0.65
porcentaje de mejora respecto al sistema actual	7.15%

Servicios Especializados de Recolección de RSU Orizaba, Veracruz

Ruta propuesta			
Ruta:		Centro	
Día:		Viernes	
Método		Algoritmo TSP /Evolutionary Solver Excel	
No. De Secuencia	Punto de recolección	No. De Secuencia	Punto de recolección
1	Quitakilos	23	Sra. Angelica Jiménez sur 31
2	Manitas que trabajan	24	Guardería Rébsamen
3	Panadería Ara	25	Guardería Cendimerelo Cardenas
4	Gustos del Fogón	26	Sanatorio Colon
5	Holiday inn	27	Café Coyametla
6	Archivo Municipal Orizaba/Iglesia del Carmen	28	Guardería Chiquitines
7	Banco Santander/Pastelería Dauzon	29	Panadería los Angeles
8	Iglesia del Calvario/Juzgado cuarto de primera instancia	30	super Tortas Orizabeñas
9	Laboratorio Químico de Córdoba	31	Carnicería Grijalva/Tortas Tradicionales
10	Contadores (Trueba)/Zapatería tres Caballos	32	Tortas Mexicanas
11	Oficina de abogados ote 4/CFE Madero	33	Ferretería la Central
12	Almacenes Ánfora/Banorte	34	Banamex
13	Reves de Café /Caja Popular Mexicana	35	Coppel calle real
14	Restaurant Sugar	36	Financiera Independencia / apoyo económico familiar
15	Ilusion Ropa interior /DIPATH	37	Clínica de Buen Pastor
16	Anexo de las Tortas Tradicionales	38	Scattola
17	Carnicería los Jarochos	39	Autoparte los Poblanitos
18	Cuidado con el Perro/Dportenis	40	Palacio Municipal Orizaba
19	Palacio de Hierro/Vertiche	41	Jugos California
20	La Casona	42	Soriana calle real
21	La Gran Torta/Farmacia Guadalajara	43	ECORI/SERMUN
22	Cometra		

Tiempo promedio en el sistema optimizado	6.79
Reducción de horas respecto al tiempo promedio en el sistema actual	0.60
porcentaje de mejora respecto al sistema actual	5.62%