



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

**“OPTIMIZACIÓN DE LA RUTA SERVICIOS
ESPECIALIZADOS DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA
CIUDAD DE ORIZABA, VERACRUZ MEDIANTE
SIMULACIÓN EN SIMIO”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

PRESENTA:

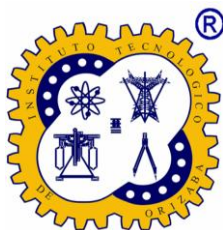
ING. LUCERO IXMATLAHUA LÓPEZ

DIRECTOR DE TESIS:

M.I.I. CONSTANTINO GERARDO MORAS SÁNCHEZ

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. MIGUEL JOSUÉ HEREDIA ROLDÁN



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO

JUNIO 2025



Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, **2/septiembre/2025**
Dependencia: **División de Estudios de
Posgrado e Investigación**
Asunto: **Autorización de Impresión**
OPCION: I

C. IXMATLAHUA LOPEZ LUCERO
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:

**"OPTIMIZACIÓN DE LA RUTA SERVICIOS ESPECIALIZADOS DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE
ORIZABA, VERACRUZ MEDIANTE SIMULACIÓN EN SIMIO"**

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®

OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OLE/jarh

OG-13-F06



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





Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba Veracruz, 20/junio/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.:

IXMATLAHUA LOPEZ LUCERO

La cual lleva el título de:

OPTIMIZACIÓN DE LA RUTA SERVICIOS ESPECIALIZADOS DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD
DE ORIZABA, VERACRUZ MEDIANTE SIMULACIÓN EN SIMIO

y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

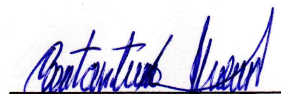
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: M.I.I. CONSTANTINO GERARDO MORAS SANCHEZ

SECRETARIO: DR. MIGUEL JOSUE HEREDIA ROLDAN

VOCAL: DR. ALBERTO ALFONSO AGUILAR LASSERRE

VOCAL SUP.: DR. OSCAR BAEZ SENTIES


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

Con profundo cariño y gratitud, dedico este trabajo a mi familia, mi mayor inspiración y fortaleza. A mis padres, por su amor incondicional, por enseñarme el valor del esfuerzo y por creer siempre en mí. A mi hermano, por su apoyo constante y su compañía en cada etapa de este camino.

Dedico también esta tesis a mis amigos más cercanos, que con sus palabras de aliento me recordaron que rendirse nunca era opción. En especial, a ti, que te has convertido en un segundo padre para mí. Aunque hubieras preferido no ser mencionado, no podía dejar de dedicarte un espacio, porque siempre estuviste ahí: escuchándome, apoyándome y sosteniéndome.

Finalmente, pero no menos importante, dedico este logro a papá Dios, por ser mi fuente de fortaleza en los momentos de debilidad, por la constancia y la disciplina que me han permitido llegar hasta aquí.

*"¡Cuán preciosa, oh Dios, es tu misericordia!
Por eso los hijos de los hombres se amparan bajo la sombra de tus alas.
Porque contigo está el manantial de la vida;
En tu luz veremos la luz."
Salmos 36:7-9*

Agradecimientos

Antes de agradecer a todas las personas que hicieron posible alcanzar esta meta profesional, elevo mi gratitud a Dios, por su gracia y misericordia, pues sin Él nada de esto sería posible.

*"No temas, porque yo estoy contigo; no desmayes, porque yo soy tu Dios que te esfuerzo;
siempre te ayudaré, siempre te sustentaré con la diestra de mi justicia."*

Isaías 41:10:

A través de este versículo, expreso la confianza y fortaleza que he encontrado en Dios durante todo el proceso de esta maestría, recordándome que no estoy sola y que su guía me ha sostenido en los momentos difíciles.

A mi querido director de tesis, MII Constantino Gerardo Moras Sánchez. Le agradezco por recibirme y apoyarme en el momento más complejo de mi estancia en la maestría. Gracias por ayudarme a encontrar un nuevo proyecto, por creer en mí y por brindarme no solo enseñanzas académicas, sino también de vida, junto con su amistad y cariño.

A mi codirector de tesis, Dr. Miguel Josué Heredia Roldán, por aceptar acompañarme en este trabajo y estar siempre dispuesto a colaborar y orientar en cada etapa del proceso.

Al Dr. Alberto Alfonso Aguilar Laserre, quien desde un inicio depositó en mí su confianza y no dudó en brindarme su apoyo cuando más lo necesité.

Al Ayuntamiento de Orizaba, por abrirnos sus puertas y permitirnos desarrollar este proyecto de investigación. En especial, al Ing. Rafael Monjaraz, por compartir generosamente sus conocimientos y facilitar todo lo necesario para la realización de esta tesis.

A todos mis profesores y al coordinador de la maestría, por su constante orientación, paciencia y entusiasmo al compartir sus conocimientos y experiencias.

Al Tecnológico Nacional de México, y en particular al Instituto Tecnológico de Orizaba, por ser la institución que desde 2018 me ha permitido construir mi carrera profesional. Finalmente, a la SECITHI (antes CONACYT), por el invaluable apoyo brindado a través de la beca que me permitió cursar esta maestría.

Resumen

En esta investigación se desarrolló un modelo de simulación en el software Simio para representar el sistema de recolección especializado de residuos sólidos urbanos (RSU) en la ciudad de Orizaba, Veracruz. El objetivo principal fue optimizar las rutas que conforman este programa mediante herramientas de análisis cuantitativo, integrando la simulación discreta con el enfoque del Problema del Agente Viajero (TSP, por sus siglas en inglés).

Para este propósito, se empleó la metodología de simulación propuesta por Law y Kelton, la cual consta de diez etapas, desde la definición del problema hasta la documentación y análisis de resultados. Para construir los modelos correspondientes a las rutas Sur, Centro, Norte, Calle Real y Orgánica, se utilizaron datos reales de tiempos de traslado y servicio, modelados mediante distribuciones uniformes, con el fin de capturar la variabilidad inherente al sistema.

Como parte del proceso de validación, se aplicaron pruebas estadísticas como la t-pareada y el Error Cuadrático Medio (MSE), así como el método $(n*\beta)$ para determinar el número óptimo de corridas por modelo. Posteriormente, se analizaron los datos de salida de cada simulación y se procedió a aplicar el TSP, con el objetivo de proponer rutas más eficientes con base en las principales métricas de desempeño: tiempo promedio en el sistema y porcentaje de utilización.

Para ello, se utilizó el software TSPVIS, que permitió generar secuencias de recorrido óptimas mediante sus 12 métodos de solución. Las rutas seleccionadas fueron modeladas nuevamente en Simio, integrando las condiciones reales del entorno y la incertidumbre operativa, permitiendo complementar el enfoque determinista del TSP con el componente estocástico que aporta la simulación.

Validados los modelos optimizados, se realizó un análisis comparativo con respecto al modelo base. Los resultados muestran mejoras importantes: la ruta Sur presentó una reducción del 14.19% en el tiempo promedio en el sistema, la ruta Norte del 12.64% y la ruta Orgánica del 13.77%. En las rutas Centro y Calle Real, las mejoras fueron más discretas, con reducciones del 9.66% y 4.38%, respectivamente.

Abstract

In this research a simulation model was developed in Simio software to represent the specialized urban solid waste (USW) collection system in the city of Orizaba, Veracruz. The main objective was to optimize the routes that make up this program by means of quantitative analysis tools, integrating discrete simulation with the Traveling Salesman Problem (TSP) approach.

For this purpose, the simulation methodology proposed by Law and Kelton was used, which consists of ten stages, from the definition of the problem to the documentation and analysis of results. To build the models corresponding to the South, Center, North, Royal Street and Organic routes, real data on transfer and service times were used, modeled by means of uniform distributions, in order to capture the variability inherent to the system.

As part of the validation process, statistical tests such as t-pairing and Mean Squared Error (MSE) were applied, as well as the $(n \cdot \beta)$ method to determine the optimal number of runs per model. Subsequently, the output data from each simulation was analyzed and the TSP was applied, with the objective of proposing more efficient routes based on the main performance metrics: average time in the system and percentage of utilization.

For this purpose, the TSPVIS software was used to generate optimal route sequences by means of its 12 solution methods. The selected routes were modeled again in Simio, integrating the real conditions of the environment and the operational uncertainty, allowing to complement the deterministic approach of the TSP with the stochastic component provided by the simulation.

Once the optimized models were validated, a comparative analysis was performed with respect to the base model. The results show significant improvements: the South route showed a 14.19% reduction in the average time in the system, the North route a 12.64% reduction and the Organic route a 13.77% reduction. On the Centro and Calle Real routes, the improvements were more discrete, with reductions of 9.66% and 4.38%, respectively.

Contenido

Nomenclatura y abreviaturas.....	v
Índice de Ecuaciones	v
Índice de Figuras	vi
Índice de Tablas	viii
Introducción	1
Capítulo 1 Generalidades	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.1.1 Enfoque estratégico	6
1.1.2 Marco geográfico.....	6
1.1.3 Estructura organizacional del área	8
1.1.4 Descripción del proceso.....	8
1.1.5 Planteamiento del problema.....	12
1.1.6 Objetivos	12
1.1.6.1 Objetivo general	13
1.1.6.2 Objetivos específicos.....	13
1.1.7 Justificación.....	13
Capítulo 2 Marco teórico	14
2.1 Residuos Sólidos Urbanos (RSU)	14
2.1.1 Composición y clasificación de los Residuos Sólidos Urbanos	15
2.1.2 Generación de Residuos Sólidos Urbanos	17
2.1.3 Ciclo de un sistema de Residuos Sólidos Urbanos.....	19
2.1.3.1 Gestión de RSU: clasificación, almacenamiento y tratamiento	20
2.1.3.2 Recolección	20
2.1.3.3 Separación, procesamiento y transformación de los RSU.....	20
2.1.3.4 Transferencia y transporte	21
2.1.3.5 Disposición final de los residuos	21
2.1.4 Plantas recicladoras	26
2.1.4.1 Importancia ambiental y económica	26
2.1.4.2 Proceso operativo de una planta recicladora.....	27
2.1.4.3 “ECORI”: Planta de separación de residuos sólidos Orizaba.....	27
2.2 Marco normativo mexicano para la gestión de residuos urbanos	28
2.3 Sistema de recolección de RSU en la ciudad de Orizaba, Veracruz	28
2.4 Pruebas de Bondad de Ajuste.....	30

2.5 Distribuciones de probabilidad.....	31
2.5.1 Distribuciones continuas.....	31
2.5.2 Distribuciones discretas	32
2.6 Simulación	33
2.6.1 Clasificación de los modelos de simulación.....	34
2.6.2 Ventajas y desventajas de la simulación	34
2.6.2.1 Ventajas.....	34
2.6.2.2 Desventajas.....	35
2.6.3 Metodología de la simulación.....	35
2.6.4 Verificación y validación del modelo de simulación	37
2.6.5 Prueba t-pareada	37
2.6.6 Determinación del número de corridas óptimas del modelo	38
2.7 Simulation Modelling Based on Intelligent Objects (Simio).....	39
2.7.1 Características principales de Simio:	39
2.7.2 Elementos básicos de Simio.....	40
2.8 Algoritmo del Agente Viajero (TSP)	41
2.8.1 Descripción del problema del agente viajero	41
2.8.2 Métodos para resolver el TSP	41
2.8.2.1 Métodos de aproximación exacta	42
2.8.2.2 Métodos heurísticos.....	42
2.8.2.2.1 Métodos constructivos.....	42
2.8.2.2.2 Métodos de búsqueda	43
2.8.2.3 Métodos metaheurísticos	43
2.9 Software TSPVIS.....	44
2.10 Estado del arte.....	47
Capítulo 3 Metodología.....	50
3.1 Formulación del problema	50
3.2 Recopilación de datos y definición del modelo.....	51
3.2.1 Ruta Sur.....	51
3.2.2 Ruta Centro.....	55
3.2.3 Ruta Norte	57
3.2.4 Ruta Calle Real.....	58
3.2.5 Ruta Orgánica.....	60
3.3 Validación del modelo conceptual	62

3.4 Construir el modelo.....	62
3.4.1 Modelo en Simio de la Ruta Sur.....	65
3.4.2 Modelo en Simio de la Ruta Centro.....	69
3.4.3 Modelo en Simio de la Ruta Norte.....	72
3.4.4 Modelo en Simio de la Ruta Calle Real.....	73
3.4.5 Modelo en Simio de la Ruta Orgánica.....	75
3.5 Ejecución de pruebas piloto.....	76
3.6 Validación del modelo programado.....	78
3.6.1 Validación del modelo de la Ruta Sur.....	80
3.6.2 Validación del modelo de la Ruta Centro.....	82
3.6.3 Validación del modelo de la Ruta Norte.....	83
3.6.4 Validación del modelo de la Ruta Calle Real.....	84
3.6.5 Validación del modelo de la Ruta Orgánica.....	85
3.7 Diseño de experimentos.....	86
3.8 Ejecución de simulaciones.....	87
3.8.1 Ejecución de simulaciones Ruta Sur.....	87
3.8.2 Ejecución de simulaciones Ruta Centro.....	91
3.8.3 Ejecución de simulaciones Ruta Norte.....	92
3.8.4 Ejecución de simulaciones Ruta Calle Real.....	92
3.8.5 Ejecución de simulaciones Ruta Orgánica.....	92
3.9 Análisis de los datos de salida y Documentación e implementación de resultados.....	93
Capítulo 4 Alternativas de mejora.....	95
4.1 Optimización de la Ruta Sur.....	95
4.2 Optimización de la Ruta Centro.....	102
4.3 Optimización de la Ruta Norte.....	106
4.4 Optimización de la Ruta Calle Real.....	111
4.5 Optimización de la Ruta Orgánica.....	115
Capítulo 5 Conclusiones.....	121
Referencias bibliográficas.....	124
Anexos.....	131
Anexo 1 Lectura completa de tiempos de traslado y servicio Ruta Sur.....	131
Anexo 2 Tiempos de traslado y de servicio con distribuciones Ruta Sur.....	132
Anexo 3 Tiempos de traslado y de servicio con distribuciones Ruta Centro.....	133
Anexo 4 Tiempos de traslado y de servicio con distribuciones Ruta Norte.....	134

Anexo 5 Tiempos de traslado y de servicio con distribuciones Ruta Calle Real	135
Anexo 6 Tiempos de traslado y de servicio con distribuciones Ruta Orgánica	136
Anexo 7 Ruta Sur optimizada	137
Anexo 8 Ruta Centro optimizada	138
Anexo 9 Ruta Norte optimizada.....	139
Anexo 10 Ruta Calle Real optimizada	140
Anexo 11 Ruta Orgánica optimizada	141

Nomenclatura y abreviaturas

CIDI:	Centro de Investigación de Diseño Industrial
LGPGIR:	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
NOM:	Norma Oficial Mexicana
OCDE:	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
PIB:	Producto Interno Bruto
RME:	Residuos de Manejo Especial
RP:	Residuos Peligrosos
RPBI:	Residuos Peligrosos Biológicos Infecciosos
RSM:	Residuos Sólidos Municipales
RSU:	Residuos Sólidos Urbanos
SEDEMA:	Secretaría de Medio Ambiente
SEMARNAT:	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIG:	Sistemas de Información Geográfica
TSP:	Travelling Salesman Problem
VRP:	Vehicle Routing Problem

Índice de Ecuaciones

Ecuación 2.1.....	37
Ecuación 2.2.....	38
Ecuación 2.3.....	38
Ecuación 2.4.....	38
Ecuación 2.5.....	38
Ecuación 2.6.....	38
Ecuación 2.7.....	38
Ecuación 2.8.....	38
Ecuación 2.9.....	41
Ecuación 3.1.....	79
Ecuación 3.2.....	79
Ecuación 3.3.....	86

Índice de Figuras

Figura 1.1 Población por grupo quinquenal Orizaba, marzo 2020	4
Figura 1.2 Celebración Reconocimiento Escoba de Platino	5
Figura 1.3 Vista satelital de la ciudad de Orizaba	7
Figura 1.4 Organigrama institucional.....	8
Figura 1.5 Proceso de recolección para servicios especializados	11
Figura 2.1 Iconografía para la identificación de los RSU	15
Figura 2.2 Composición de los RSU en México	17
Figura 2.3 Relación entre Generación de RSU, PIB y Consumo Final Privado	18
Figura 2.4 Generación de RSU por entidad federativa	19
Figura 2.5 Beneficios de un relleno sanitario	22
Figura 2.6 Riesgos de un tiradero a cielo abierto.....	23
Figura 2.7 Distribución geográfica de sitios de disposición final de RSU en Veracruz.....	26
Figura 2.8 Planta ECORI	28
Figura 2.10 Metodología de Simulación	36
Figura 2.11 Interfaz TSPVIS.....	47
Figura 3.1 Taller de Servicios Municipales Orizaba, Veracruz	51
Figura 3.2 Ruta Sur, Servicios Especializados	52
Figura 3.3 Servicio Plaza Faro, ruta Sur.....	52
Figura 3.4 Ruta Centro, Servicios Especializados	55
Figura 3.5 Servicios calle Madero, ruta Centro	56
Figura 3.6 Ruta Norte, Servicios Especializados.....	57
Figura 3.7 Ruta calle Real, Servicios Especializados	58
Figura 3.8 Relleno Sanitario de las Altas Montañas.....	59
Figura 3.9 Servicios HGRO N°1 y Hospital Covadonga.....	59
Figura 3.10 Ruta Orgánica, Servicios Especializados	60
Figura 3.11 Flujograma de operaciones	61
Figura 3.12 Software QGIS.....	62
Figura 3.13 Mapas obtenidos de cada zona de recolección	63
Figura 3.14 Pantalla principal Simio	64
Figura 3.15 Base para construir modelo de la zona sur	64
Figura 3.16 Vista 2D, modelo ruta Sur.....	65
Figura 3.17 Vista 3D, modelo ruta Sur.....	66

Figura 3.18 Configuración de las propiedades del Source (SERMUN).....	67
Figura 3.19 Configuración de las propiedades de un TimePath	68
Figura 3.20 Configuración de las propiedades de un server	69
Figura 3.21 Vista 2D, modelo ruta Centro	70
Figura 3.22 Vista 3D, modelo ruta Centro	71
Figura 3.23 Vista 2D, modelo ruta Norte	72
Figura 3.24 Vista 3D, modelo ruta Norte	72
Figura 3.25 Vista 2D, modelo ruta calle Real.....	73
Figura 3.26 Vista 3D, modelo ruta calle Real.....	74
Figura 3.27 Vista 2D, modelo ruta Orgánica.....	75
Figura 3.28 Vista 3D, modelo ruta Orgánica.....	75
Figura 3.29 Resultados de 15 corridas piloto del modelo ruta Sur	77
Figura 3.30 Resultados de 15 corridas piloto del modelo ruta Centro	77
Figura 3.31 Resultados de 15 corridas piloto del modelo ruta Norte	77
Figura 3.32 Resultados 15 corridas piloto del modelo ruta calle Real	78
Figura 3.33 Resultados 15 corridas piloto del modelo ruta Orgánica	78
Figura 3.34 Sección Project Home en Simio.....	88
Figura 3.35 Creación de variable TiempoInicio	88
Figura 3.36 Asignación de TiempoInicio a la model entity	89
Figura 3.37 Creación de Tally_TiempoEnSistema.....	89
Figura 3.38 Creación de Tally_TiempoEnSistema.....	90
Figura 3.39 Programación final TiempoPromedioEnSistema.....	90
Figura 3.40 Programación de la response Porcentaje_de_Utilización	90
Figura 3.41 Resultados experimento ruta Sur, pestaña Design.....	91
Figura 3.42 Resultados experimento ruta Sur, pestaña Pivot Grid	91
Figura 3.43 Resultados experimento ruta Centro, pestaña Design.....	92
Figura 3.44 Resultados experimento ruta Norte, pestaña Design	92
Figura 3.45 Resultados experimento ruta calle Real, pestaña Design.....	92
Figura 3.46 Resultados experimento ruta Orgánica, pestaña Design	93
Figura 4.1 Comparativa ruta Sur actual (superior) vs ruta Sur optimizada (inferior).....	99
Figura 4.2 Vista 2D del nuevo recorrido propuesto para la ruta Sur.....	100
Figura 4.3 Vista 3D del nuevo recorrido propuesto para la ruta Sur.....	100
Figura 4.4 Resultados recorrido optimizado ruta Sur	101
Figura 4.5 Recorrido optimizado propuesto, ruta Sur.....	101

Figura 4.6 Comparativa ruta Centro actual (superior) vs ruta Centro optimizada (inferior)	104
Figura 4.7 Vista 3D del recorrido optimizado ruta Centro	105
Figura 4.8 Resultados recorrido optimizado ruta Centro	105
Figura 4.9 Recorrido optimizado propuesto, ruta Centro	106
Figura 4.10 Comparativa ruta Norte actual (superior) vs ruta Norte optimizada (inferior).....	109
Figura 4.11 Vista 3D del recorrido optimizado ruta Norte	109
Figura 4.12 Resultados recorrido optimizado ruta Norte.....	110
Figura 4.13 Recorrido optimizado propuesto, ruta Norte	110
Figura 4.14 Comparativa ruta calle Real actual (superior) vs ruta calle Real optimizada (inferior)	113
Figura 4.15 Vista 3D del recorrido optimizado ruta calle Real	113
Figura 4.16 Resultados simulación ruta calle Real optimizada	114
Figura 4.17 Recorrido optimizado propuesto, ruta calle Real.....	114
Figura 4.18 Comparativa ruta Orgánica actual (superior) vs ruta Orgánica optimizada (inferior).	117
Figura 4.19 Vista 3D del recorrido optimizado ruta Orgánica.....	117
Figura 4.20 Resultados simulación ruta Orgánica optimizada.....	118
Figura 4.21 Recorrido optimizado propuesto, ruta Orgánica.....	118

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Índice de Desarrollo Humano (IDH), 2010, 2015 y 2020.....	4
Tabla 1.2 Funciones de las unidades de recolección	9
Tabla 2.1 Sitios para la disposición final de RSU en Veracruz	24
Tabla 2.2 Marco normativo mexicano respecto a la gestión de RSU	29
Tabla 2.3 Principales pruebas de bondad de ajuste.....	30
Tabla 2.4 Principales distribuciones de probabilidad continuas	31
Tabla 2.5 Principales distribuciones de probabilidad discretas.....	32
Tabla 2.6 Biblioteca Simio.....	40
Tabla 2.7 Clasificación de métodos de solución para el TSP	45
Tabla 2.8 Estado del arte	48
Tabla 3.1 Lectura de tiempos, ruta Sur.....	53
Tabla 3.2 Tiempos de traslado y de servicio, ruta Sur.....	54
Tabla 3.3 Tiempos de traslado y servicio, ruta Centro	56

Tabla 3.4 Tiempos de traslado y servicio, ruta Norte	58
Tabla 3.5 Tiempos de traslado y servicio ruta calle Real	60
Tabla 3.6 Tiempos de traslado y servicio ruta Órgánica.....	61
Tabla 3.7 Elementos del modelo ruta Sur.....	69
Tabla 3.8 Elementos del modelo ruta Centro	71
Tabla 3.9 Elementos del modelo ruta Norte	73
Tabla 3.10 Elementos del modelo ruta calle Real.....	74
Tabla 3.11 Elementos del modelo ruta Orgánica.....	76
Tabla 3.12 Validación del MSE, ruta Sur.....	80
Tabla 3.13 Datos para prueba t-pareada, ruta Sur.....	81
Tabla 3.14 MSE y datos para prueba t-pareada, ruta Centro	82
Tabla 3.15 MSE y datos para prueba t-pareada, ruta Norte	83
Tabla 3.16 MSE y datos prueba t-pareada, ruta calle Real	84
Tabla 3.17 MSE y datos prueba t-pareada, ruta Orgánica	85
Tabla 3.18 Concentrado de resultados corridas piloto.....	87
Tabla 3.19 Resultados por cada ruta.....	93
Tabla 4.1 Resultados algoritmo TSP ruta Sur.....	96
Tabla 4.2 Recorrido optimizado ruta Sur	98
Tabla 4.3 Resultados algoritmo TSP ruta Centro	102
Tabla 4.4 Recorrido optimizado ruta Centro	103
Tabla 4.5 Resultados algoritmo TSP ruta Norte	107
Tabla 4.6 Recorrido optimizado ruta Norte	108
Tabla 4.7 Resultados algoritmo TSP ruta calle Real	111
Tabla 4.8 Recorrido optimizado ruta calle Real	112
Tabla 4.9 Resultados algoritmo TSP ruta Orgánica.....	115
Tabla 4.10 Recorrido optimizado ruta Orgánica.....	116
Tabla 4.11 Comparativo de resultados	119

Introducción

La gestión eficiente de los residuos sólidos urbanos representa uno de los principales desafíos logísticos para los gobiernos municipales, especialmente en contextos urbanos donde el crecimiento poblacional y las limitaciones operativas ponen a prueba la sostenibilidad de los servicios públicos. En este escenario, el diseño y la optimización de rutas de recolección adquieren una relevancia estratégica, ya que inciden directamente en la calidad del servicio, el aprovechamiento de los recursos y las condiciones laborales del personal operativo.

En el municipio de Orizaba, Veracruz, el programa de Servicios Especializados de Recolección enfrenta una serie de dificultades derivadas de una planificación basada en la experiencia más que en criterios técnicos y cuantitativos. Esta situación ha generado sobrecargas en determinadas rutas, trayectos subóptimos y un uso ineficiente de los recursos disponibles. Ante esta problemática, surge la necesidad de aplicar metodologías científicas que permitan analizar, simular y mejorar el sistema actual de recolección.

La presente investigación tiene como objetivo general optimizar las rutas del programa de recolección especializado en la ciudad de Orizaba, mediante el uso de técnicas de simulación y herramientas de análisis matemático. Para alcanzar este propósito, se emplearon dos enfoques complementarios: por un lado, la resolución del Problema del Agente Viajero (TSP, por sus siglas en inglés) a través del software TSPVIS, con el fin de proponer secuencias de recorrido que minimicen la distancia total; y por otro, la simulación del sistema en el software Simio, lo cual permitió incorporar elementos de incertidumbre característicos del entorno urbano, como el tráfico y las condiciones viales, así como validar la viabilidad operativa de las rutas optimizadas. Adicionalmente, gracias a las herramientas gráficas del simulador, particularmente su visualización en tercera dimensión fue posible lograr una mejor comprensión del comportamiento del sistema al facilitar la observación detallada de los desplazamientos del vehículo recolector.

Durante el desarrollo del proyecto se llevó a cabo un levantamiento exhaustivo de datos reales, se modelaron las rutas existentes y se diseñaron alternativas con base en los algoritmos proporcionados por el software TSPVIS. Posteriormente, se simularon los escenarios en Simio, evaluando el impacto de las propuestas en términos de tiempo promedio en el sistema y porcentaje de utilización del camión recolector.

Los resultados mostraron una mejora significativa en todos los indicadores analizados, lo que evidencia el potencial de las herramientas empleadas para optimizar el desempeño del sistema de recolección. Además, se constató que la implementación de soluciones analíticas contribuye a reducir el empirismo en la toma de decisiones operativas y genera beneficios tangibles tanto para la administración pública como para la comunidad. Entre dichos beneficios, destaca la disminución en el porcentaje de utilización de los vehículos recolectores, lo cual no solo mejora la eficiencia del sistema, sino que también tiene un impacto positivo en los operarios al reducir su carga operativa y favorecer condiciones laborales más sostenibles.

Esta investigación no solo busca ofrecer una solución técnica al problema de rutas ineficientes, sino también servir como base para futuras mejoras en la gestión de residuos urbanos, promoviendo una cultura de planificación informada, basada en datos y orientada a la mejora continua.

Capítulo 1

Generalidades

El municipio de Orizaba, reconocido como Pueblo Mágico y galardonado por sus esfuerzos en gestión ambiental, constituye un referente en la promoción del desarrollo sustentable. Dentro de sus múltiples acciones, el departamento de Limpia Pública desempeña un papel fundamental en la gestión eficiente de los residuos sólidos urbanos, contribuyendo tanto a la preservación del entorno como al bienestar de sus habitantes.

En consecuencia, en este capítulo se exponen las generalidades del proyecto y del área de estudio, detallando el contexto geográfico, histórico y administrativo del ayuntamiento de esta ciudad, la estructura y los procesos operativos que se desarrollan, así como los retos actuales que justifican la necesidad de esta investigación.

1.1 Antecedentes

Orizaba, conocida como el “lugar de las aguas alegres” y cuyo nombre proviene del náhuatl *Ahuilizapan*, está ubicada en la región de las Altas Montañas. Fue habitada por varios pueblos originarios antes de la llegada de los conquistadores. Hernán Cortés reconoció su valor estratégico tras su paso por Tenochtitlán. Durante el virreinato, se convirtió en un punto clave del comercio entre la Ciudad de México y el Puerto de Veracruz. En 1540, se inició allí el cultivo de caña de azúcar, lo que impulsó su desarrollo económico (Secretaría de Turismo, 2019).

Orizaba armoniza su riqueza histórica con un entorno natural privilegiado. Ubicada a 1,230 metros sobre el nivel del mar, posee un clima templado y húmedo, con lluvias en verano y una temperatura promedio de 22 °C. Destacan la ribera del río Orizaba, que combina arte y biodiversidad, y la vista del Pico de Orizaba desde el teleférico (Secretaría de Turismo, 2024). Su centro histórico, con edificaciones coloniales como el Palacio de Hierro y una oferta cultural y recreativa diversa, ha sido clave para que, desde 2015, se le reconozca como Pueblo Mágico, valorando su importancia histórica, arquitectónica y turística.

En términos demográficos, de acuerdo con el Gobierno de México (2024), Orizaba registró en 2020 una población de 123,182 habitantes, conformada por un 53.9 % de mujeres y un 46.1 % de hombres, tal como se muestra en la Figura 1.1.

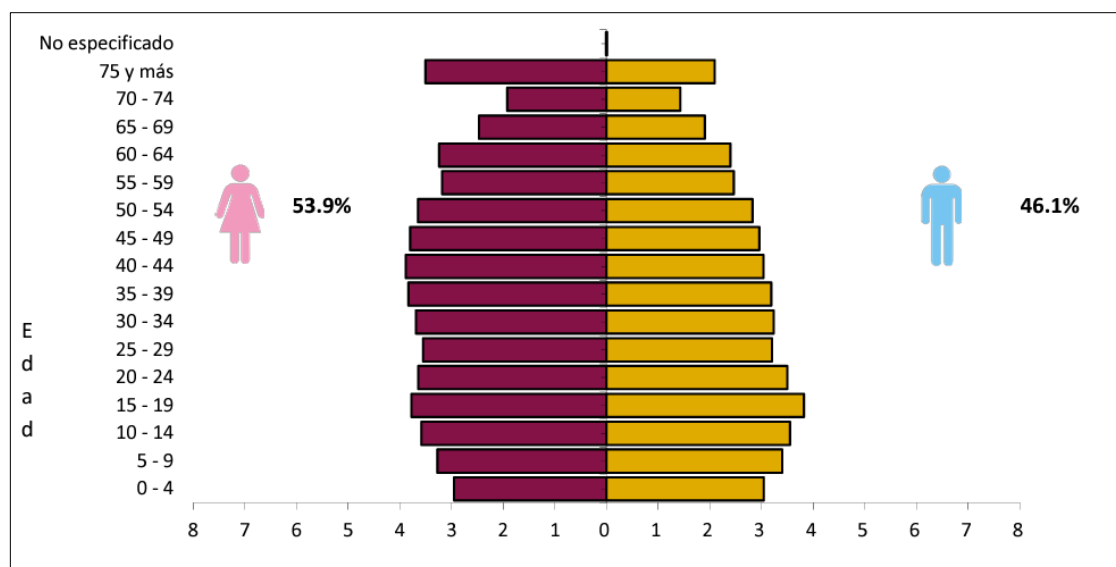


Figura 1.1 Población por grupo quinquenal Orizaba, marzo 2020 (Fuente: SIEGVER, 2023)

En cuanto al desarrollo económico de la ciudad, la Tabla 1.1 muestra el Índice de Desarrollo Humano (IDH) correspondiente a los años 2010, 2015 y 2020. La estabilidad mantenida deja en evidencia avances sostenidos en economía, salud y educación, repercutiendo positivamente en la calidad de vida de la población.

Tabla 1.1 Índice de Desarrollo Humano (IDH), 2010, 2015 y 2020 (Fuente: SIEGVER, 2023)

Índice	2010	2015	2020
Dimensión			
Índice de Desarrollo Humano	0.803	0.808	0.821
Grado de Desarrollo Humano	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto
Subíndice de Salud	0.893	0.883	0.899
Subíndice de Educación	0.738	0.756	0.793
Subíndice de Ingreso	0.787	0.789	0.775

Ahora bien, el éxito de Orizaba no solo se limita en estos aspectos, sino también lo es en materia de sostenibilidad. Prueba de ello son los reconocimientos internacionales que ha recibido por su gestión ambiental y manejo eficiente de residuos sólidos. En este sentido, la Asociación Técnica para la Gestión de Residuos y Medio Ambiente (ATEGRUS) ha

otorgado al municipio los premios en reconocimiento a sus destacadas iniciativas: Escoba de Plata (2018), Oro (2021) y la versión más reciente del certamen Escoba Platino (2024), la cual destaca las acciones de concientización ciudadana, como reuniones vecinales y recorridos domiciliarios, que han permitido alcanzar un índice del 64 % de recuperación de residuos en la ciudad (Golpe Político, 2024). La Figura 1.2 muestra algunos miembros del departamento, como es el caso del coordinador de Limpia Pública, el licenciado Andrés Morales, quien se encuentra sosteniendo dicha presea.



Figura 1.2 Celebración Reconocimiento Escoba de Platino (Fuente: El Sol de Orizaba, 2024)

Adicionalmente, gracias a la implementación de la Planta de Separación de Residuos Sólidos (ECORI), se obtuvo un galardón en los Premios a la Trayectoria en Gestión de Residuos 2023 DS ISWA México (El Sol de Orizaba, 2024).

Estos reconocimientos reflejan la capacidad de Orizaba para diseñar e implementar estrategias sostenibles que favorecen un entorno urbano limpio y funcional. Asimismo, evidencian la colaboración entre el gobierno municipal y la ciudadanía en la construcción de un modelo de gestión ambiental responsable. En este contexto, el área operativa donde se desarrolla el presente proyecto resulta clave para garantizar prácticas efectivas que contribuyan al orden y la preservación de la ciudad.

1.1.1 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

1.1.2 Marco geográfico

El municipio de Orizaba abarca una superficie total de 27.9 km² y se encuentra situado en la región central del estado de Veracruz. Con base en la Figura 1.3, se observa que sus límites territoriales son: al norte, con los municipios de Ixhuatlancillo, Mariano Escobedo, Atzacan e Ixtaczoquitlán; al este, únicamente con Ixtaczoquitlán; al sur, con Ixtaczoquitlán, Rafael Delgado, Huiloapan de Cuauhtémoc y Río Blanco; y al oeste, con Río Blanco e Ixhuatlancillo.

Ahora bien, como parte de las estrategias implementadas por el departamento de Limpia Pública, se ofrece un servicio de recolección especializado para atender las necesidades de la actividad comercial en la ciudad que en muchos casos enfrenta limitaciones como la imposibilidad de disponer de sus desechos durante la noche.

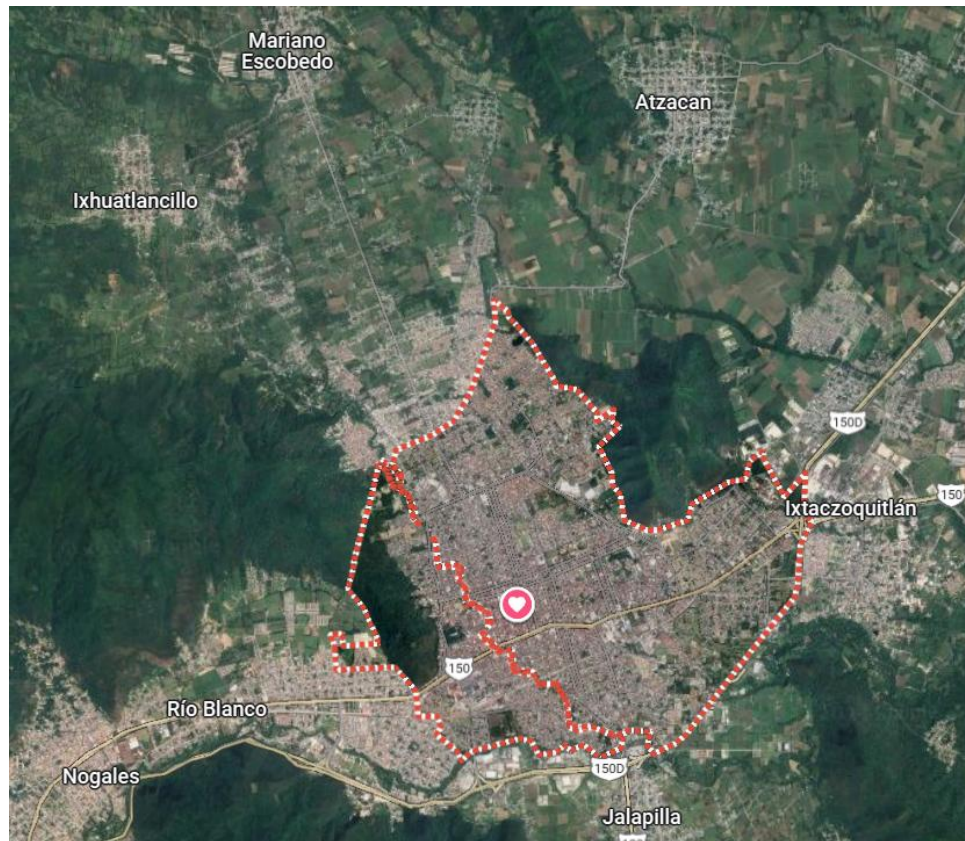


Figura 1.3 Vista satelital de la ciudad de Orizaba (Fuente: Google Maps, 2024)

Este programa opera bajo un esquema de pago anual, cuyo monto varía en función del volumen de residuos generados por cada establecimiento. De esta manera, el sistema garantiza una recolección adaptada a las necesidades específicas de cada comercio, optimizando la gestión de los residuos en este sector.

Las zonas que comprenden este esquema de recolección son las que se estarán analizando en la presente tesis, para las cuales se tienen destinados 5 camiones recolectores que se clasifican de la siguiente manera:

- Ruta Centro
- Ruta Sur
- Ruta calle Real
- Ruta Norte
- Ruta Orgánica

1.1.3 Estructura organizacional del área

La coordinación Limpia Pública está conformada por 238 empleados distribuidos en distintas secciones, entre las que destacan el parque vehicular, la gestión comercial, la jefatura de la planta ECORI y la jefatura de personal en recolección. La Figura 1.4, proporciona una descripción más detallada del personal que integra este departamento.

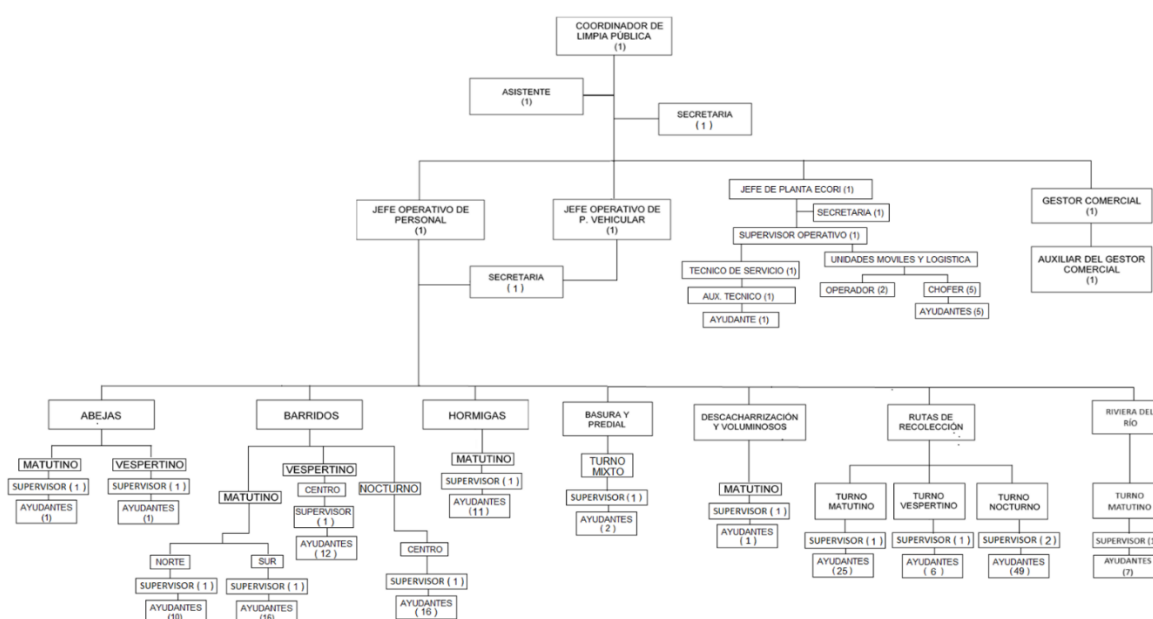


Figura 1.4 Organigrama institucional (Fuente: Ayuntamiento de Orizaba, 2022)

Cabe mencionar que el responsable del área de recolección coordina diversas cuadrillas organizadas por secciones y turnos, abarcando principalmente los horarios matutino y vespertino para el servicio especializado y el nocturno, para la recolección exclusiva de residuos sólidos urbanos provenientes de las casas habitación.

1.1.4 Descripción del proceso

El sistema en estudio corresponde al servicio de recolección dirigido a comercios y otros edificios que, mediante un pago adicional, reciben atención personalizada. Este programa incluye ciertos edificios gubernamentales que, debido a su naturaleza, son atendidos de manera gratuita. Por mencionar algunos se encuentran las escuelas públicas, el Archivo Municipal, el Palacio de Hierro, el Palacio Municipal, entre otros. En consecuencia, el proceso que debe conocerse es el que concierne a las rutas de recolección del turno matutino, específicamente de las zonas: Centro, Sur, Norte, calle Real y Orgánica.

De acuerdo con lo anterior, a continuación se presentan las funciones y responsabilidades de cada puesto, como se muestra en la Tabla 1.2. Esto resulta importante para contextualizar al lector, ya que proporciona una visión detallada de cómo se organiza el equipo de trabajo y cómo contribuye cada rol al cumplimiento eficiente de las actividades de recolección.

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

Puesto	Funciones
Supervisor	• Proporcionar lista de asistencia al personal. • 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, realizando 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 todo el personal cumpla con sus responsabilidades de acuerdo con las actividades asignadas, evaluando el desempeño del trabajador. • Realizar la identificación y seguimiento a puntos 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 esté en buenas condiciones.

Posteriormente, se describen las operaciones que se llevan a cabo diariamente, con el fin de ofrecer una visión integral del funcionamiento operativo en campo.

- **Registro de asistencia:** las actividades comienzan con el registro de asistencia del personal operativo, utilizando la lista proporcionada por el supervisor en turno.
- **Asignación de personal y unidades a cada zona:** seguidamente, el supervisor asigna a cada equipo la zona que cubrirán y la unidad correspondiente, compuesta por un conductor y dos ayudantes. Por lo general, los choferes son asignados de manera fija para que puedan familiarizarse con la ruta y optimizar los tiempos de traslado, mientras que los ayudantes (recolectores) suelen rotarse con mayor frecuencia.
- **Verificación del estado de la unidad y EPP:** el responsable de unidad debe verificar el correcto funcionamiento del vehículo recolector, así como asegurarse que su equipo de trabajo cuente con el EPP y señalamientos necesarios. En caso de algún faltante o desperfecto con la unidad, este lo reporta al supervisor quien es el responsable de resolver dichas situaciones.
- **Reporte de kilometraje y gasolina:** el responsable de ruta, también llamado operador o simplemente chofer, al ser confirmado sobre la zona y unidad que tendrá a cargo debe reportar al supervisor el kilometraje con el que encuentra el carro recolector, así como el nivel de gasolina con el que se cuenta.
- **Entrega de tarjeta y cuponera para carga de gasolina:** el supervisor hace entrega de una tarjeta, así como de una cuponera para que los choferes puedan cargar gasolina, en caso de ser necesario. Generalmente, se hace una carga de 100 litros y se tiene hasta los viernes para volver a llenar el tanque.
- **Salida de unidad de la base hacia zona de recolección:** hecho todo lo anterior, el siguiente paso es la salida de cada unidad hacia la zona asignada para realizar los servicios programados.
- **Recolección de RSU:** la unidad se encarga de acudir a cada comercio, escuela y/o edificio gubernamental con base en la programación establecida. Cabe mencionar que, algunos lugares manejan horarios específicos de atención debido a las características propias de los negocios. Por ejemplo, ciertos restaurantes solo retiran

sus residuos antes de que reciban clientes, por lo que los vehículos deben estar antes de las 8 a.m. o, en el caso del parque industrial, su intervalo de recolección es de 9:30 a.m. a 11:00 a.m.

- **Descarga de unidad:** al finalizar la jornada laboral, la unidad recolectora debe regresar a la base para descargar el vehículo y dejarlo disponible para el siguiente turno. No obstante, si el camión llegara a llenarse antes de completar los servicios programados, la descarga se realiza de manera inmediata, asegurando así el cumplimiento de las actividades planificadas.
- **Entrega de turno:** al finalizar todas sus actividades, el personal debe reportar la entrega de la unidad a la base, ya descargada. Asimismo, debe informar sobre el kilometraje final, si se cargó gasolina y algún dato adicional pertinente, por ejemplo, si el vehículo tiene algún desperfecto o alguna otra eventualidad.

Para visualizar de manera clara y estructurada la secuencia de estas actividades, en la Figura 1.5 se presenta el diagrama de flujo de las operaciones descritas.

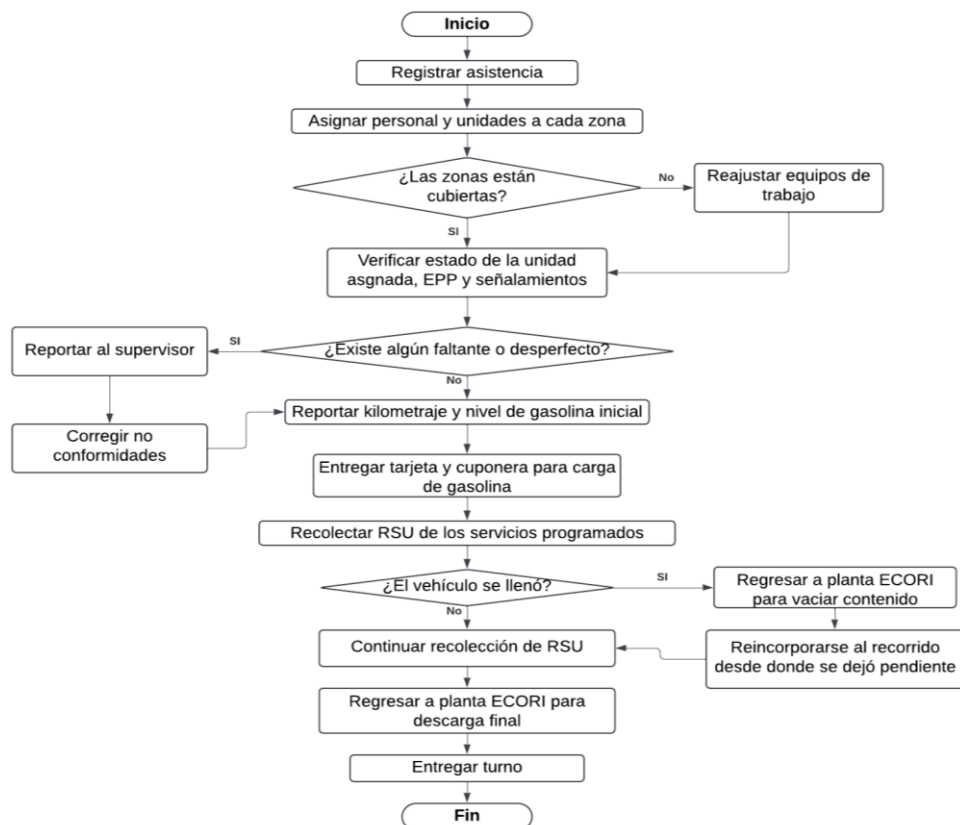


Figura 1.5 Proceso de recolección para servicios especializados (Fuente: Elaboración propia)

1.1.5 Planteamiento del problema

Orizaba se ha consolidado como un referente nacional en sostenibilidad gracias a su eficiente gestión de los residuos sólidos urbanos, aspecto fundamental para preservar la imagen de una ciudad limpia y ordenada, especialmente ante el crecimiento del sector turístico, uno de los pilares de su economía. Sin embargo, a pesar de los avances en distintas áreas de la coordinación de Limpia Pública, persisten deficiencias como en el caso del servicio de recolección especializado, el cual atiende a usuarios comerciales e industriales que requieren atención personalizada debido a restricciones de horario o a la generación de grandes volúmenes de desechos.

Uno de los principales factores que explican estas deficiencias es que las rutas y el orden de atención han sido definidas de forma empírica, con base en la experiencia de los operadores. Aunque este conocimiento es valioso, la ausencia de herramientas analíticas limita la eficiencia del proceso, afectando el aprovechamiento óptimo de recursos como el tiempo, incrementando los costos del servicio, las quejas debido al incumplimiento de horarios establecidos, entre otros. En consecuencia, se vuelve necesario rediseñar esta ruta mediante un enfoque más técnico y sistemático que permita mejorar su desempeño.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo desarrollar un modelo de simulación en Simio que permita evaluar y optimizar la operación actual de la ruta de servicios especializados. Aunque la optimización puede involucrar variables como el combustible, el estudio se centrará en el tiempo y la distancia recorrida, debido su carácter crítico y disponibilidad para el análisis. Con ello, se busca contribuir a un sistema de recolección más eficaz, que refuerce el compromiso de Orizaba con la sostenibilidad, la optimización de los recursos y la calidad en la atención a sus usuarios.

1.1.6 Objetivos

Derivado del planteamiento del problema, se formulan los objetivos de esta investigación, orientados a mejorar la eficiencia de la ruta de recolección del servicio especializado en Orizaba.

1.1.6.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo de simulación en Simio que permita analizar y evaluar la eficiencia de la ruta de recolección de basura “servicios especializados” de la ciudad de Orizaba, considerando los indicadores incidentes y proponer alternativas para mejorar la gestión actual.

1.1.6.2 Objetivos específicos

- Analizar el sistema real y recolectar datos de la ruta servicios especializados.
- Construir el modelo de simulación de la ruta bajo estudio.
- Evaluar diferentes escenarios que permitan mejorar la ruta de recolección servicios especializados.
- Contribuir al mejoramiento de la ruta servicios especializados de la ciudad Orizaba con base en los resultados de la simulación en Simio.

1.1.7 Justificación

La adecuada gestión de los residuos sólidos urbanos es clave para la sostenibilidad ambiental, especialmente en ciudades como Orizaba, que se distinguen por su crecimiento turístico y su compromiso con una imagen urbana limpia. Aunque el departamento de Limpia Pública ha logrado avances importantes, aún existen áreas con oportunidades de mejora, como la ruta de recolección de “servicios especializados”.

En consecuencia, la relevancia de esta investigación radica en la posibilidad de proponer mejoras significativas mediante la implementación de un modelo de simulación en Simio. Este modelo permitirá analizar el sistema actual, evaluar diferentes escenarios y proponer alternativas que optimicen la operación de la ruta de servicios especializados, promoviendo una gestión más eficiente y sostenible. Asimismo, los resultados de este estudio no solo impactarán en la optimización de recursos y la mejora del servicio en Orizaba, sino que también podrían servir como un referente para otras ciudades interesadas en perfeccionar sus sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos, fortaleciendo su compromiso con la sostenibilidad ambiental, la optimización de los recursos y la calidad de vida de sus habitantes.

Capítulo 2

Marco teórico

Este capítulo presenta los fundamentos teóricos esenciales para comprender el contexto, los desafíos y los métodos aplicados en la investigación sobre la optimización de la ruta servicios especializados de residuos sólidos en la ciudad de Orizaba, Veracruz. Se abordan los conceptos clave relacionados con la gestión de residuos, incluyendo su clasificación, generación y tratamiento, así como los sistemas de recolección y las normativas mexicanas vigentes. Además, se exploran técnicas de simulación y modelado, haciendo especial énfasis en el uso de herramientas como Simio, y se profundiza en los métodos de solución de problemas de optimización, como el algoritmo del Agente Viajero (TSP). Este marco proporciona la base necesaria para entender los enfoques y las técnicas que se desarrollarán y aplicarán en los capítulos posteriores de la tesis.

2.1 Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

De acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, publicada en el Diario Oficial de la Federación en el año 2003, los residuos son materiales o productos desechados en estado sólido, semisólido, líquido o gaseoso que requieren tratamiento o disposición final. Estos se clasifican según sus características y origen en tres categorías principales: residuos sólidos urbanos (RSU) antes llamados residuos sólidos municipales (RSM), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP).

En este contexto, conviene aclarar que los RSU comprenden a aquellos remanentes generados en los hogares como resultado de las actividades cotidianas, incluyendo materiales como envases, embalajes y productos de consumo, entre otros. También abarcan los desechos producidos en establecimientos o espacios públicos que poseen características similares a las domiciliarias, así como aquellos provenientes de calles y áreas comunes, siempre y cuando no pertenezcan a otra categoría de residuos (Diario Oficial de la Federación, 2003a).

2.1.1 Composición y clasificación de los Residuos Sólidos Urbanos

De manera general, los RSU se clasifican en (Robles Hernández, 2004):

- a) **Residuos domiciliarios:** son materiales orgánicos e inorgánicos generados a partir de actividades domésticas y de limpieza.
- b) **Residuos comerciales:** se refieren a los desechos que se generan en establecimientos comerciales de cualquier giro, oficinas de servicios y salas de espectáculos, ya sean del sector público o privado.
- c) **Residuos industriales:** incluyen los desechos procedentes de actividades productivas llevadas a cabo en instalaciones como talleres, fábricas, plantas congeladoras, calderas, cervecerías, termoeléctricas, refinerías e instalaciones químicas o industriales, entre otras de naturaleza similar.

De acuerdo con la SEMARNAT (2017), la separación de residuos en México es fundamental para su aprovechamiento, pero la falta de criterios unificados, como los diferentes sistemas de clasificación y colores, genera confusión en la población. Para resolver esta problemática, en colaboración con el CIDI de la UNAM, se diseñó una iconografía estandarizada que facilita la identificación clara y precisa de los residuos, promoviendo así la participación ciudadana en su gestión. Los resultados se muestran en la Figura 2.1.



Figura 2.1 Iconografía para la identificación de los RSU (Fuente: SEMARNAT, 2010)

Ahora bien, como lo señala Robles Hernández (2004), cada categoría de residuos incluye una variedad de materiales específicos, por lo que resulta fundamental precisar su clasificación. A continuación, se presentan ejemplos representativos de los materiales que corresponden a cada grupo, con el propósito de facilitar su identificación y correcta disposición.

- **Residuos orgánicos:** son desechos de origen biológico que se descomponen de forma natural mediante microorganismos como bacterias y hongos.
- **Residuos inorgánicos:** son aquellos materiales que no contienen carbono en su estructura básica y no se descomponen fácilmente por acción de microorganismos, incluyen los siguientes:
 - **Vidrio:** considera envases de cristal, frascos, botellas y otros productos similares.
 - **Papel y cartón:** comprende periódicos, revistas, embalajes de cartón y envases de papel, entre otros.
 - **Plásticos:** presentes principalmente en forma de envases y otros objetos de diversa índole.
 - **Textiles (Tela):** incluyen prendas de vestir, tejidos y elementos decorativos utilizados en el hogar.
 - **Metales:** agrupan latas, restos de herramientas, utensilios de cocina, mobiliario metálico, y afines.
 - **Madera:** proveniente principalmente de muebles y otros artículos de uso doméstico.

Esta clasificación resulta esencial para identificar la naturaleza y procedencia de los residuos sólidos urbanos, lo que facilita el desarrollo de estrategias de gestión más eficientes y sostenibles. Es importante señalar que la proporción de residuos orgánicos e inorgánicos guarda una estrecha relación con el nivel socioeconómico de la población. En países de ingresos más bajos, los desechos orgánicos predominan, mientras que en aquellos de mayores ingresos, los restos inorgánicos se vuelven más comunes, debido principalmente al alto consumo de productos manufacturados.

En este sentido, con base en estudios realizados por el Gobierno de México (2018) en conjunto con la SEMARNAT, se sabe que México va presentando una tendencia hacia una composición de residuos con menor predominancia de materiales orgánicos. Mientras que en la década de 1950 estos residuos representaban entre el 65 y el 70% del volumen total, para 2017 dicha cifra disminuyó a 51.6%. A su vez, otros componentes relevantes de los residuos generados en el país incluyen el papel y sus derivados (14.2%) y los plásticos (11%). La Figura 2.2 muestra una gráfica de pastel que ilustra lo anterior.

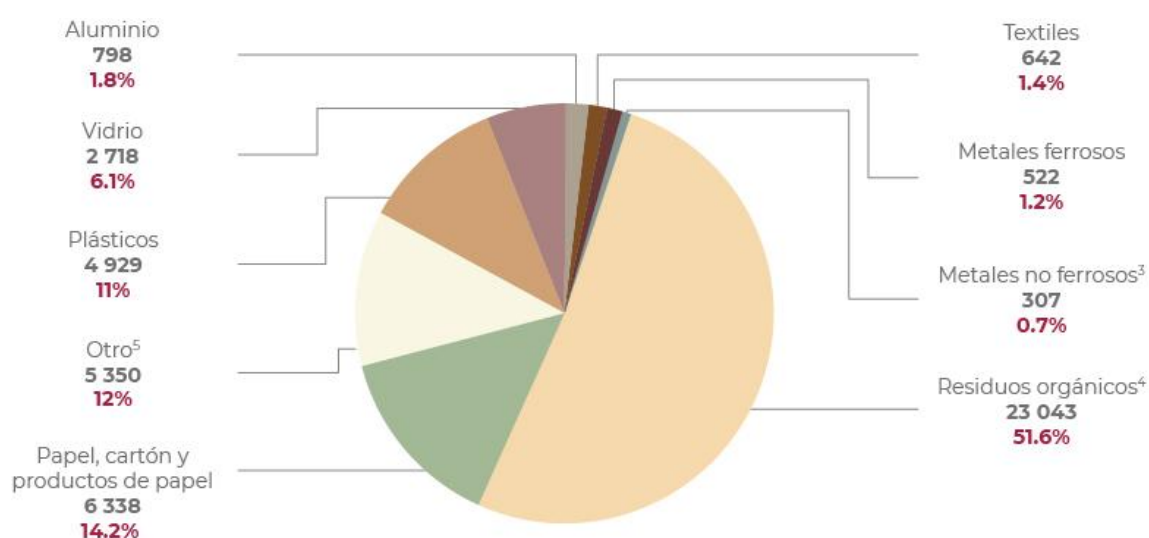


Figura 2.2 Composición de los RSU en México (Fuente: Gobierno de México, 2018)

2.1.2 Generación de Residuos Sólidos Urbanos

De conformidad con lo establecido en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), la generación de residuos se entiende como el resultado de las actividades productivas o de consumo que dan origen a estos desechos (Secretaría del Medio Ambiente & Gobierno de México, 2022), siendo su estimación un proceso complejo, ya que no es posible registrar exhaustivamente toda la basura producida. Para ello, se emplean métodos indirectos, como la medición de residuos a nivel individual o por hogar, cuyos datos, a través de modelos matemáticos sencillos, se extrapolan considerando variables como el tamaño de la población, los ingresos, el estatus social y las características de la localidad. Además, los datos proporcionados por los servicios de recolección también contribuyen a este cálculo, aunque es necesario realizar ajustes debido a la cobertura incompleta de los sistemas de recolección.

Como se ha señalado, la cantidad de residuos sólidos urbanos generados depende de múltiples factores, entre los cuales se destacan el crecimiento urbano, el desarrollo industrial, los avances tecnológicos y las transformaciones en los patrones de consumo. A nivel nacional, al igual que en otros países, existe una estrecha relación entre el aumento de la generación de RSU y el gasto en consumo final privado, así como con el Producto Interno Bruto (PIB). Este vínculo queda reflejado en la Figura 2.3, donde se observa que, a medida que incrementan los ingresos, también lo hace el nivel de consumo, lo que da lugar a un mayor volumen de residuos.

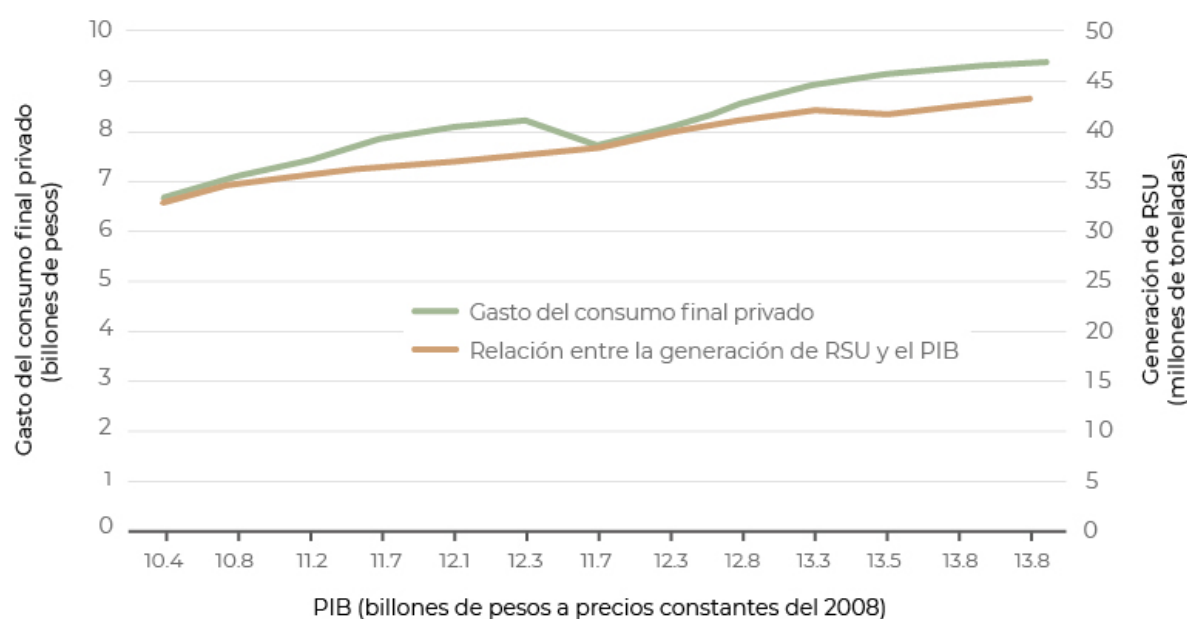


Figura 2.3 Relación entre Generación de RSU, PIB y Consumo Final Privado (Fuente: Gobierno de México, 2018)

En la misma línea, el fenómeno de urbanización también se ve asociado con el incremento de los RSU, al impulsar un estilo de vida de mayor consumo de artículos industrializados. En contraste, en las áreas rurales o pequeñas localidades, los habitantes consumen predominantemente productos menos procesados, los cuales suelen carecer de elementos que se transforman en desechos, como las envolturas. En virtud de esta relación, las estimaciones y proyecciones sobre la generación de residuos sólidos urbanos se fundamentan generalmente en la densidad poblacional y las características específicas de cada región.

La Figura 2.4 muestra un mapa de la República Mexicana con el comportamiento observado en 2017 respecto al volumen de residuos sólidos urbanos generados. Ese año, las entidades que registraron los mayores volúmenes fueron: Estado de México (6.98 millones de toneladas, equivalente al 15.7% del total nacional), Ciudad de México (3.98 millones de toneladas, 9%), Jalisco (3.2 millones de toneladas, 7.1%) y Veracruz (2.4 millones de toneladas, 5.3%). En contraste, los menores volúmenes de generación correspondieron a Colima (241,955 toneladas, 0.5%), Baja California Sur (301,640 toneladas, 0.7%), Tlaxcala (301,759 toneladas, 0.7%) y Campeche (313,317 toneladas, 0.7%).

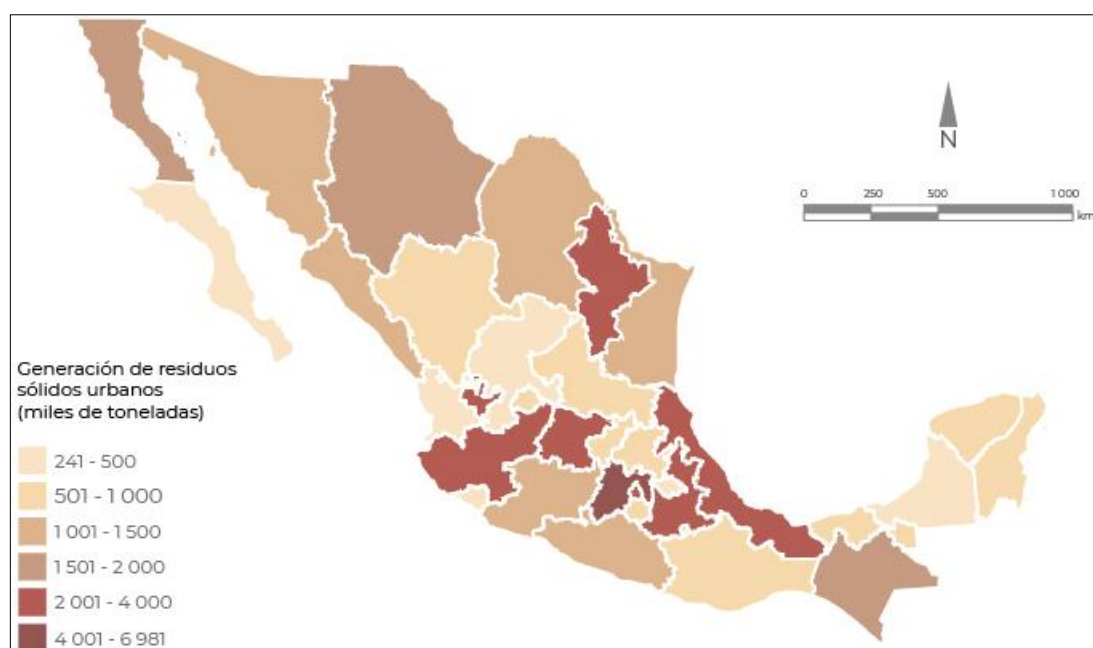


Figura 2.4 Generación de RSU por entidad federativa (Fuente: Gobierno de México, 2018)

2.1.3 Ciclo de un sistema de Residuos Sólidos Urbanos

El manejo adecuado de los RSU representa un reto fundamental para las ciudades modernas, al requerir un enfoque integral que garantice una gestión eficiente y sostenible. El ciclo de los RSU comprende etapas clave como la generación, recolección, transporte, separación, reciclaje y disposición final, cada una esencial para reducir el impacto ambiental y optimizar recursos. Al ser indispensable su comprensión y las estrategias necesarias para su correcta administración, dicho ciclo se detalla a continuación.

2.1.3.1 Gestión de RSU: clasificación, almacenamiento y tratamiento

Este proceso inicia con la manipulación y disposición de los materiales a desechar, ya sea en bolsas o contenedores para su recolección (Robles Hernández, 2004). Es crucial separar los residuos en el punto de generación para facilitar su reciclaje, destacándose la importancia de establecer medidas estrictas para garantizar que los generadores de residuos cumplan con las normativas de separación, especialmente para los materiales peligrosos.

2.1.3.2 Recolección

La recolección es una fase clave en la gestión adecuada de los residuos, ya que previene problemas como la contaminación del suelo y del agua, así como la obstrucción de desagües. Según Robles Hernández (2004), existen dos tipos principales: la recolección no selectiva, en la que los residuos se recogen sin separación previa, y la selectiva, que exige clasificarlos según su naturaleza, lo cual requiere una alta participación ciudadana. En Orizaba, por ejemplo, se han establecido días específicos: lunes, miércoles y viernes para residuos orgánicos y sanitarios, y martes, jueves y sábados para inorgánicos.

En cuanto a los métodos de recolección, el más común consiste en el uso de camiones, con o sin sistema de compactación. También existe el sistema neumático, usado en algunas zonas urbanizadas recientemente, que transporta los residuos a través de ductos subterráneos. No obstante, persiste la recolección informal, que representa un riesgo para la salud pública. Ante ello, el Ayuntamiento de Orizaba ha implementado sanciones, ya que esta práctica carece de medidas de protección y de disposición segura. Cabe destacar que la recolección no solo implica recoger los residuos, sino también su traslado a estaciones de transferencia, centros de reciclaje o rellenos sanitarios, lo cual se vuelve más complejo en ciudades de mayor tamaño.

2.1.3.3 Separación, procesamiento y transformación de los RSU

El proceso de separación, procesamiento y transformación de residuos sólidos inicia en los hogares o centros generadores de desechos, y se extiende a instalaciones especializadas como estaciones de transferencia y plantas de incineración. Este proceso incluye la segregación de objetos voluminosos, la clasificación por tamaño, la separación manual, la

trituration y la separación de materiales ferrosos, con el fin de reducir volumen y optimizar la gestión de residuos.

El reciclaje es crucial en este proceso, ya que permite transformar materiales como papel, cartón, vidrio, metales y PET en recursos reutilizables, reduciendo la demanda de materias primas, energía y agua. Por ejemplo, la reutilización del aluminio permite una reducción energética aproximada del 95% frente a su producción primaria. Sin embargo, en México, la tasa de reciclaje es baja, alcanzando solo el 9.6% de los residuos generados en 2012, mucho menos que los países de la OCDE, que reciclaron en promedio el 24% de sus residuos en el mismo año (SEMARNAT, 2024).

2.1.3.4 Transferencia y transporte

El proceso de transferencia y transporte de los RSU comprende tres etapas esenciales: primero, la transferencia de los residuos desde vehículos de recolección de menor capacidad a unidades de mayor tamaño; segundo, el transporte directo a las estaciones de transferencia o centros de reciclaje; y finalmente, el traslado de los residuos hacia los rellenos sanitarios.

En aquellas ciudades donde los rellenos sanitarios o sitios de disposición final se encuentran a distancias significativas de los núcleos urbanos, se establecen centros de transferencia. En estos, los camiones recolectores descargan los residuos en tractocamiones o tráileres, los cuales, a su vez, los transportan a los rellenos sanitarios. Por otro lado, en áreas urbanas de difícil acceso, especialmente en los centros urbanos, se emplean vehículos de menor tamaño para recoger los desechos, los cuales luego son depositados en camiones de mayor capacidad que los trasladan a los sitios de disposición final.

2.1.3.5 Disposición final de los residuos

De acuerdo con el Informe del Medio Ambiente (Gobierno de México, 2018), la disposición final de los residuos, último eslabón del ciclo de un sistema de RSU, es especialmente importante, ya que implica su confinamiento permanente en instalaciones diseñadas para evitar su dispersión y mitigar los posibles efectos negativos sobre los ecosistemas y la salud pública. Con respecto a esto, la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 regula las condiciones ambientales para la selección, diseño, construcción, operación,

monitoreo, clausura y obras complementarias de los sitios destinados a la disposición final de los RSU y de manejo especial. Estos sitios, conocidos como rellenos sanitarios, son infraestructuras que emplean técnicas de ingeniería para gestionar los residuos, utilizando métodos como la compactación y otras medidas para controlar su impacto ambiental. Sus beneficios se detallan en la Figura 2.5.



Figura 2.5 Beneficios de un relleno sanitario (Fuente: Gobierno del Estado de Veracruz & SEDEMA, 2024)

En el territorio nacional, no todas las entidades federativas cuentan con rellenos sanitarios propios, lo que obliga a algunas regiones a compartir estos espacios, generando desafíos adicionales para una gestión sostenible de los residuos. De acuerdo con Susunaga Miranda et al. (et al., 2022), según el nivel de control sobre RSU, que varía desde la falta total de infraestructura hasta procesos tecnológicos avanzados de cobertura sanitaria, estos lugares se agrupan en rellenos sanitarios, sitios de disposición final controlados y sitios de disposición final no controlados. Para estos últimos, tenemos el caso de los tiraderos a cielo abierto, los cuales representan graves amenazas para el entorno y salud de la población. La Figura 2.6 concentra los principales peligros asociados a estos sitios.



Figura 2.6 Riesgos de un tiradero a cielo abierto (Fuente: Gobierno del Estado de Veracruz & SEDEMA, 2024)

En el estado de Veracruz, la infraestructura actual comprende 17 rellenos sanitarios, de los cuales 12 están en operación y 5 en construcción; además, cuenta con 2 sitios controlados, 6 centros de transferencia (2 operativos y 4 en desarrollo) y 2 centros de compostaje. Esta red de instalaciones beneficia directamente a 99 municipios, consolidando el esfuerzo estatal en la gestión adecuada de los residuos sólidos urbanos (Gobierno del Estado de Veracruz & SEDEMA, 2024).

La Tabla 2.1 proporciona un desglose de la información mencionada. En ella se incluyen el municipio correspondiente, el nombre del sitio de disposición, el operador encargado, la categoría asignada (cuando corresponde), los usuarios que utilizan dichas instalaciones y su estado actual, especificando si se encuentran operativos o en etapa de construcción.

Por su parte, la Figura 2.7 muestra la distribución geográfica de dichos lugares, representados en un mapa que permite identificar su ubicación exacta en el estado.

Tabla 2.1 Sitios para la disposición final de RSU en Veracruz (Fuente: Adaptado de Gobierno del Estado de Veracruz & SEDEMA, 2024)

RELLENOS SANITARIOS						
Cvo	Municipio	Nombre	Operador	Categoría	Usuarios	Estado
1	Tampico Alto	Relleno Sanitario de Tampico Alto	H. Ayuntamiento de Tampico Alto	Tipo A	Tampico Alto	En operación
2	Pánuco	Relleno Sanitario de Pánuco	H. Ayuntamiento de Pánuco	Tipo B	Pánuco	En operación
3	Tamiahua	Relleno Sanitario de Tamiahua	H. Ayuntamiento de Tamiahua	Tipo D	Tamiahua	En operación
4	Tuxpan	Relleno Sanitario de Tuxpan "El Pitayo"	BCR Perforamax, S. de R.L. de C.V.	Tipo A	Tuxpan	En operación
5	Tihuatlán	Relleno Sanitario de Tihuatlán "El Cedro"	Discicar S.A. de C.V.	Tipo A	Poza Rica, Tihuatlán, Álamo Temapache, Coatzintla, Castillo de Teayo, Tantoyuca y Papantla.	En operación
6	Gutiérrez Zamora	Relleno Sanitario de Gutiérrez Zamora	Packing Soluciones Ecológicas S.A de C.V.	Tipo A	Nautla, Martínez de la Torre, Gutiérrez Zamora y Tecolutla	En operación
7	Alto Lucero de Gutiérrez Barrios	Relleno Sanitario de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde	Central Nucleoeléctrica CFE (particular)	Tipo D	Particular	En operación
8	Xalapa	Relleno Sanitario de Xalapa "El Tronconal"	H. Ayuntamiento de Xalapa	Tipo A	Xalapa y Emiliano Zapata	En operación
9	Nogales	Relleno Sanitario de las Altas Montañas	Materiales Oconit S.A. de C.V.	Tipo C	Acultzingo, Amatlán de los Reyes, Aquila, Astacinga, Atlahuilco, Atoyac, Atzacan, Calcahualco, Camerino Z. Mendoza, Chocamán, Coetzala, Córdoba, Coscomatepec, Cuichapa, Cuicláhuac, Fortín, Huatusco, Ixhuatlán del Café, Ixhuatlancillo, Ixtaczoquitlán, La Perla, Los Reyes, Magdalena, Maltrata, Mariano Escobedo, Naranjal, Nogales, Orizaba, Rafael Delgado, Río Blanco, San Andrés Tenejapan, Sochiapa, Soledad Atzompa, Tehuipango, Tenampa, Tepatlaxco, Tequila, Texhuacán, Tlilapan, Tomatlán, Yanga y Zongolica	En operación
10	Medellín	Relleno Sanitario de Medellín "El Guayabo"	Prever S.A. de C.V.	Tipo A	Boca del Río, Carrillo Puerto, Cotaxtla, Medellín, Omealca, Tlalixcoyan y Veracruz	En Operación
11	Cosamaloapan de Carpio	Relleno Sanitario de Cosamaloapan	Procuraduría Estatal de Protección al Medio Ambiente	Tipo C	Cosamaloapan de Carpio, Oatitlán, Tlacojalpan, Tuxtilla, Chacaltianguis, Acula, Ixmatalhuacan, Amatitlán, Carlos A. Carrillo, Tierra Blanca	En Operación
12	Playa Vicente	Relleno Sanitario de Playa Vicente	H. Ayuntamiento de Playa Vicente	Tipo D	Playa Vicente	En Operación

RELLENOS SANITARIOS						
Cvo	Municipio	Nombre	Operador	Categoría	Usuarios	Estado
13	Oluta	Relleno Sanitario de Oluta	Procuraduría Estatal de Protección al Medio Ambiente	Tipo A	Pendiente	En construcción
14	Tantoyuca	Relleno Sanitario de Tantoyuca	Procuraduría Estatal de Protección al Medio Ambiente	Pendiente	Pendiente	En construcción
15	Tihuatlán	Relleno Sanitario de Tihuatlán	Discricar S.A. de C.V.	Tipo A	Pendiente	En construcción
16	Villa Aldama	Relleno Sanitario de Villa Aldama	Packing Soluciones Ecológicas S.A de C.V.	Tipo A	Pendiente	En construcción
17	San Andrés Tuxtla	Relleno Sanitario de San Andrés Tuxtla	Cárdenas Meneses Constructores S.A. de C.V.	Tipo B	Pendiente	En construcción
CENTROS DE TRANSFERENCIA						
1	Tuxpan	Centro de Transferencia de Tuxpan	Procuraduría Estatal de Protección al Medio Ambiente	/	Pendiente	En construcción
2	Papantla	Centro de Transferencia de Papantla	Procuraduría Estatal de Protección al Medio Ambiente	/	Pendiente	En construcción
3	Martínez de la Torre	Centro de Transferencia de Martínez de la Torre	Procuraduría Estatal de Protección al Medio Ambiente	/	Pendiente	En construcción
4	Veracruz	Centro de Transferencia de Veracruz	Prever S.A. de C.V.	/	Pendiente	En operación
5	Ángel R. Cabada	Centro de Transferencia de Ángel R. Cabada	Procuraduría Estatal de Protección al Medio Ambiente	/	Pendiente	En Operación
6	Juan Rodríguez Clara	Centro de Transferencia de Juan Rodríguez Clara	Procuraduría Estatal de Protección al Medio Ambiente	/	Pendiente	En construcción
SITIOS CONTROLADOS						
1	San Andrés Tuxtla	Sitio Controlado de San Andrés Tuxtla	Cárdenas Meneses Constructores S.A. de C.V.	/	San Andrés Tuxtla, Catemaco, Santiago Tuxtla, Ángel R. Cabada y Juan Rodríguez Clara	En operación
2	Altotonga	Sitio Controlado de Altotonga	Packing Soluciones Ecológicas S.A de C.V.	/	Altotonga, Villa Aldama, Tlapacoyan, Atzacan, Jalacingo, Perote, Ayahualulco, Acajete, Rafael Lucio, Banderilla, S.A. Tlahelhuayocan, Coatepec, Xico, Teocelo, Las Vigas.	En operación
CENTROS DE COMPOSTAJE						
1	Minatitlán	Centro de Compostaje Minatitlán	H. Ayuntamiento de Minatitlán	/	Minatitlán	En Operación
2	Coatzacoalcos	Centro de Compostaje Coatzacoalcos	H. Ayuntamiento de Coatzacoalcos	/	Coatzacoalcos	En Operación

En la actualidad, la ciudad de Orizaba se encuentra abocada al desarrollo de estrategias dirigidas a reducir la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) por parte de su población. Esto se debe a que la capacidad del relleno sanitario de las Altas Montañas está siendo alcanzada, y la opción de utilizar otro sitio de disposición conlleva elevados costos logísticos, además de un mayor impacto ambiental.

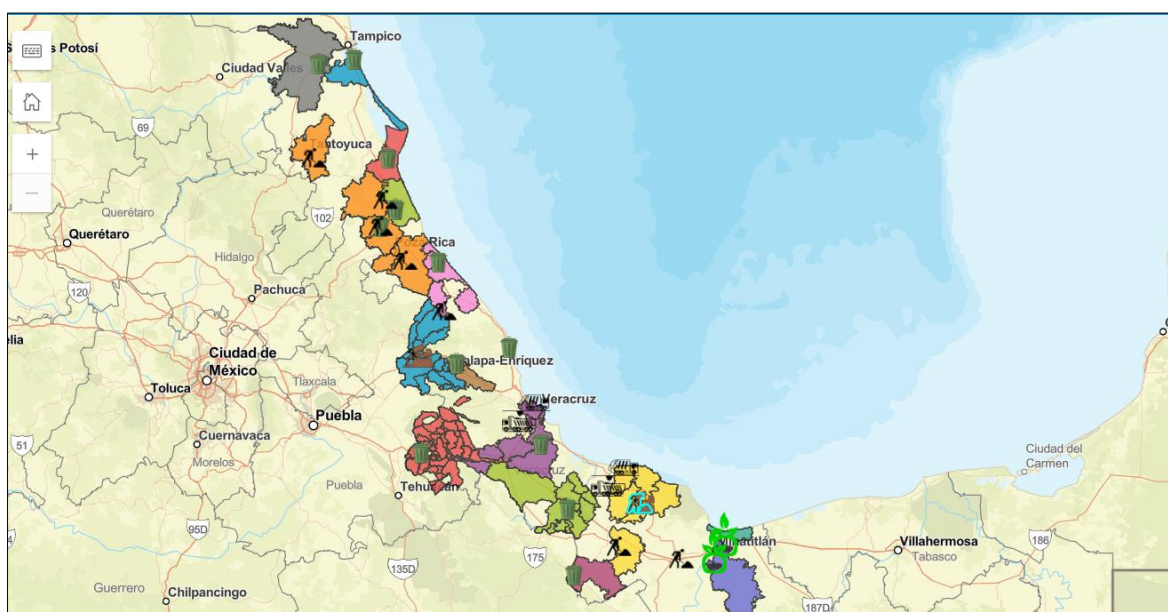


Figura 2.7 Distribución geográfica de sitios de disposición final de RSU en Veracruz (Fuente: Gobierno del Estado de Veracruz & SEDEMA, 2024)

2.1.4 Plantas recicladoras

Las plantas recicladoras son instalaciones diseñadas para la recuperación y transformación de materiales reciclables provenientes de los RSU. Su principal objetivo es convertir estos desechos en materias primas reutilizables que puedan reintegrarse a procesos productivos, favoreciendo la economía circular y mitigando los efectos negativos del manejo inadecuado de estos. En México, aunque se han dado avances significativos en la implementación de estas plantas, persisten retos relacionados con la separación de residuos desde su origen y la educación ambiental.

2.1.4.1 Importancia ambiental y económica

Las plantas recicladoras desempeñan un papel crucial en la protección ambiental y el desarrollo económico sostenible. Por un lado, disminuyen el volumen de residuos enviados

a rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto, mitigando la contaminación del suelo, agua y aire. Por otro, contribuyen a la reducción de la demanda de materias primas vírgenes, así como al ahorro de energía y agua en los procesos de producción. Además, estas plantas promueven la generación de empleos y fomentan una mayor conciencia ambiental entre la población.

2.1.4.2 Proceso operativo de una planta recicladora

El funcionamiento de las plantas recicladoras comprende diversas etapas que aseguran el procesamiento eficiente de los materiales:

1. **Recepción de residuos:** se realiza la recepción de los materiales reciclables, que pueden provenir de sistemas de recolección selectiva, centros de acopio o programas de reciclaje comunitario.
2. **Separación y clasificación:** los residuos son segregados manual o mecánicamente según su tipo, como plásticos, metales, papel o vidrio. Esta etapa puede incluir el uso de equipos como bandas transportadoras, imanes para metales férreos y sistemas de aire para separar plásticos ligeros.
3. **Limpieza:** los materiales son sometidos a procesos de lavado para eliminar impurezas como grasas, adhesivos o residuos orgánicos.
4. **Trituración y compactación:** los residuos son triturados o compactados para reducir su volumen y facilitar su almacenamiento y transporte.
5. **Almacenamiento:** finalmente, los materiales procesados se almacenan en condiciones óptimas hasta que son enviados a industrias especializadas para su reutilización.

2.1.4.3 “ECORI”: Planta de separación de residuos sólidos Orizaba

La planta ECORI, mostrada en la Figura 2.8, representó una inversión municipal de cerca de 15 millones de pesos y opera con tecnología de bandas transportadoras de Geocycle, procesando hasta 30 toneladas de basura al día, de lunes a sábado (Ayuntamiento de Orizaba, 2021). Desde su inauguración, ha tratado 20,869 toneladas de residuos, evitando su envío a rellenos sanitarios y generando un ahorro estimado de 20 millones de pesos. Del total procesado, el 51.5% se ha convertido en combustible para una empresa, lo que refuerza el

compromiso ambiental y económico del municipio. Gracias a esta iniciativa, Orizaba se ha consolidado como referente nacional en gestión de residuos y es el único municipio del sur del país reconocido como “Amigo del medio ambiente”, alineado con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

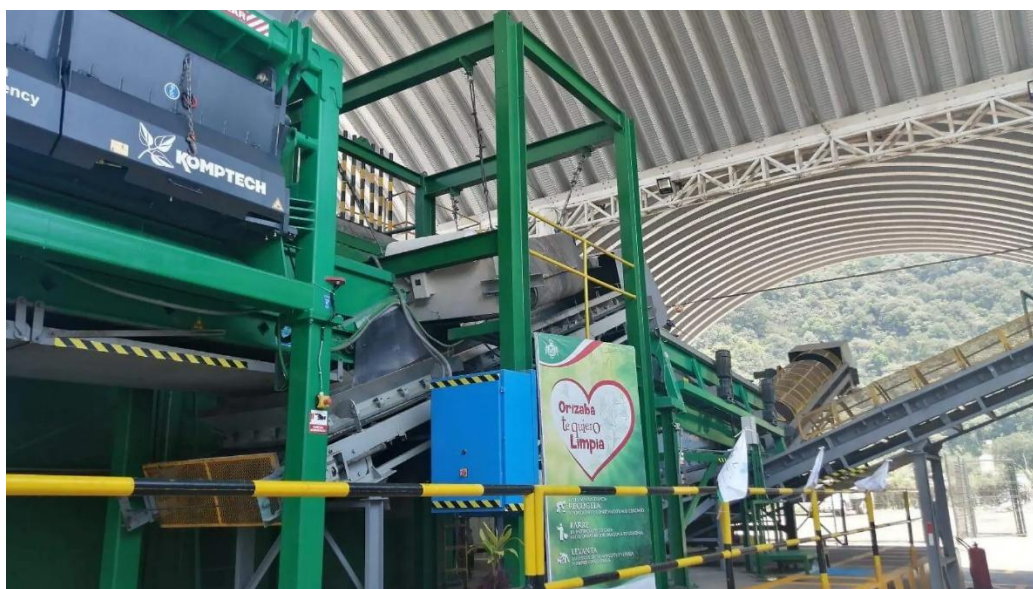


Figura 2.8 Planta ECORI (Fuente: El Sol de Orizaba, 2023)

2.2 Marco normativo mexicano para la gestión de residuos urbanos

El marco normativo mexicano para la gestión de residuos urbanos está regido por diversas leyes, reglamentos y normas oficiales que buscan garantizar una adecuada recolección, tratamiento, disposición y aprovechamiento de los residuos sólidos, promoviendo la protección del medio ambiente y la salud pública. Dicho marco también impulsa la colaboración entre ciudadanía, autoridades gubernamentales y sectores industriales bajo un enfoque de responsabilidad compartida. La Tabla 2.2 concentra las principales disposiciones, así como la descripción de su función.

2.3 Sistema de recolección de RSU en la ciudad de Orizaba, Veracruz

Contar con un personal adecuado para el sistema de recolección de RSU es, sin lugar a dudas, uno de los aspectos más cruciales. En la ciudad de Orizaba, Veracruz, se dispone de un sistema complejo que divide la ciudad en 13 rutas con tres tipos principales de recolección.

Tabla 2.2 Marco normativo mexicano respecto a la gestión de RSU (Fuente: Elaboración propia)

Nombre de la Ley o Norma	¿Qué regula?	Fuente de consulta
Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)	Establece los principios y lineamientos para la prevención, gestión y disposición final de residuos sólidos urbanos, fomentando su valorización, reciclaje y manejo integral.	(Diario Oficial de la Federación, 2003a)
Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003	Regula la operación de sitios de disposición final, como rellenos sanitarios, asegurando el manejo seguro de residuos para evitar riesgos ambientales y a la salud pública.	(Diario Oficial de la Federación, 2003b)
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	Proporciona un marco general para la protección del medio ambiente, incluyendo la gestión de residuos como parte de estrategias para prevenir la contaminación.	(Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 1998)
Reglamentos Estatales y Municipales	Regulan de forma local la recolección, separación, reciclaje y disposición de residuos, adaptándose a las necesidades específicas de cada región o localidad.	Gobiernos estatales y municipales.
Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (PNPGIR)	Promueve políticas y acciones coordinadas entre los niveles de gobierno, industria y ciudadanía para optimizar el manejo de residuos y fomentar la economía circular.	(Diario Oficial de la Federación, 2022)
Agenda 2030 y Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	Aunque no es una ley, establece compromisos internacionales adoptados por México, como el ODS 12, para garantizar patrones de producción y consumo responsables, incluyendo la gestión de residuos.	(Organización de las Naciones Unidas, 2015)

El primero opera en horario nocturno, conocido como SERENO. Está destinado a la recolección de RSU domiciliarios, con días asignados para orgánicos, inorgánicos y sanitarios. El segundo corresponde a los Servicios Especializados, operando en turnos matutinos y vespertinos, dirigidos a comercios y servicios particulares. Estos clientes pagan una cuota anual y reciben atención personalizada de lunes a domingo. Debido a la diversidad de residuos que generan, no se asignan días por tipo de desecho; en su lugar, los negocios se agrupan por zonas y se asigna un vehículo específico para cada una. El tercer servicio, es el barrido manual, organizado por cuadrillas denominadas *hormigas*, *barridos* y *abejas*, las cuales tienen tareas de limpieza específicas. Por ejemplo, la cuadrilla abejas está integrada por adultos mayores encargados de tareas de jardinería y limpieza en áreas específicas de la ciudad.

2.4 Pruebas de Bondad de Ajuste

Gutiérrez González y Vladimirovna Panteleeva (2016) destacan que un reto inicial en la investigación es verificar que los datos recolectados cumplan con las condiciones necesarias para estimar parámetros. Para ello, se utilizan Pruebas de Bondad de Ajuste, que son pruebas de hipótesis estadísticas que evalúan qué tan bien los datos se ajustan a una distribución conocida (Ruiz, 2010). Entre las más comunes se encuentran las pruebas Ji-Cuadrada, Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling (Wapole et al., 2012), detalladas en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Principales pruebas de bondad de ajuste (Fuente: Elaboración propia)

Prueba	Propósito		Limitaciones
Ji cuadrada (χ^2)	Se trata de comparar un histograma construido con datos reales con la función de densidad o masa de una distribución teórica conocida.	$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$ En donde: O_i = Valor observado E_i = Valor esperado	Menos precisa con tamaños de muestra pequeños o datos con bajas frecuencias; sensible al agrupamiento.
Kolmogorov - Smirnov (K-S)	Establece una comparación entre la función de distribución empírica ($F_n(x)$) obtenida a partir de datos observados, y una función de distribución teórica ($F^*(x)$) propuesta como hipótesis.	$D^+ = \max \{i/n - F^*(X_i)\}$ $D^- = \max \{F^*(X_i) - (i-1)/n\}$ $D = \max \{D^+, D^-\}$ $F^*(X_i)$ = Es la función de distribución teórica hipotetizada.	Menos sensible en los extremos, no adecuada para distribuciones con parámetros estimados.
Anderson - Darling (A-D)	Es similar a la prueba K-S ya que compara una función distribución tomada a partir de datos reales ($F_n(x)$) con una función de distribución teórica hipotetizada ($F(x)$), pero dando mayor peso a los extremos de la distribución.	$A^2 = -n \left[-\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(2i-1) * (\ln F(x_i) + \ln(1 - F(x_{n+1-i})))] \right]$	Requiere cálculos más complejos. Tablas críticas específicas por distribución.

2.5 Distribuciones de probabilidad

Bacchini et al. (2018) mencionan que la distribución de probabilidades de una variable aleatoria es el conjunto de todos los valores que puede tomar la misma y sus respectivas probabilidades y, en función de la naturaleza de las variables, se distinguen dos tipos: continuas y discretas (Zuñiga López et al., 2012).

2.5.1 Distribuciones continuas

Las distribuciones continuas describen variables aleatorias que pueden tomar infinitos valores dentro de un intervalo. En lugar de asignar probabilidades a valores exactos, se asignan a intervalos, ya que la probabilidad de un valor específico es cero. Estas distribuciones se modelan con funciones de densidad, cuya integral en un intervalo dado representa la probabilidad de que la variable esté dentro de ese rango. Algunos ejemplos comunes se incluyen en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Principales distribuciones de probabilidad continuas (Fuente: Elaboración propia)

Distribución	Características	Función de densidad
Normal	La representación gráfica de esta distribución se conoce como "curva normal", y su rasgo distintivo es su forma de campana Wapole et al. (2012). Sus parámetros son la media (μ) y la desviación estándar.	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$
Gama Y Exponencial	La distribución exponencial, como caso especial de la gamma, es clave en teoría de colas y confiabilidad, modelando tiempos entre llegadas y fallos en sistemas. Por su relación, la distribución gamma se aplica a problemas similares.	Función Gamma $\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx, \text{ para } \alpha > 0$
		Función exponencial $f(x; \beta) = \begin{cases} \frac{1}{\beta} e^{-x/\beta}, & x > 0 \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$
Ji-Cuadrada (χ^2)	Esencial en pruebas de hipótesis y estimación estadística como análisis de varianza y métodos estadísticos no paramétricos (Wapole et al., 2012). Posee un único parámetro, ν , llamado grados de libertad.	$f(x; \nu) = \begin{cases} \frac{1}{2^{\nu/2} \Gamma(\nu/2)} x^{\nu/2-1} e^{-x/2}, & x > 0 \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$

Distribución	Características	Función de densidad
Logarítmica normal	Se utiliza cuando, al aplicar el logaritmo natural a los datos, estos siguen una distribución normal. Es aplicable en campos como la economía, biología e ingeniería, para modelar fenómenos con variabilidad multiplicativa, como los precios financieros o los tamaños de partículas.	$f(x; \mu, \sigma) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}[\ln(x) - \mu]^2}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$
Weibull	Propuesta en 1939 por el físico sueco Waloddi Weibull, se emplea en la resolución de problemas vinculados a fallas de materiales y análisis de confiabilidad (Rodríguez Ojeda, 2007).	$f(t) = \frac{\beta(t - \delta)^{\beta-1}}{\theta^\beta} \exp\left[-\left(\frac{t - \delta}{\theta}\right)^\beta\right], t \geq \delta$ Donde: <i>t</i>: tiempo entre fallas $(0 < \beta < \infty)$ $(0 < \theta < \infty)$ $(-\infty < \delta < \infty)$

2.5.2 Distribuciones discretas

Una distribución discreta determina la probabilidad de que se observe cada valor de una variable aleatoria, la cual toma valores contables, como una secuencia de números enteros no negativos (Minitab, 2024). En este contexto, Mendenhall et al. (2006) mencionan que la distribución de probabilidad de una variable aleatoria discreta se representa mediante una fórmula, tabla o gráfica que indica los posibles valores de *x* junto con la probabilidad *p(x)* correspondiente a cada uno de ellos. La Tabla 2.5 describe las más utilizadas.

Tabla 2.5 Principales distribuciones de probabilidad discretas (Fuente: Elaboración propia)

Distribución	Características	Fórmula
Uniforme	Una variable aleatoria sigue una distribución discreta uniforme cuando todos los resultados de su espacio muestral tienen la misma probabilidad de ocurrir (Rodríguez Ojeda, 2007)	$P(X = x) = \frac{1}{n}$

Distribución	Características	Fórmula
Binomial	La distribución binomial está asociada con el Experimento de Bernoulli, que consiste en un número fijo n de ensayos idénticos, donde la probabilidad de éxito en cada prueba es constante y se denota por p .	$P(x) = {}_nC_x p^x q^{n-x}$
Hipergeométrica	Aunque comparte similitudes con la distribución binomial, la principal diferencia entre ambas radica en el tipo de muestreo, ya que la distribución hipergeométrica no requiere independencia y se basa en un muestreo sin reemplazo.	$h(x; N, n, K)$ $= \frac{{}^k_x {}^{N-1}_{n-x}}{N}$ $\begin{matrix} \text{máx} \{0, n - (N - K)\} \\ \leq x \leq \\ \text{mín} \{n, K\} \end{matrix}$ K: número de éxitos N-1 número de fracasos
Poisson	Modelo estadístico utilizado para estimar la probabilidad de que se alcancen una cantidad determinada de "éxitos" dentro de una región específica o durante un intervalo de tiempo determinado, siempre que se conozca la tasa promedio de ocurrencia de dichos "éxitos" (Rodríguez Ojeda, 2007).	$P(X) = \frac{\lambda^x * e^{-\lambda}}{x!}$

2.6 Simulación

La simulación es una forma de replicar la realidad con fines diversos, siendo especialmente útil en la enseñanza, el entrenamiento y la investigación (Texson, 2005).

“Simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos periodos de tiempo” (Naylor, 1975).

Lo anterior puede abarcar desde modelos físicos simples hasta plataformas computacionales de alta complejidad. En sentido más estricto, simulación se define como:

“... una técnica numérica para realizar experimentos en una computadora digital. Estos experimentos involucran ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos que describen el comportamiento de sistemas de negocios, económicos, sociales, biológicos, físicos o químicos a través de largos periodos de tiempo” (Coss Bu, 2015).

Considerando lo anterior, se puede decir que la simulación es una técnica que permite replicar en un entorno computacional el comportamiento de un sistema real o hipotético bajo condiciones específicas. Su aplicación requiere la formulación previa de un modelo conceptual formal, el cual se codifica en una plataforma de simulación para realizar experimentos y analizar el desempeño del sistema (Guasch et al., 2003).

2.6.1 Clasificación de los modelos de simulación

De acuerdo con el trabajo de Ortega Ortiz (2020), los modelos de simulación pueden clasificarse de diversas maneras dependiendo del criterio aplicado. Sin embargo, en el ámbito de la ingeniería industrial y de sistemas, los modelos más comunes son los siguientes:

- **Modelo Discreto:** las variables cambian en puntos específicos y son contables. Se enfoca en analizar la secuencia cronológica de eventos dentro del sistema.
- **Modelo Continuo:** se experimentan cambios constantes a lo largo del tiempo.
- **Modelo Dinámico:** las variables del modelo varían en función del tiempo.
- **Modelo Probabilístico:** incluye variables aleatorias definidas mediante una función de probabilidad.
- **Modelo Determinístico:** posee variables cuya información es conocida con certeza.

2.6.2 Ventajas y desventajas de la simulación

La simulación es una herramienta clave para la toma de decisiones, ya que permite analizar y predecir el comportamiento de sistemas complejos. Su valor se ha incrementado con el desarrollo de software y tecnologías cada vez más avanzadas y útiles. Sin embargo, tomando en cuenta lo expuesto por Cruz García (2023), la simulación presenta tanto ventajas como desventajas en su aplicación, las cuales se analizan a continuación.

2.6.2.1 Ventajas

- La simulación es una gran herramienta de análisis disponible para la mayoría de los sistemas reales, ya que no pueden ser descritos mediante modelos matemáticos.
- Permite crear múltiples escenarios y seleccionar aquel que proporcione los mejores resultados.
- Facilita el estudio de las interacciones entre los componentes de sistemas complejos.

- Brinda la posibilidad de modificar fácilmente la información, la estructura organizativa o las condiciones del entorno en el modelo.

2.6.2.2 Desventajas

- Crear un modelo de simulación en el software seleccionado puede consumir una cantidad significativa de tiempo.
- Es necesario contar con equipos computacionales avanzados y recursos humanos especializados, lo cual implica costos elevados.
- La alta dirección de una organización podría tener dificultades para comprender las técnicas utilizadas, lo que podría complicar la interpretación de los resultados.

2.6.3 Metodología de la simulación

El éxito de una simulación a menudo radica en la correcta aplicación de una metodología, donde cada etapa desempeña un papel fundamental. Dentro de las más utilizadas destaca el enfoque planteado por Law & Kelton (2007), que consta de 10 pasos:

1. **Formulación del problema:** en esta fase se definirán los objetivos que se buscan alcanzar, así como el plan detallado para su desarrollo.
 2. **Recopilación de datos y definición del modelo:** la recopilación de datos precisos y confiables del sistema real es esencial para construir un modelo de simulación representativo. Estos datos deben ser verificados mediante pruebas de bondad de ajuste y asociarse con la distribución de probabilidad adecuada. Además, el sistema debe modelarse utilizando diagramas de flujo o descripciones detalladas del analista.
 3. **Validación del modelo conceptual:** en esta etapa, se verificará que el modelo conceptual refleje adecuadamente las características y dinámicas del sistema real.
 4. **Construcción y verificación del modelo:** utilizando software especializado en simulación, se procederá a la construcción del modelo del sistema real. Es importante evitar un nivel de detalle excesivo, buscando un equilibrio entre la fidelidad al sistema y la simplicidad necesaria para la simulación.
 5. **Ejecución de pruebas piloto:** construido el modelo de simulación, se realizarán pruebas piloto para comprobar que el modelo opera de manera similar al sistema real.
-

6. **Validación del modelo programado:** en esta fase, se llevará a cabo una prueba de validación, comparando los resultados del modelo con datos del sistema real. El objetivo es garantizar que el modelo de simulación proporcione resultados estadísticamente consistentes con los datos observados en el entorno real.
7. **Diseño de experimentos:** se determinará el número óptimo de corridas del modelo necesarias para obtener resultados estadísticamente significativos. Asimismo, se explorarán posibles alternativas que puedan mejorar el desempeño del sistema real, identificando áreas para optimizar.
8. **Ejecución de simulaciones:** se procederá a ejecutar el número óptimo de corridas, como se determinó en el paso anterior. Durante este proceso, se registrarán los datos de salida correspondientes a los parámetros de interés que se desean analizar.
9. **Análisis de los datos de salida:** los datos obtenidos del paso anterior serán sometidos a un análisis estadístico para proporcionar una visión profunda de las dinámicas del sistema real, permitiendo una comprensión más precisa de su funcionamiento.
10. **Documentación e implementación de resultados:** finalmente, se documentarán las propuestas de mejora derivadas del análisis, realizando los ajustes pertinentes al modelo. Esto se registrará para evaluar su impacto y comparar la situación actual del sistema con los resultados obtenidos tras la implementación de las mejoras propuestas. La Figura 2.9 resume lo anterior.

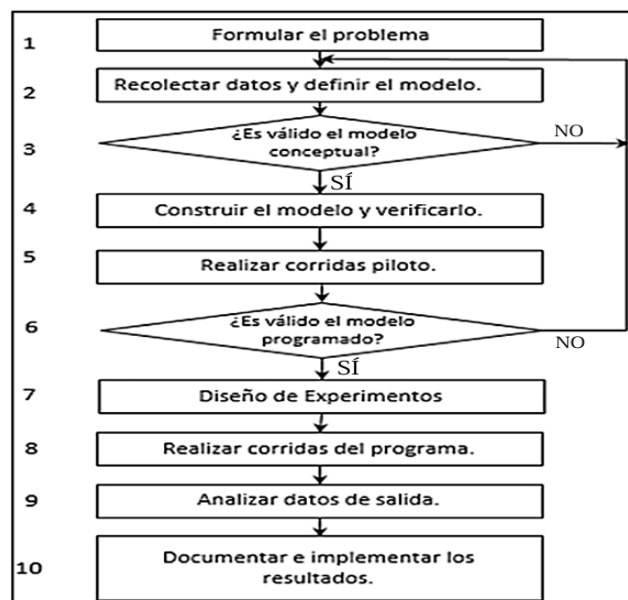


Figura 2.9 Metodología de Simulación (Fuente: Law & Kelton, 2007)

2.6.4 Verificación y validación del modelo de simulación

La construcción de un modelo de simulación requiere garantizar que este reproduzca fielmente el comportamiento del sistema real implicando dos pasos fundamentales: la verificación y la validación del modelo. Para Moras Sánchez (2020), la verificación consiste en asegurarse de que el programa de simulación implementado en el sistema computacional funcione conforme a lo previsto, verificando que la traducción del modelo conceptual (como diagramas de flujo y supuestos) al entorno computacional sea precisa. En cuanto a la validación, se trata de confirmar que los resultados generados por el programa sean estadísticamente equivalentes a los datos observados en el sistema real.

Para esta última se emplean métodos como la prueba t-pareada, la cual compara los datos de salida del modelo con los datos reales obtenidos (Ortega Ortiz, 2020) o el MSE (Error Cuadrático Medio), entre otros. Dada la relevancia de la prueba estadística mencionada, enseguida se detalla su procedimiento de aplicación.

2.6.5 Prueba t-pareada

De acuerdo con Moras Sánchez (2020), para el desarrollo de la prueba t-pareada se asume que se obtienen m conjuntos de datos independientes provenientes del sistema real y n conjuntos de datos generados por el modelo de simulación. Sea X_j el promedio de las observaciones en el j –ésimo conjunto del sistema real y Y_j el promedio de las observaciones en el j –ésimo conjunto del modelo. Las X_j son variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas (IID) con una media $\mu_x = E(Y_j)$, mientras que las Y_j también son variables aleatorias IID, bajo el supuesto de que los n conjuntos de datos provienen de réplicas independientes del modelo, con una media $\mu_x = E(Y_j)$. En este contexto, el objetivo del análisis será contrastar el modelo con el sistema real mediante la construcción de un intervalo de confianza para la Ecuación 2.1:

$$Z = \mu_x - \mu_y \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Nota: Usando la prueba t-pareada se requiere que $m = n$

Para aplicar esta prueba se deben considerar las hipótesis de la Ecuación 2.2 y la Ecuación 2.3:

$$H_0: \mu_X = \mu_Y \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$$H_1: \mu_X \neq \mu_Y \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Durante la evaluación, se rechaza la hipótesis nula si el intervalo de confianza no incluye el cero, lo que indica una diferencia significativa entre medias y, por tanto, invalida el modelo. Si el intervalo contiene el cero, la diferencia no es significativa y no se rechaza la hipótesis nula. De la Ecuación 2.4 a la Ecuación 2.6 se presentan las fórmulas necesarias para aplicar la prueba t-pareada:

$$Z_j: X_j - Y_j \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$\bar{Z}_{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_j}{n} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

$$\hat{Var}[\bar{Z}_{(n)}] = \frac{\sum_{j=1}^n [Z_j - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n(n-1)} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Para determinar el intervalo de confianza al nivel de significancia ($100(1 - \alpha)\%$), se emplea la fórmula de la Ecuación 2.7:

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\hat{Var}[\bar{Z}_{(n)}]} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

2.6.6 Determinación del número de corridas óptimas del modelo

La fórmula utilizada para determinar el número óptimo de corridas se presenta en la Ecuación 2.8:

$$n * (\beta) = \min \left\{ i \geq n: t_{i-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S^2(n)}{i}} \leq \beta \right\} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Se recomienda iniciar con un valor para el error absoluto β del 5% de la media obtenida para cada medida de desempeño o variable de interés. Este enfoque tiene como objetivo garantizar que el valor de β sea inferior a la desviación estándar previamente calculada, logrando una mayor precisión en los resultados del modelo.

2.7 Simulation Modelling Based on Intelligent Objects (Simio)

Simio es un software para Windows diseñado para la modelización, simulación y animación 3D de sistemas mediante eventos discretos. Su interfaz moderna y basada en estándares intuitivos lo hace fácil de usar, y su enfoque mixto combina objetos y procedimientos, lo que lo vuelve altamente flexible y adaptable a diversas industrias.

Este es especialmente útil para analizar y gestionar sistemas de colas, donde materiales, equipos o personas esperan para recibir un servicio o realizar una actividad debido a recursos ocupados. Además, Simio se aplica en sistemas con flujos de materiales, personas o información, como el diseño de layouts en fábricas, la gestión de recursos en hospitales, la optimización de operaciones en aeropuertos y puertos, y la mejora de medidas de desempeño en empresas de servicios, consolidándose como una herramienta versátil y esencial en múltiples sectores (Simio Simulación ES, 2025).

2.7.1 Características principales de Simio:

Entre las principales características que destacan este software se encuentran:

1. **Interfaz visual e intuitiva:** basada en objetos gráficos y programación orientada a eventos, facilitando el diseño y personalización de los modelos.
2. **Flexibilidad:** permite modelar sistemas con características dinámicas y complejas, integrando elementos como recursos compartidos, restricciones y dependencias.
3. **Simulación y análisis:** ofrece capacidad para realizar simulaciones tanto determinísticas como estocásticas, incluyendo soporte para variables probabilísticas y experimentos de sensibilidad.
4. **Optimización:** integra herramientas de optimización que ayudan a identificar configuraciones óptimas para maximizar la eficiencia, minimizar costos o mejorar otros indicadores clave de desempeño.
5. **3D y animación:** proporciona visualización tridimensional en tiempo real, lo que facilita la interpretación y validación del modelo.
6. **Integración:** es compatible con otros sistemas y herramientas, como bases de datos, software ERP, y plataformas de análisis.

2.7.2 Elementos básicos de Simio

Los programas de simulación están provistos de objetos o elementos que posibilitan la creación de una diversidad de modelos. En este sentido, Simio ofrece una versión académica que brinda acceso a todos los elementos fundamentales de su biblioteca, los cuales se detallan en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Biblioteca Simio (Fuente: Adaptado de Cruz García, 2023)

Nombre	Símbolo	Descripción
Source		Crea entidades de diversos tipos.
Sink		Elimina las entidades que han completado su proceso o uso dentro del modelo.
Server		Permite modelar operaciones como tiempos de proceso o secuencias de tareas, con la opción de incluir recursos secundarios o materiales necesarios.
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 crear nuevas al concluir el proceso y dejar de emplear las copias de estas.
Resource		Se usa en el modelo para imponer una restricción mediante una capacidad que puede ser asignada y posteriormente liberada por otro objeto.
Vehicle		Se utiliza para trasladar entidades entre nodos y, bajo demanda, movilizar recursos desde un punto de transporte nulo mediante lógica de proceso.
Worker		Es un objeto móvil que puede ser asignado y liberado durante las tareas del proceso. Además, un trabajador puede emplearse para trasladar entidades entre distintos nodos.
BasicNode		Es utilizado por una entidad para acceder o salir de un objeto, además de servir para establecer puntos de intersección.
TransferNode		Este nodo define puntos de intersección en una red y permite seleccionar el destino de la entidad, aplicando la lógica de transporte.
Connector		Su función principal es establecer una dirección sin distancias entre un nodo de ubicación y otro.
Path		Se puede utilizar para definir una trayectoria entre dos nodos, donde el tiempo de viaje está determinado por las dimensiones del recorrido y la velocidad de la entidad.
TimePath		Se emplea para establecer el trayecto entre dos nodos, donde el tiempo es determinado por el usuario.
Conveyor		Se puede utilizar para trasladar entidades entre dos nodos, empleando una acumulación o sin ninguna en este proceso.

2.8 Algoritmo del Agente Viajero (TSP)

El Problema del Agente Viajero (TSP, por sus siglas en inglés: Travelling Salesman Problem) se enmarca como un problema de optimización combinatoria compleja (López et al., 2014), donde se busca determinar un recorrido que permita visitar cada ciudad exactamente una vez y regresar al punto de origen. Anaya Fuentes et al. (2016) mencionan que el objetivo principal radica en determinar la trayectoria que minimice la distancia total, conocida como la ruta óptima, aplicándose tanto en procesos que demandan una secuencia específica como en configuraciones logísticas que integran elementos de transporte, buscando la solución más eficiente en términos de distancia recorrida o costos asociados (Fuentes Penna, 2014).

2.8.1 Descripción del problema del agente viajero

El TSP se formula de la siguiente manera: dado un entero $n > 0$ y las distancias entre cada par de n ciudades, representadas en una matriz (d_{ij}) de dimensiones $n \times n$, donde d_{ij} es un valor entero no negativo, el objetivo es determinar un recorrido que visite cada ciudad exactamente una vez, minimizando la longitud total del trayecto (López et al., 2014).

Una permutación π cíclica representa un recorrido, si se interpreta $\pi(j)$ como la ciudad después de la ciudad j , $j = 1, 2, \dots, n$. Así, el costo del recorrido estará dado por la Ecuación 2.9:

$$\sum_{j=1}^n d_{j\pi(j)} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

2.8.2 Métodos para resolver el TSP

El Problema del Agente Viajero puede resolverse mediante distintas estrategias, las cuales se eligen en función de los objetivos del análisis y las limitaciones computacionales. Pérez de Vargas Moreno (2015) menciona que, desde la década de 1950, se han desarrollado diversos métodos de resolución, los cuales se agrupan en dos grandes categorías: algoritmos exactos y algoritmos aproximados. Para el caso de los primeros, estos se apoyan en modelos matemáticos rigurosos para encontrar la solución óptima, teniendo como principal limitante el elevado tiempo de cómputo requerido, que aumenta exponencialmente con el número de

ciudades o clientes, dificultando su aplicabilidad en problemas de gran escala (Fuentes Penna, 2014). Por lo que respecta a los segundos, estos métodos emplean técnicas iterativas para mejorar progresivamente la solución, ofreciendo soluciones suficientemente buenas en tiempos de ejecución mucho menores, al incluir heurísticas y metaheurísticas. En ese orden de ideas, enseguida se detalla lo anterior para una mejor comprensión.

2.8.2.1 Métodos de aproximación exacta

También denominados algoritmos óptimos, buscan descartar conjuntos completos de soluciones no viables para acelerar el proceso de búsqueda, aunque pueden requerir más tiempo de cómputo. Su objetivo es explorar todas las soluciones posibles, cumpliendo con restricciones como capacidad de vehículos, tiempo de operación y distancia máxima recorrida (Lüer et al., 2009).

2.8.2.2 Métodos heurísticos

Las técnicas heurísticas son herramientas computacionales eficaces para resolver problemas de gran escala, ya que permiten generar soluciones de buena calidad en tiempos reducidos al evitar la búsqueda exhaustiva. Aunque no aseguran encontrar la solución óptima, su principal ventaja radica en la exploración limitada pero eficiente del espacio de soluciones, construyendo alternativas viables orientadas a minimizar costos. Estos métodos pueden clasificarse según su estrategia de construcción y mejora de soluciones, tal como se detalla a continuación.

2.8.2.2.1 Métodos constructivos

Son procedimientos que generan una solución completa a partir de reglas específicas. Entre los más comunes se encuentran (Sierra Fernández, 2023):

- **Estrategia voraz:** parte de una solución inicial y la va construyendo paso a paso, eligiendo en cada etapa la opción que parece más prometedora, sin considerar sus consecuencias a largo plazo.
- **Estrategia de descomposición:** consiste en dividir el problema en subproblemas más pequeños y manejables. Una vez resueltos, sus soluciones se integran para resolver el problema original.

- **Métodos de reducción:** se enfocan en identificar características comunes en soluciones previamente exitosas y asumen que la solución óptima también las posee, lo que ayuda a limitar el espacio de búsqueda.
- **Métodos de simplificación del modelo:** transforman el problema original en una versión más simple, cuya solución se adapta posteriormente al problema real.

2.8.2.2.2 Métodos de búsqueda

Estas técnicas parten de una solución inicial factible y se orientan a mejorarla mediante diversas estrategias. Entre ellas destacan:

- **Búsqueda local tipo 1:** evalúa las soluciones vecinas y adopta el primer cambio que represente una mejora respecto a la solución actual.
- **Búsqueda local tipo 2:** revisa todas las alternativas vecinas y selecciona aquella que proporcione el mayor beneficio.
- **Búsqueda aleatorizada:** se eligen de forma aleatoria soluciones vecinas con el propósito de ampliar la exploración del espacio de soluciones y evitar estancamientos en óptimos locales.

Dado que las heurísticas tradicionales tienden a quedar atrapadas en óptimos locales, desde los años 80 se desarrollaron métodos capaces de ofrecer soluciones más eficaces cuando los enfoques clásicos resultan insuficientes, siendo llamados métodos metaheurísticos.

2.8.2.3 Métodos metaheurísticos

Estos enfoques realizan una búsqueda exhaustiva dentro del espacio de alternativas, lo que resulta en soluciones de mayor calidad en comparación con los heurísticos convencionales. Estos pueden clasificarse de acuerdo a diversos criterios:

- **Según la fuente de inspiración:**
 - **Naturales:** basados en analogías con procesos biológicos, sociales o culturales.
 - **No inspirados:** derivan directamente de principios o propiedades matemáticas, sin una analogía externa.
-

- **Según el número de soluciones consideradas:**
 - **Poblacionales:** operan sobre un conjunto de soluciones simultáneamente, buscando el óptimo global.
 - **Trayectoriales:** mejoran iterativamente una única solución a lo largo del proceso de búsqueda.
- **Según el tratamiento de la función objetivo:**
 - **Estáticas:** no modifican la función objetivo durante la búsqueda.
 - **Dinámicas:** realizan ajustes en la función objetivo para guiar el proceso hacia soluciones más prometedoras.
- **Según el manejo de vecindades:**
 - **Con una sola vecindad:** emplean una estructura fija de vecindad durante toda la búsqueda.
 - **Con múltiples vecindades:** modifican o alternan entre diferentes estructuras de vecindad a lo largo del proceso.
- **Según el uso de memoria:**
 - **Sin memoria:** se basan únicamente en la información del estado actual.
 - **Con memoria:** incluyen mecanismos para registrar y reutilizar información de iteraciones anteriores, permitiendo una búsqueda más informada.

La Tabla 2.7 resume las principales técnicas en este contexto, facilitando la comprensión del software aplicado en la optimización del sistema bajo estudio.

2.9 Software TSPVIS

TSPVIS es una herramienta de uso gratuito, que permite visualizar y comparar en tiempo real distintos algoritmos aplicados al problema del agente viajero. Fue desarrollado por Daniel R. Ashley como parte de un proyecto académico orientado a la enseñanza y experimentación con algoritmos relacionados con el TSP, resultando útil en investigaciones enfocadas en rutas logísticas, análisis de rendimiento de algoritmos heurísticos y simulación de escenarios en problemas de transporte y distribución, lo que respalda su utilización.

Tabla 2.7 Clasificación de métodos de solución para el TSP (Fuente: *Elaboración propia*)

Método	¿Cómo funciona?	Enfoque	Subclasificación	Ventajas	Desventajas
Convex Hull	Genera un polígono convexo que delimita un conjunto de puntos. Se aplica en áreas como la planificación de rutas sin colisiones y el reconocimiento de patrones (Candela et al., 2022).	Heurístico constructivo	Método de reducción o de descomposición.	Rápido y útil para reducir el conjunto de puntos a los más relevantes.	No garantiza una solución óptima global al TSP.
Nearest Neighbor	Consiste en elegir siempre el punto más cercano desde la posición actual, lo que al inicio genera recorridos cortos, pero puede aumentar la distancia total al final del trayecto (Pérez Rave et al., 2010).	Heurístico constructivo	Estrategia voraz.	Fácil de implementar y rápido.	Puede generar soluciones de baja calidad.
Nearest insertion	Inserta el nodo más cercano al recorrido actual donde cause el menor incremento de distancia	Heurístico constructivo	Estrategia de inserción, voraz.	Mejora sobre Nearest Neighbor.	Puede quedarse en óptimos locales.
Arbitrary insertion	Inserta nodos en una posición cualquiera del recorrido, generalmente sin seguir una regla específica.	Heurístico constructivo	Estrategia de inserción.	Fácil implementación.	Poco control sobre la calidad de la solución.
Furthest insertion	Inserta el nodo más lejano al recorrido actual en el lugar que aumente menos la distancia total.	Heurístico constructivo	Estrategia de inserción, voraz.	Mejora balance de recorrido.	Mayor complejidad que otras inserciones.
Two Opt Inversion	Intercambia dos aristas de la ruta actual, invirtiendo el tramo intermedio para mejorar la solución.	Heurístico, de mejora	Búsqueda local 1 (vecino con mejora inmediata).	Simple y mejora soluciones existentes.	Puede quedar atrapado en óptimos locales.
Two Opt Reciprocal Exchange	Intercambia dos nodos entre sí para encontrar una mejor ruta, sin necesidad de invertir tramos completos.	Heurístico, de mejora	Búsqueda local 2 (compara todos los vecinos y elige el mejor).	Mejora rutas de forma eficiente.	Puede necesitar múltiples iteraciones.
Random	Genera soluciones de forma completamente aleatoria sin ningún criterio específico de selección.	Heurístico	Aleatorizado, sin memoria.	Muy rápido para pruebas preliminares.	Alta probabilidad de soluciones ineficientes.

Método	¿Cómo funciona?	Enfoque	Subclasificación	Ventajas	Desventajas
Búsqueda Tabú	Explora más allá de los óptimos locales permitiendo ciertos movimientos desfavorables y restringiendo soluciones recientes para evitar ciclos.	Metaheurístico	Con memoria, trayectorial, con una vecindad.	Permite escapar de óptimos locales.	Requiere parámetros dedicados y memoria adicional.
Algoritmos genéticos	Basados en principios evolutivos, utilizan selección, reproducción y mutación para buscar soluciones óptimas representadas en cromosomas.	Metaheurístico	Natural, poblacional, con memoria.	Exploran gran espacio de soluciones.	Puede requerir mucho tiempo para converger.
Redes neuronales	Sistemas de aprendizaje basados en el cerebro humano que reconocen patrones y simulan conexiones entre nodos, generando recorridos óptimos en los que cada nodo es visitado una sola vez.	Metaheurístico (cuando se usa en optimización)	Natural, poblacional, con memoria (cuando se adapta al problema).	Aprenden de datos complejos y generalizan bien.	Necesitan gran cantidad de datos y entrenamiento.
Simulated Annealing	Explora soluciones permitiendo ocasionalmente empeoramientos controlados, simulando el enfriamiento de metales para evitar óptimos locales.	Metaheurístico	Aleatorizado, trayectorial, con una vecindad, sin memoria (generalmente).	Escapa de óptimos locales.	Requiere calibración de parámetros.
Colonia de hormigas (ACO)	Inspirada en las hormigas, utiliza rastros de feromonas para encontrar rutas óptimas en circuitos cerrados, optimizando el número de vehículos, la distancia y el tiempo de entrega.	Metaheurístico	Poblacional, dinámica, con memoria, múltiples vecindades, inspirada en la naturaleza	Explora diversas soluciones simultáneamente, como en el VRP.	Puede requerir muchos parámetros, alto costo computacional y no siempre garantiza el óptimo global.
Depth First Search (Brute Force)	Explora todas las rutas posibles desde un punto inicial hasta que encuentra la óptima, sin aplicar poda.	Exacto	Método exhaustivo.	Garantiza la solución óptima.	Impráctico para grandes instancias.
Branch and Bound (Cost)	Divide el problema en subproblemas (ramas) y poda aquellos cuya solución no mejora el mejor coste encontrado.	Exacto	Basado en poda de soluciones subóptimas, con estructura de árbol.	Reduce espacio de búsqueda.	Aún puede ser costoso computacionalmente.
Branch and Bound (Cost, Crossings)	Variante que incorpora además del costo la cantidad de cruces en las rutas, mejorando la legibilidad del recorrido o su viabilidad logística.	Exacto	Basado en poda multicriterio.	Obtiene rutas más limpias.	Mayor complejidad de implementación.

La Figura 2.10 muestra la interfaz del programa. Al hacer clic sobre el mapa, se puede acceder a zonas más específicas. Esto resulta útil debido a la necesidad de evaluar diversos puntos de la ciudad, no solo de Orizaba, sino también de Río Blanco, Nogales y Mendoza. Asimismo, se observa que TSPVIS integra 12 algoritmos heurísticos y exactos, los cuales se encuentran en la barra desplegable de la sección ALGORITHM. Cabe mencionar que, el software recomienda iniciar con un algoritmo de construcción seguido de uno de mejora.

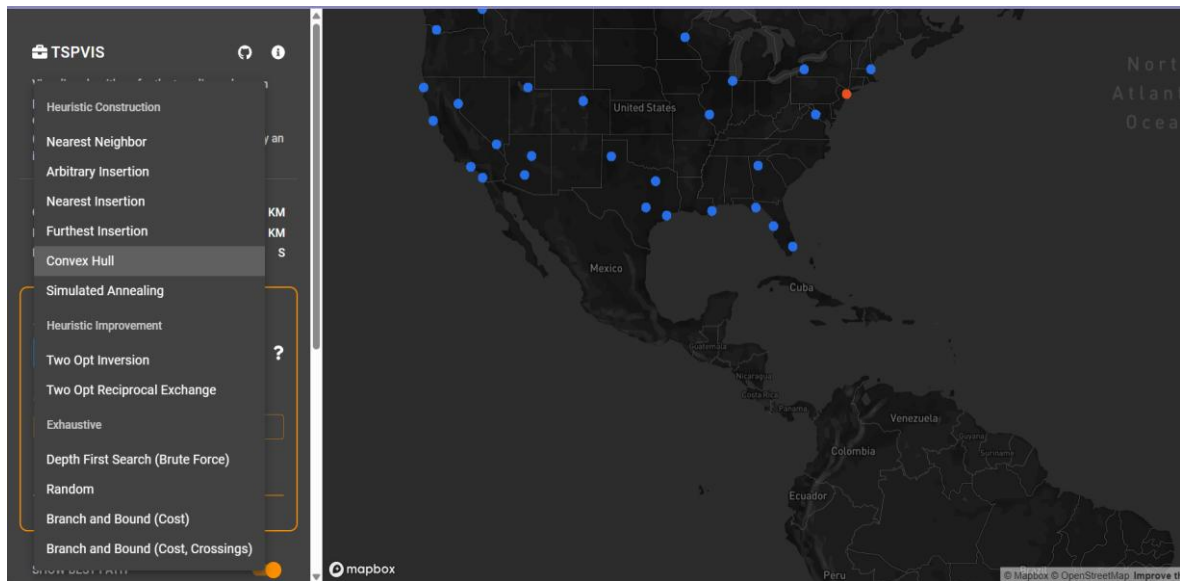


Figura 2.10 Interfaz TSPVIS (Fuente: TSPvis, 2025)

2.10 Estado del arte

Una vez establecidas las bases teóricas y técnicas del proyecto, la Tabla 2.8 muestra estudios sobre sistemas de recolección de residuos que emplean simulación y otras técnicas para optimizar rutas, reducir distancias y mejorar tiempos de servicio. Esta revisión permite contextualizar la propuesta, identificar aportaciones previas y justificar las estrategias empleadas, brindando al lector una comprensión clara del enfoque metodológico aplicado.

Tabla 2.8 Estado del arte (Fuente: Elaboración propia)

Título	Autores	Problemática	Aportación	Técnica utilizada
Recolección eficiente de los desechos sólidos, una alternativa para contribuir a la solución del problema ecológico de la ciudad de Monterrey.	Arredondo Lozano (2001)	Arredondo Lozano (2001) señala que el crecimiento urbano de Monterrey rebasó la capacidad de recolección de residuos, lo que provocó acumulación, contaminación y riesgos sanitarios.	Se identificó que la concesión del servicio de recolección de RSU es viable para sectores medio y bajo, mediante una supervisión eficaz.	Análisis estadístico de datos
Modelo de simulación de gestión de residuos sólidos domiciliarios en la Región Metropolitana de Chile	Vásquez (2005)	La gestión de residuos domiciliarios en la Región Metropolitana de Chile enfrenta retos como el aumento y cambio en la composición de los residuos, la ineficiencia en su recolección y reciclaje, y la dependencia de rellenos sanitarios, agravados por la falta de coordinación institucional y recursos limitados.	Modelo de simulación para RSU domiciliarios que facilita el cálculo de costos y la obtención de indicadores cuantitativos para evaluar el impacto de un plan de gestión de residuos.	Dinámica de Sistemas Simulación
Optimización del sistema de rutas de recolección de residuos sólidos domiciliarios (Ecoeficiencia)	Racero Moreno & Pérez Arriaga (2006)	El aumento de la generación de RSU ha favorecido la aparición de tiraderos clandestinos, debido a la limitada capacidad de los camiones, el diseño empírico de rutas, el crecimiento urbano y el mal manejo de residuos por parte de la población.	Modelo matemático para evaluar la capacidad de flota o número de operarios y técnica SIG para simular el desplazamiento de los vehículos.	TSP Algoritmo de Little Algoritmo del cartero chino Técnicas SIG
Análisis del Sistema de Recolección de Residuos Sólidos Urbanos en el Centro Histórico de Morelia, aplicando Sistemas de Información Geográfica (SIG)	Gutiérrez Galicia (2008)	El municipio de Morelia carece de un diseño de rutas eficiente para la gestión de los RSU, aunado a la falta de recursos económicos y una planeación adecuada para ampliar su cobertura con menores costos.	Propuesta de un procedimiento para el diseño eficiente de rutas para la recolección de RSU basado en modelos de redes y Sistemas de Información Geográfica.	Estudio de tiempos y movimientos Modelos de redes SIG Simulación

Título	Autores	Problemática	Aportación	Técnica utilizada
Rediseño de rutas de recolección de residuos sólidos mediante el problema de Ruteo de Vehículos Capacitados sobre Arcos	Pineda Amador (2015)	El sistema de recolección de RSU en el Estado de México presenta deficiencias operativas por el uso de camiones antiguos y pocos compartimientos dobles, lo que limita la eficiencia, incrementa las horas de trabajo y reduce la calidad del servicio. Asimismo, el crecimiento urbano, las distancias largas y el diseño empírico de rutas agravan la situación.	Rediseño de las rutas de recolección y minimización de las distancias recorridas por cada vehículo, mejorando la gestión de los RSU.	VRP: múltiple (m-VRP) y Vehículos Capacitados sobre Arcos (CARP)
Optimización de las rutas de recolección de los residuos sólidos urbanos del Centro Cantonal SÍGSIG	Minga Quezada & Zhiminace la León (2019)	El aumento poblacional en el Cantón Sigsig ha excedido la capacidad del sistema de recolección de residuos, causando fallas operativas y ambientales, afectando negativamente al ambiente y la salud pública.	Propuesta de diseño de rutas para la recolección vehicular y manual de los RSU del municipio.	Análisis estadístico de datos Simulación mediante SIG
Evaluación del sistema de limpia pública del H. Ayuntamiento Camerino Z. Mendoza para mejorar su productividad mediante la simulación con Simio	Ortega Ortiz (2020)	A pesar de contar con un buen sistema de recolección de residuos sólidos urbanos, se considera que existen áreas de mejora en las rutas actuales del municipio de Mendoza que permitirían efficientar el servicio.	Modelo de simulación para evaluar propuestas de ruteo del sistema de recolección de RSU.	Simulación en Simio Estudio de tiempos y movimientos
Evaluación de la Ruta 8 de Recolección de Residuos Sólidos en la Ciudad de Orizaba, Veracruz, usando Simulación en Simio	Cruz García (2023)	La ruta 8 del centro histórico de Orizaba presenta retrasos en el barrido manual debido a una deficiente planeación y logística, reflejada en la asignación inadecuada de tareas, personal y recorridos.	Modelo de simulación que permitió evaluar escenarios y mejorar la toma de decisiones.	Simulación en Simio Análisis estadístico de datos

Capítulo 3

Metodología

La metodología aplicada en esta tesis se basa en el enfoque propuesto por Law y Kelton (2007), que se sustenta en el método científico. Su aplicación tiene como propósito representar y analizar el funcionamiento de las cinco rutas que integran el programa de servicios especializados de recolección de RSU del Ayuntamiento de Orizaba. Esto permitirá evaluar el desempeño actual del sistema, detectar áreas de oportunidad y proponer estrategias de mejora. La metodología consta de diez etapas secuenciales, cada una con tareas, objetivos y metas específicas, cuyo desarrollo se detalla en las secciones posteriores. Este capítulo, por tanto, establece la base metodológica que guía todo el proceso de simulación, desde la formulación del problema hasta la implementación de los resultados.

3.1 Formulación del problema

Orizaba, Veracruz, se ha consolidado como un referente en la gestión de residuos sólidos urbanos, impulsada por su compromiso con la sostenibilidad y el auge del sector turístico. Sin embargo, persisten retos como es el caso de la ruta de recolección de Servicios Especializados, la cual atiende a usuarios que pagan una cuota adicional debido a la atención particularizada que reciben. La logística de los recorridos de este programa fue diseñada con base en la experiencia de los operarios por lo que, si bien ha permitido una operación funcional, carece de una estructura sistemática que permita la optimización de recursos clave, presentándose ineficiencias operativas y en algunos casos, quejas por parte de los usuarios.

En este contexto, la presente investigación tiene como propósito analizar los datos recopilados y desarrollar un modelo de simulación en Simio para diseñar escenarios que permitan optimizar las rutas que conforman este servicio, utilizando como principales medidas de desempeño el tiempo promedio en sistema y el porcentaje de utilización. En cuanto a las variables clave de entrada, se analizará el tiempo de traslado entre puntos y el tiempo de servicio de cada negocio. Cabe mencionar que, para esta segunda variable se

contemplará como parte del sistema, pero no se buscará optimizar, dado que es una variable externa no controlable. Si bien otros indicadores como la cantidad de residuos recolectados, el consumo de combustible o los costos de mantenimiento resultarían valiosos, estos no fueron incluidos debido a restricciones de confidencialidad. Además, los responsables del departamento de Limpia Pública han manifestado que, por el momento, dichos aspectos no forman parte de sus prioridades.

El análisis se acotará a los días lunes, en función del alcance temporal del proyecto. Esta delimitación fue validada con el jefe del departamento, quien señaló que dicho día representa un punto crítico en la operación, ya que concentra el mayor número de servicios, convirtiéndolo en una muestra representativa para evaluar el desempeño de la ruta.

3.2 Recopilación de datos y definición del modelo

La recopilación de datos precisos y confiables del sistema real es un requisito esencial para construir un modelo de simulación que represente fielmente su comportamiento. En función de ello, se determinó que el levantamiento de información se llevaría a cabo durante cinco lunes consecutivos (uno por cada zona: sur, centro, norte, calle real y orgánica), desde 6:00 am (hora de inicio del turno laboral) hasta 3:00 p.m. (hora en que el camión recolector regresa a la base). El punto de inicio y fin será el Taller de Servicios Municipales (SERMUN), en cual se ilustra en la Figura 3.1.



Figura 3.1 Taller de Servicios Municipales Orizaba, Veracruz (Fuente: Elaboración propia)

3.2.1 Ruta Sur

La Figura 3.2 muestra la delimitación geográfica correspondiente a los servicios de la zona Sur de la ruta en estudio. Como puede observarse, se trata de una de las áreas con mayor

carga operativa, evidenciada por la concentración de recuadros rojos, los cuales representan los establecimientos donde el camión debe realizar la recolección de los RSU. La toma de tiempos se efectuó de acuerdo con lo planeado. Asimismo, se mapearon las actividades que se realizan para construir el respectivo flujograma de operaciones.

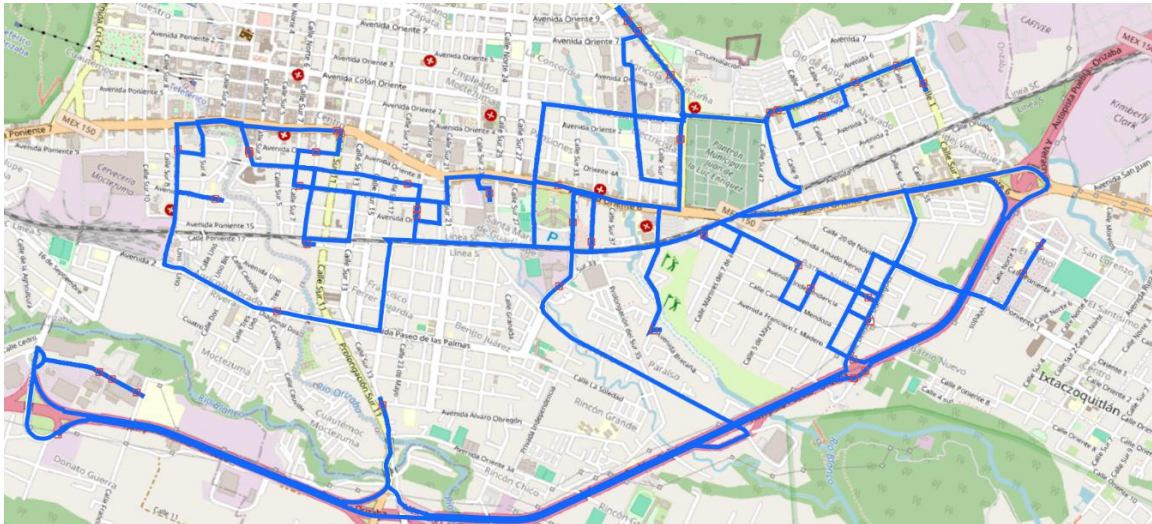


Figura 3.2 Ruta Sur, Servicios Especializados (Fuente: Elaboración propia)

La Figura 3.3 muestra una toma del servicio Plaza Faro, donde el camión se estaciona a un costado de este edificio para realizar la respectiva recolección de los RSU. El registro de los datos se realizó respetando la logística de los operarios. Como se mencionó, este orden ha sido establecido empíricamente. En consecuencia, lo ideal es no alterar el sistema para que refleje información fidedigna y se detecten áreas de oportunidad.



Figura 3.3 Servicio Plaza Faro, ruta Sur (Fuente: Elaboración propia)

Al término de la jornada, se obtuvo la Tabla 3.1, donde se aprecia que las lecturas tomadas fueron la hora de llegada y la hora de salida de cada servicio. Si se desea conocer la lista completa, consultar el anexo 1.

Tabla 3.1 Lectura de tiempos, ruta Sur (Fuente: Elaboración propia)

Ruta	CVO	Negocio	Hora de llegada	Hora de salida
		SERMUN		06:15
Sur	1	Rastro municipal	06:22	06:28
Sur	2	Plaza Faro	06:30	06:37
Sur	3	Pastelería Grisel	06:51	06:51
Sur	4	Carrido	06:54	06:57
Sur	5	Hotel Trueba	07:08	07:20
Sur	6	Hotel HAUS	07:08	07:20
Sur	7	CFE receptora ote 8	07:24	07:24
.	.	...	.	.
.	.	...	.	.
.	.	...	.	.
Sur	38	CEICO preescolar	14:00	14:10
Sur	39	Bodega IMPS	14:10	14:11
Sur	40	DIF municipal	14:15	14:16
Sur	41	Orizaba	14:22	14:31
Sur	42	Guardería nenitos	14:34	14:40
Sur	43	Hotel Mirador	14:40	14:41
Sur	44	Bla Bla	14:42	14:43

Con estos datos se prosiguió a determinar el tiempo de servicio y el tiempo de traslado. En este sentido, para conocer el tiempo recolección o de servicio de cada sitio, en cada uno se restó a la hora de salida, la hora de llegada. En cuanto al tiempo de traslado, se restó a la hora de llegada del negocio actual, la hora de salida del comercio anterior. Para una mejor comprensión, se toma como ejemplo el rastro municipal. Este tiene indicado las 6:28 como hora de egreso, si se llegó a las 6:22, significa que el tiempo de servicio fue de 6 minutos. Ahora bien, si se arribó a las 6:22 al rastro (negocio actual) y del SERMUN (comercio anterior) se partió a las 6:15, la diferencia son 7 minutos, estableciéndose dicho valor como el tiempo de traslado.

Dado que la recopilación de datos se limitó a una sola jornada de observación, se optó por utilizar la distribución uniforme como primera aproximación para modelar los tiempos de traslado y servicio. Esto se justifica por la capacidad que tiene esta para representar de forma

conservadora la incertidumbre, asumiendo que cualquier valor dentro de un intervalo mínimo y máximo observado es igualmente probable (Standridge, 2013). Además, el artículo *What is Uniform Distribution in Finance* de Learnsignal (2024) y el blog *The most important probability distributions for business process simulation* de SoftwareSim (Box, 2021), señalan que esta distribución es comúnmente utilizada en estudios preliminares de simulación cuando los datos disponibles son limitados o insuficientes para ajustar modelos probabilísticos más complejos.

Para estimar estos valores, se consultó a operarios y supervisores. Su experiencia permitió considerar factores como el tráfico u otras posibles eventualidades, preservando la variabilidad esencial del sistema sin introducir supuestos no respaldados por la evidencia disponible. Como resultado se obtuvo la Tabla 3.2, la cual incluye la programación que se usará en el simulador para estos datos. Para consultar la tabla completa, véase el anexo 2.

Tabla 3.2 Tiempos de traslado y de servicio, ruta Sur (Fuente: Elaboración propia)

Ruta	CVO	Negocio	Hora de llegada	Hora de salida	Tiempo de servicio	Tiempo de traslado	Tiempo Processing Time Simio	Tiempo TimePath Simio
		SERMUN		06:15	15		Random.Uniform(10,20)	
Sur	1	Rastro municipal	06:22	06:28	00:06	00:07	Random.Uniform(5.5,6.5)	Random.Uniform(6.5,7.5)
Sur	2	Plaza Faro	06:30	06:37	00:07	00:02	Random.Uniform(6.5,7.5)	Random.Uniform(1.8,2.2)
Sur	3	Pastelería Grisel	06:51	06:51	00:00	00:14	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(13.5,14.5)
.	.	...	.	.	.	.	...	...
.	.	...	.	.	.	.	...	...
.	.	...	.	.	.	.	...	...
Sur	41	Harinera y Manufacturera de Orizaba	14:22	14:31	00:09	00:06	Random.Uniform(8.5,9.5)	Random.Uniform(5.5,6.5)
Sur	42	Guardería nenitos	14:34	14:40	00:06	00:03	Random.Uniform(5.5,6.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Sur	43	Hotel Mirador	14:40	14:41	00:01	00:00	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(0.3,0.6)
Sur	44	Bla Bla	14:42	14:43	00:01	00:01	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)

La columna *Tiempo TimePath Simio* se refiere al nombre del objeto que representará los recorridos al momento de construir el modelo, recordando que este es un elemento que permite establecer el trayecto entre dos nodos, donde el tiempo es determinado por el usuario. Por otra parte, la columna *Tiempo Processing Time Simio*, se refiere al tiempo de procesamiento, es decir, el tiempo que tardó el camión en recolectar los RSU correspondientes. En cuanto a expresión *Random.Uniform* se refiere a palabras reservadas del simulador que indican que los datos siguen una distribución uniforme.

3.2.2 Ruta Centro

El siguiente recorrido corresponde a la zona Centro. Tal como se muestra en la Figura 3.4, esta área también presenta un número elevado de servicios. Sin embargo, a diferencia de otras zonas, estos se encuentran distribuidos dentro de un radio geográfico más reducido, lo que podría influir en la eficiencia del trayecto.

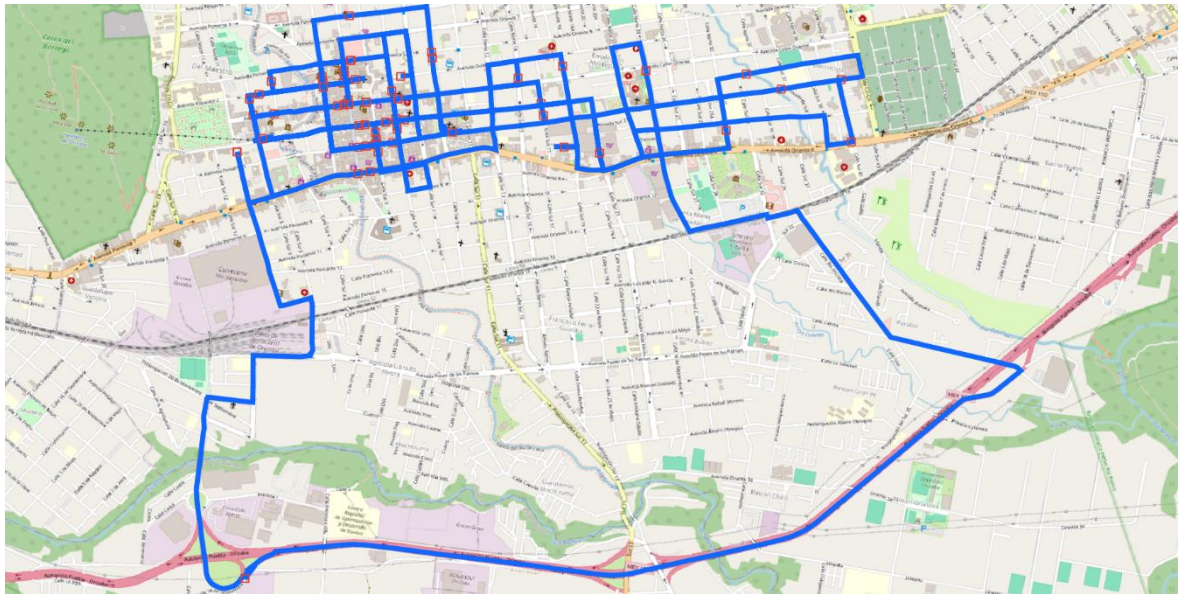


Figura 3.4 Ruta Centro, Servicios Especializados (Fuente: Elaboración propia)

De igual manera, la estrechez de las calles y el continuo flujo vehicular y peatonal podrían repercutir en el tiempo, debido a que el camión se ve en la necesidad de situarse en puntos estratégicos que le permitan acceder al mayor número de negocios. Por ejemplo, en la Figura 3.5 el camión se encuentra estacionado sobre la calle Madero Sur para recolectar la basura del Palacio de Hierro, Cuidado con el Perro y Vertiche. Otro desafío, derivado del tránsito constante, son las vueltas adicionales que se realizan a las manzanas mientras los recolectores retiran las bolsas de residuos a pie. Esta situación no solo complica la logística, sino también incrementa el tiempo total de servicio.

Por lo que respecta a la toma de tiempos, se realizó siguiendo la misma metodología aplicada en la ruta Sur. Se registraron los tiempos de arribo y salida en cada punto visitado, se utilizaron las mismas operaciones de cálculo y se entrevistaron a operarios y supervisores para establecer los parámetros de las variables clave de entrada para el simulador.



Figura 3.5 Servicios calle Madero, ruta Centro (Fuente: Elaboración propia)

El resultado fue la Tabla 3.3, la cual alimentará el modelo correspondiente (consulte el anexo 3 para ver los datos completos). Cabe señalar que esta tabla incluye una columna adicional denominada *bloque*, la cual hace referencia a agrupaciones de locales que son atendidos desde un mismo punto de estacionamiento.

Tabla 3.3 Tiempos de traslado y servicio, ruta Centro (Fuente: Elaboración propia)

Zona	CVO		Negocio	Hora de llegada	Hora de salida	Tiempo de servicio	Tiempo de traslado	Tiempo Processing Time Simio	Tiempo Timepath Simio
			SERMUN		06:15	15		Random.Uniform(10,20)	
Centro	1		UV Enfermería	06:22	06:25	00:03	00:07	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(6.5,7.5)
.	.	.	...	.	.	.	.	...	...
.	.	.	...	.	.	.	.	...	...
.	.	.	...	.	.	.	.	...	...
Centro	51	Bloque 11	Cafetería Sugar	11:20	11:37	00:17	00:02	Random.Uniform(16.5,17.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Centro	52		Despacho de contadores Trueba (Oriente 4 172, Centro)	11:20	11:37	00:17	00:00		
Centro	53		Zapatería 3 caballos	11:20	11:37	00:17	00:00		
Centro	54		Banorte ote 4	11:20	11:37	00:17	00:00		
Centro	55		Revés de Café	11:20	11:37	00:17	00:00		
Centro	56		Lic Jaime (Oriente 4, 88 altos)	11:20	11:37	00:17	00:00		
Centro	57		Financiera junto al Banorte*	11:20	11:37	00:17	00:00		
Centro	58		Anfora	11:20	11:37	00:17	00:00		
Centro	59		CFE Madero	11:20	11:37	00:17	00:00		
Centro	60		FYMSSA	11:50	12:06	00:16	00:13	Random.Uniform(15.5,16.5)	Random.Uniform(12.5,13.5)
.	.	.	...	.	.	.	.	...	...
.	.	.	...	.	.	.	.	...	...
.	.	.	...	.	.	.	.	...	...
Centro	65		Scattola	13:42	13:43	00:01	00:12	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(11.5,12.5)

Este concepto ya había sido mencionado, como en el caso de los servicios ubicados en la calle Madero Sur o en el bloque 11, el cual abarca la atención simultánea de once establecimientos. En este último caso, el camión se estaciona a la altura del restaurante Sugar, en la intersección de Sur 3 y Oriente 4. Desde ese punto, los recolectores se desplazan a pie hacia los distintos locales para recoger las bolsas y trasladarlas al camión.

3.2.3 Ruta Norte

La Figura 3.6 corresponde a los servicios que se realizan en la parte norte de la ciudad. Esta zona tiene menor cantidad de puntos de recolección con respecto a la ruta la Sur y ruta Centro. Sin embargo, durante el recorrido se observó que sus tiempos de retiro son más prolongados en algunos negocios. Por otra parte, ciertos establecimientos son omitidos en el primer paso del camión, lo que obliga a retomar caminos ya circulados, incrementando innecesariamente el tiempo de la ruta.

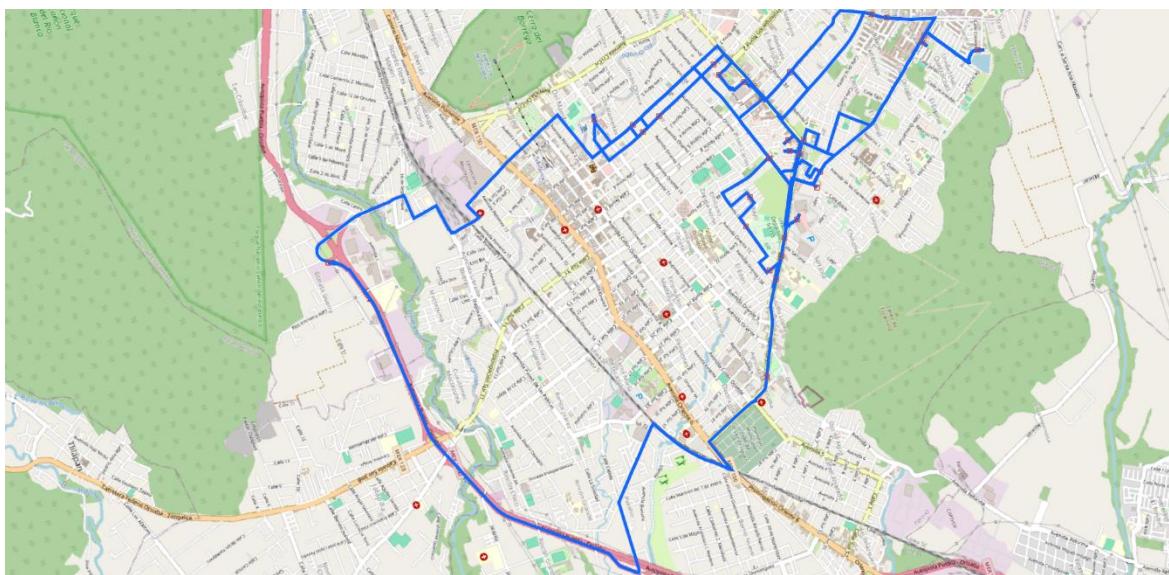


Figura 3.6 Ruta Norte, Servicios Especializados (Fuente: Elaboración propia)

La logística de la toma de tiempos se llevó a cabo de la misma manera que en los casos anteriores, teniendo al SERMUN como punto de inicio y fin del recorrido. Por lo que respecta al tratamiento de los datos, se siguió la misma lógica, apoyándose de la experiencia de los operarios y supervisores. Esto dio como resultado la Tabla 3.4, de la cual, la información completa se encuentra en el anexo 4.

Tabla 3.4 Tiempos de traslado y servicio, ruta Norte (Fuente: Elaboración propia)

Ruta	CVO	Negocio	Hora de llegada	Hora de salida	Tiempo de servicio	Tiempo de traslado	Tiempo Processing Time Simio	Tiempo TimePath Simio
		SERMUN		06:15	15			Random.Uniform(10,20)
Norte	1	Inspección de policía	06:37	06:50	00:13	00:22	Random.Uniform(21.5,22.5)	Random.Uniform(12.5,13.5)
Norte	2	Panadería Flores	07:23	07:35	00:12	00:33	Random.Uniform(32.5,33.5)	Random.Uniform(11.5,12.5)
Norte	3	CDO Norte	07:40	07:43	00:03	00:05	Random.Uniform(4.5,5.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Norte	4	Plaza Valle	08:02	09:54	01:52	00:19	Random.Uniform(18.5,19.5)	Random.Uniform(111.5,112.5)
.	.		.	.	.	.	...	...
.	.	...	.	.	.	.	...	...
.	.		.	.	.	.	...	...
Norte	30	Ferretería de Materiales del Centro	14:40	14:44	00:04	00:01	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(3.5,4.5)
Norte	31	Ferretería El faro	14:46	14:48	00:02	00:02	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Norte	32	Telmex Ote 31	14:51	14:55	00:04	00:03	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(3.5,4.5)

3.2.4 Ruta Calle Real

El nombre asignado a este recorrido responde principalmente a la calle por la que transita el camión recolector, más que a una delimitación geográfica de la ciudad. Esta ruta se orienta a la recolección de los residuos generados por clínicas y hospitales ubicados en los municipios de Orizaba, Barrio Nuevo, Río Blanco, Nogales y Ciudad Mendoza, como se aprecia en la Figura 3.7.

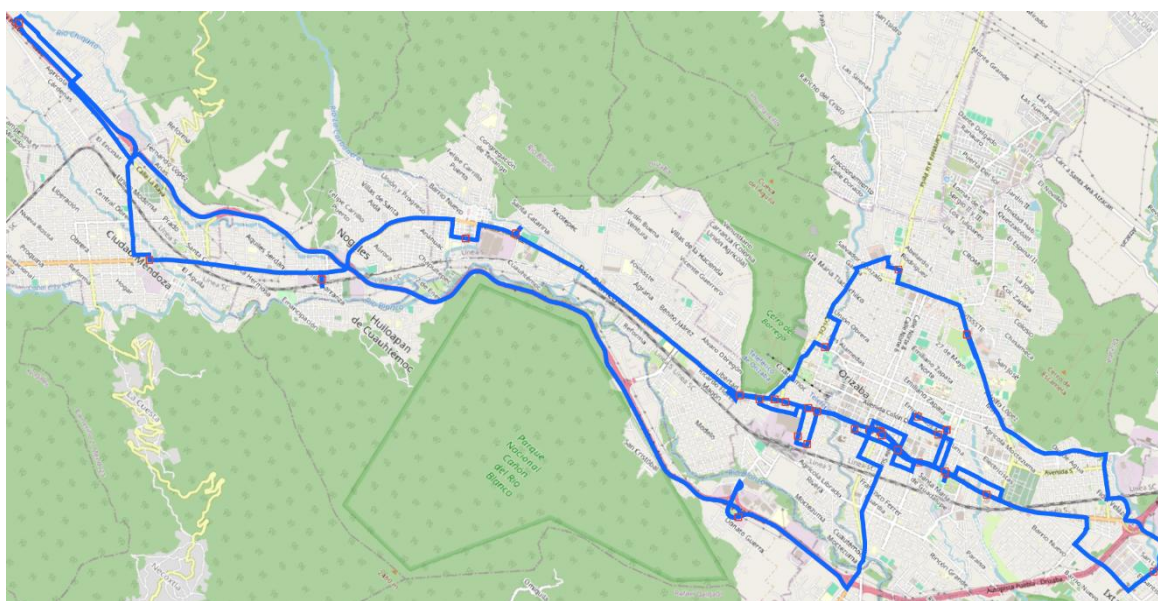


Figura 3.7 Ruta calle Real, Servicios Especializados (Fuente: Elaboración propia)

En dicha imagen también se puede observar que el recorrido llega hasta el municipio de Los Colorines, Nogales, lo cual es debido al traslado que debe realizarse al relleno sanitario de las Altas Montañas, representado en la Figura 3.8, para la disposición final de los desechos.

Esta condición incrementa significativamente el tiempo de servicio, presentándose un regreso entre las 17:30 y 18:30 horas, percibiendo a esta ruta como una de las más demandantes físicamente.



Figura 3.8 Relleno Sanitario de las Altas Montañas (Fuente: Elaboración propia)

Cabe mencionar que la ruta únicamente recoge residuos urbanos, ya que los denominados Residuos Peligrosos Biológico-Infecciosos (RPBI) son gestionados por empresas especializadas, con las cuales dichas instituciones mantienen convenios. Por su parte, la Figura 3.9 permite observar que, aunque el número de servicios es menor en comparación con las rutas anteriores, el volumen generado, particularmente de hospitales, es considerable. Esto se traduce en mayores tiempos de recolección y una mayor demanda operativa.

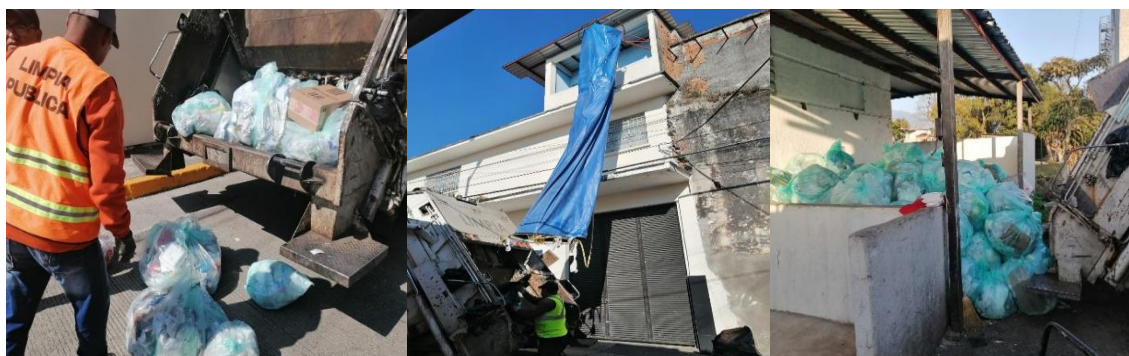


Figura 3.9 Servicios HGRO N°1 y Hospital Covadonga (Fuente: Elaboración propia)

Los resultados de la toma de tiempos y los valores establecidos para los parámetros que alimentarán el modelo se muestran en la Tabla 3.5. Para ver la información completa, consulte el anexo 5.

Tabla 3.5 Tiempos de traslado y servicio ruta calle Real (Fuente: Elaboración propia)

Ruta	CVO	Negocio	Hora de Llegada	Hora de salida	Tiempo de servicio	Tiempo de traslado	Tiempo Processing Time Simio	Tiempo TimePath Simio
		SERMUN		06:15	15			Random.Uniform(10,20)
Real	1	ADO	06:35	06:40	00:05	00:20	Random.Uniform(19.5,20.5)	Random.Uniform(4.5,5.5)
Real	2	Sora	06:44	07:24	00:40	00:04	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(39.5,40.5)
Real	3	HGRO N°1	07:30	09:00	01:30	00:06	Random.Uniform(5.5,6.5)	Random.Uniform(89.5,90.5)
Real	4	La braza (fte a Yamboo)	09:03	09:05	00:02	00:03	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
.	.	...	.	.	.	.	...	...
.	.	...	.	.	.	.	...	...
.	.	...	.	.	.	.	...	...
Real	27	UMF #2	15:02	15:03	00:01	00:09	Random.Uniform(8.5,9.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Real	28	UMF #3	15:12	15:20	00:08	00:09	Random.Uniform(8.5,9.5)	Random.Uniform(7.5,8.5)
Real	29	UMF # 4	15:53	16:00	00:07	00:33	Random.Uniform(32.5,33.5)	Random.Uniform(6.5,7.5)

3.2.5 Ruta Orgánica

Como su nombre lo indica, esta ruta se dedica a la recolección de desechos orgánicos, la mayoría provenientes de los mercados de la ciudad y ciertos negocios como supermercados y restaurantes. Esto genera que su delimitación geográfica no sea específica y tengan que visitarse diferentes partes de la ciudad, tal como se aprecia en la Figura 3.10.

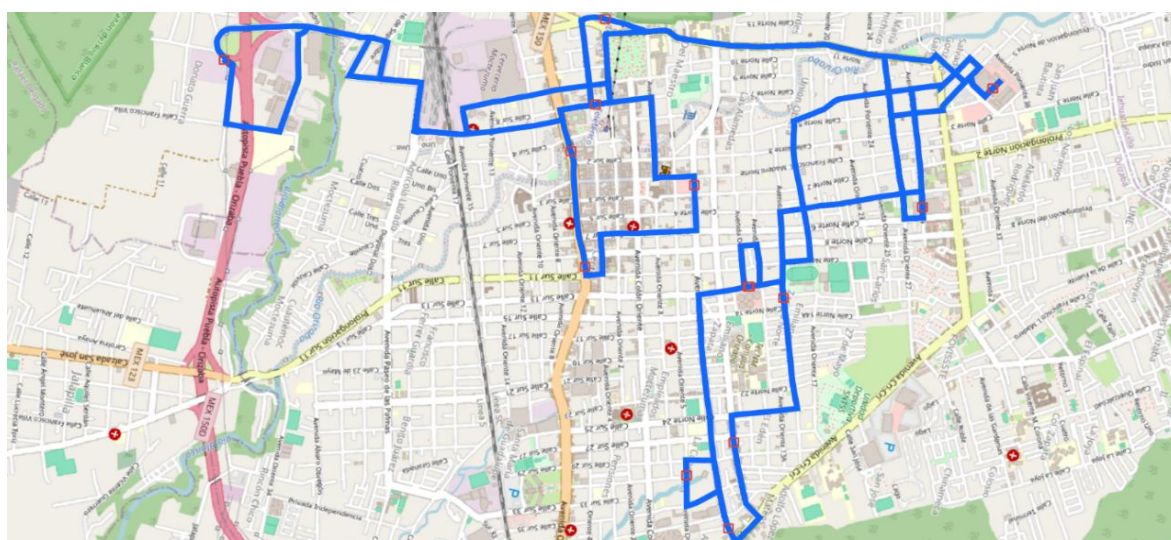


Figura 3.10 Ruta Orgánica, Servicios Especializados (Fuente: Elaboración propia)

Si bien, es la ruta con el menor número de clientes, el volumen que se recolecta en la mayoría de los establecimientos es alto. Por consiguiente, el tiempo de recolección se incrementa, así como el porcentaje de utilización. A pesar es esta situación, se considera que existe una oportunidad importante para mejorar su eficiencia operativa. La Tabla 3.6 concentra las

lecturas realizadas, así como los resultados de la información proporcionada por operarios y supervisores.

Tabla 3.6 Tiempos de traslado y servicio ruta Orgánica (Fuente: Elaboración propia)

Ruta	CVO	Negocio	Hora de llegada	Hora de salida	Tiempo de servicio	Tiempo de traslado	Tiempo Processing Time Simio	Tiempo TimePath Simio
		SERMUN		06:15	15			Random.Uniform(10,20)
Orgánica	1	Mercado de Flores Rocío	07:00	07:01	00:01	00:45	Random.Uniform(44.5,45.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Orgánica	2	Mercado Melchor Ocampo	07:08	07:16	00:08	00:07	Random.Uniform(6.5,7.5)	Random.Uniform(7.5,8.5)
Orgánica	3	Hotel Misión orgánica	07:29	07:30	00:01	00:13	Random.Uniform(12.5,13.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
.	.		.	.	.	.	...	...
.	.	...	.	.	.	.	...	...
.	.		.	.	.	.	...	...
Orgánica	14	Soriana circunvalación	12:50	13:30	00:40	00:20	Random.Uniform(19.5,20.5)	Random.Uniform(39.5,40.5)
Orgánica	15	Jugos Colohua orgánica	13:40	13:45	00:05	00:10	Random.Uniform(9.5,10.5)	Random.Uniform(4.5,5.5)
Orgánica	16	Mercado de Flores	14:00	14:30	00:30	00:15	Random.Uniform(14.5,15.5)	Random.Uniform(29.5,30.5)

Tras definir el sistema y procesar la información correspondiente, se prosiguió a construir el modelo de simulación utilizando el software Simio. Para ello, se utilizó como base el diagrama de flujo de la Figura 3.11, elaborado a partir de lo observado durante los recorridos.

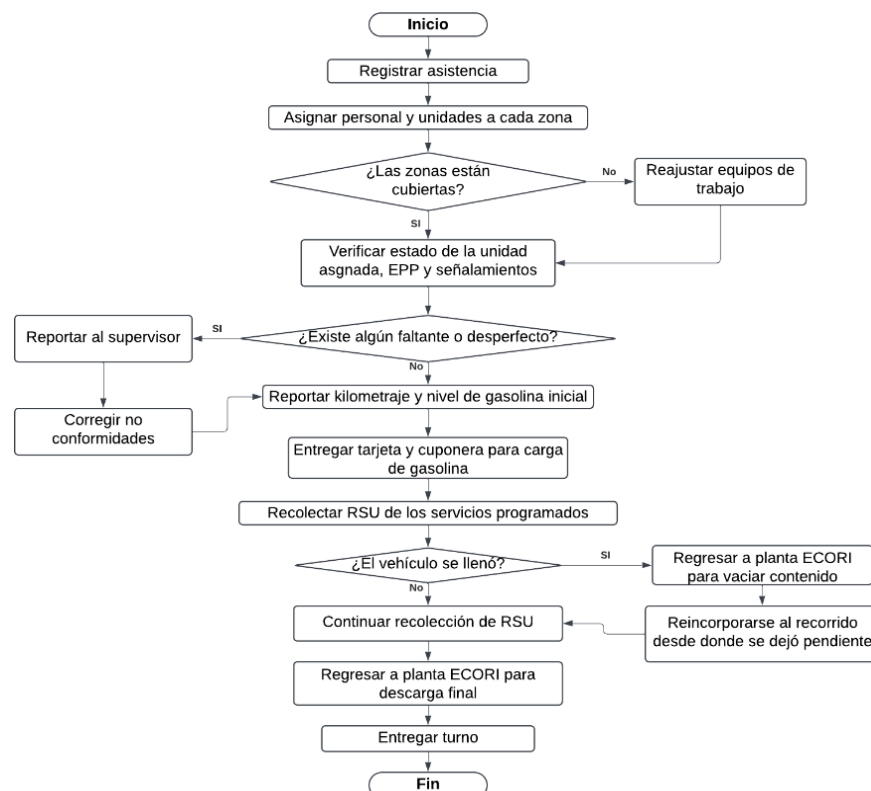


Figura 3.11 Flujograma de operaciones (Fuente: Elaboración propia)

3.3 Validación del modelo conceptual

Concluida la recolección de datos, se llevó a cabo su clasificación conforme a su naturaleza y relevancia para el estudio. Como se explicó, de la información obtenida a través de los colaboradores, se estableció que la distribución a utilizar sería la uniforme dado que presenta ventajas cuando la información disponible es limitada. Por otro lado, el modelo conceptual representado en la Figura 3.11 fue revisado y validado por el responsable de la ruta de Servicios Especializados, el ingeniero Rafael, quien confirmó la coherencia y pertinencia del diseño propuesto.

3.4 Construir el modelo

Para representar el sistema real a través de Simio, se decidió construir uno por cada ruta, teniéndose en total 5 modelos de simulación. Para el caso de las variables de entrada clave, se contemplaron el *tiempo de traslado* entre puntos y el *tiempo de servicio* (o de recolección). Respecto a la localización geográfica de los servicios que integran cada ruta del sistema en estudio, se emplearon tres herramientas: Google Maps, Google My Maps y QGIS (Quantum Geographic Information System) versión 3.42, cuya interfaz se presenta en la Figura 3.12.



Figura 3.12 Software QGIS (Fuente: Elaboración propia)

En este contexto, Google Maps permitió verificar el nombre y la dirección exacta de los sitios visitados. Posteriormente, mediante My Maps se trazaron los recorridos efectuados, respetando el orden en que fueron realizados. Una vez generados los mapas, estos se exportaron en formato KML y, finalmente, se visualizaron en QGIS utilizando el estilo OSM Standard, una funcionalidad integrada en dicho software que permite desplegar mapas de manera clara y detallada. Los resultados se muestran en la Figura 3.13.

Estas imágenes sirvieron como base para construir el modelo de simulación. En ellas, los recuadros rojos señalan la ubicación de cada *server* (es decir, negocio o punto de recolección), mientras que las líneas azules indican las rutas por las que deben definirse los *TimePaths*, representando los trayectos por donde circulará el vehículo.



Figura 3.13 Mapas obtenidos de cada zona de recolección (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 3.14 se presenta la interfaz del software, así como algunas de las herramientas con las que cuenta. Esta etapa es fundamental, ya que proporciona la base visual y estructural sobre la que se definirá el comportamiento dinámico del sistema a simular. En este sentido, cada modelo empleó básicamente las siguientes pestañas:

- **Facility:** sirve para construir el entorno físico del modelo de simulación. Es donde el usuario diseña visualmente el sistema que se desea simular, utilizando objetos gráficos y funcionales que representan los distintos elementos del proceso. En este caso, los objetos utilizados fueron *servers* (representando los negocios o puntos de recolección) y *TimePaths* (representan trayectos).

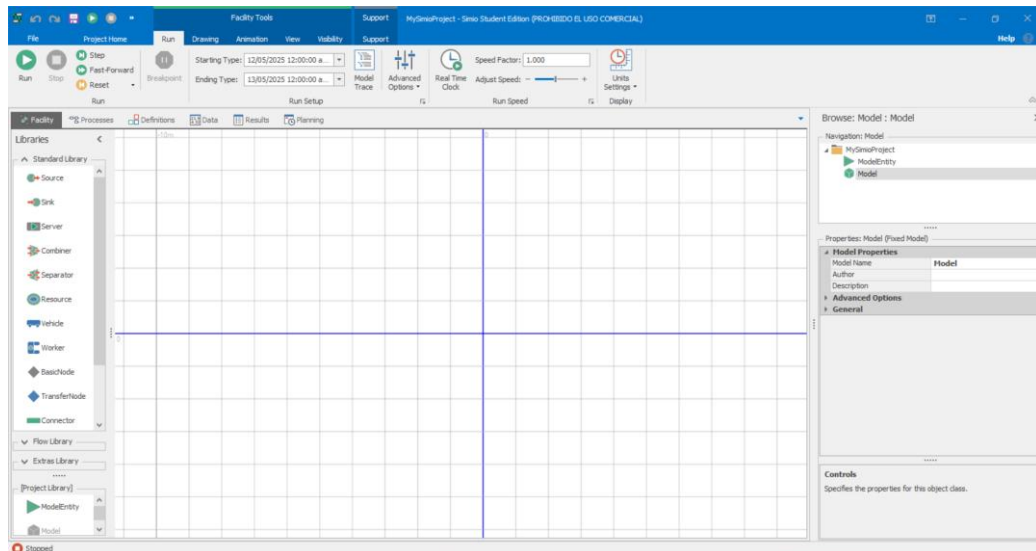


Figura 3.14 Pantalla principal Simio (Fuente: Elaboración propia)

- **Drawing:** permite agregar elementos gráficos y de apoyo visual, sin afectar la lógica de simulación. En la Figura 3.15 se ilustra como se modificó el color de la interfaz. Asimismo, con la opción *Place Symbol*, se importaron cada uno de los mapas que se mostraron en la Figura 3.13.

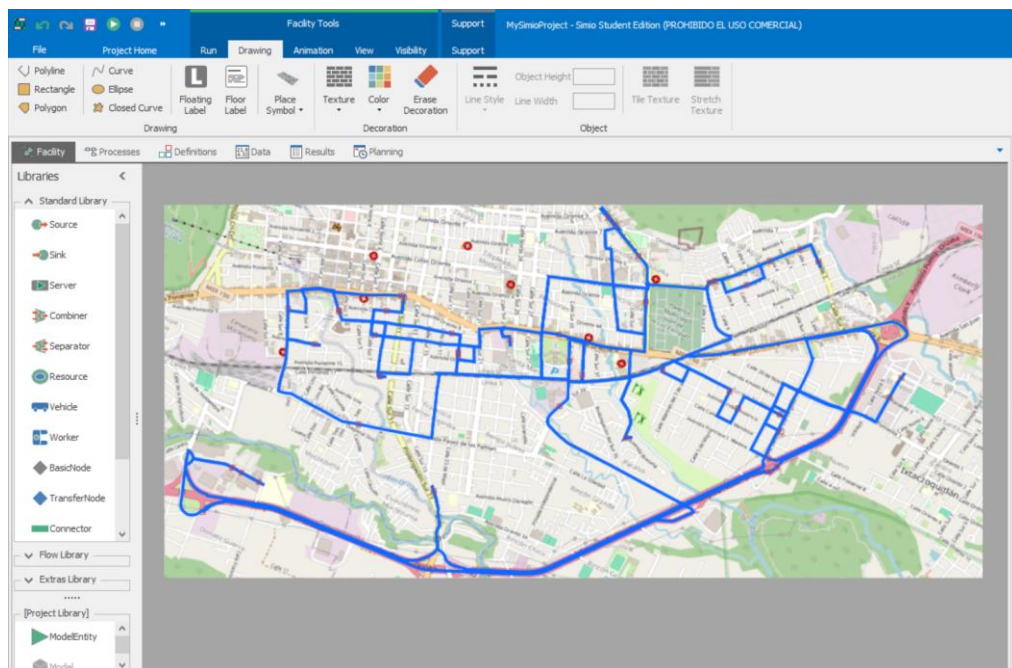


Figura 3.15 Base para construir modelo de la zona sur (Fuente: Elaboración propia)

- **Visibility:** herramienta de gestión visual que ayuda a mantener el entorno de trabajo ordenado y enfocado. Esta permitió gestionar la visibilidad de los distintos objetos y capas dentro del entorno, lo cual fue útil especialmente cuando el número de elementos visuales dificultaba la edición y el análisis.
- **Run:** sección que permite ejecutar y analizar la simulación del modelo, definir su duración y validar el comportamiento del sistema. Para los modelos construidos se estableció un tiempo de simulación de tipo infinito, lo que hará que el modelo corra hasta que el camión recolector llegue a su destino final (SERMUN). Esto permitirá identificar qué rutas exceden las 9 horas que dura la jornada laboral. Para el caso de la hora de inicio de la simulación se fijó a las 6:00 am, que corresponde al inicio de turno.

3.4.1 Modelo en Simio de la Ruta Sur

La Figura 3.16 muestra la vista en segunda dimensión del modelo construido para la ruta Sur. Las líneas grises han cubierto los trayectos azules, porque ahora sobre estos circulará el camión recolector, siguiendo una distribución uniforme.

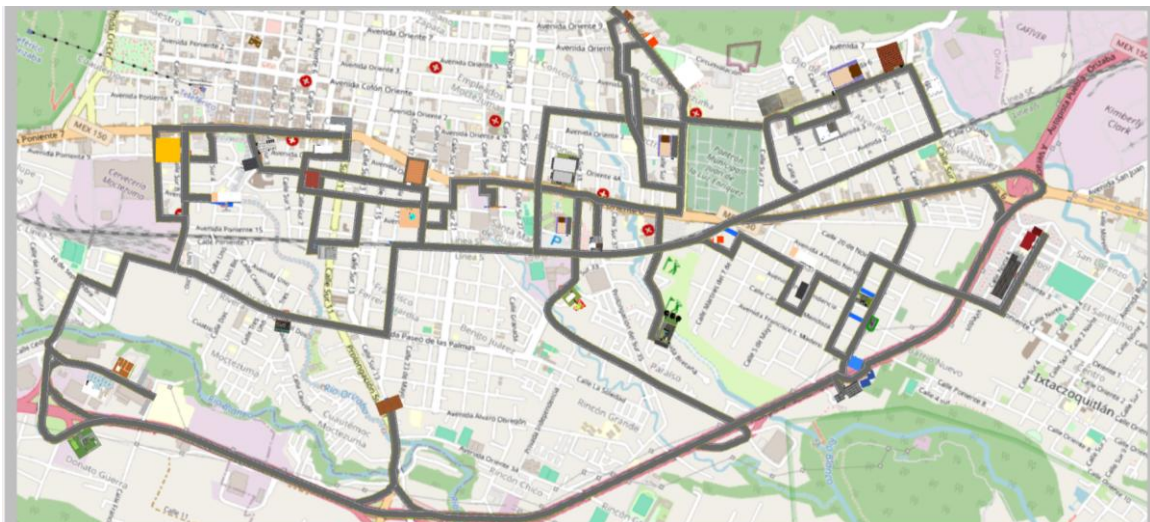


Figura 3.16 Vista 2D, modelo ruta Sur (Fuente: Elaboración propia)

En cuanto a la vista en 3D, la Figura 3.17 muestra una pequeña fracción del modelo. En ella se aprecia el SERMUN, señalado con el círculo color rojo, punto de inicio de la ruta. Por consiguiente, se consideró que este sería el Source, al ser el lugar del cual parten (se generan)

las unidades. En este sentido, la entidad creada será el camión. Para representarlo, se utilizó una *model entity* que se renombró como *CAMION_RECOLECTOR*. Gráficamente, se le aplicó un símbolo de un vehículo similar al utilizado por el Ayuntamiento de Orizaba, con el fin de conferir mayor realismo a la simulación. Sus propiedades se aprecian en el extremo derecho de la Figura 3.17, donde se estableció que la velocidad inicial de la entidad seguiría una distribución uniforme, con un valor mínimo de 20 km/h y un máximo de 40 km/h. Esta configuración se basó en el reglamento vial de la ciudad y la experiencia de los operadores.

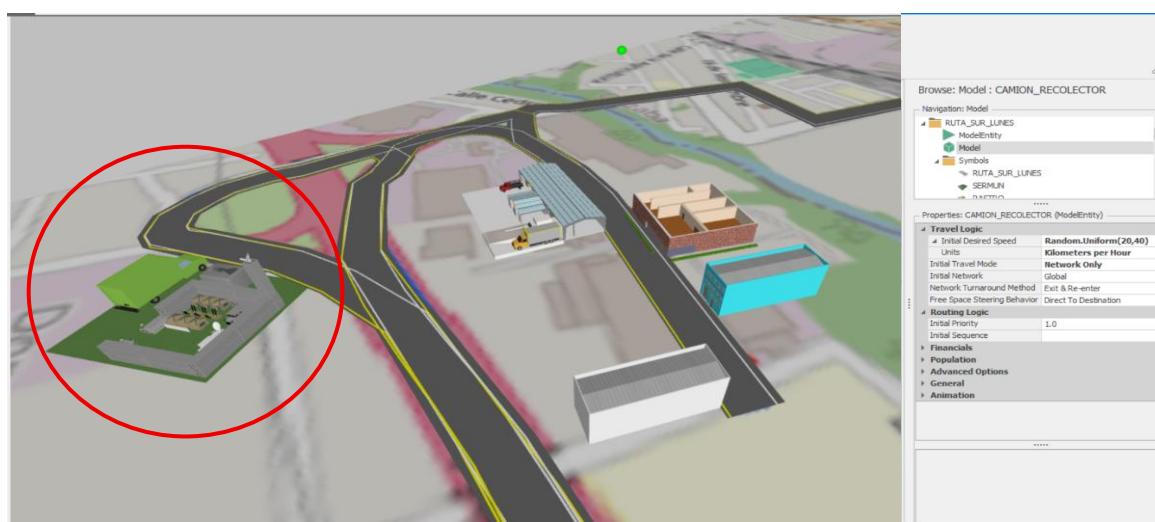


Figura 3.17 Vista 3D, modelo ruta Sur (Fuente: Elaboración propia)

Por otra parte, en la opción *Initial Travel Mode* que se refiere al modo de desplazamiento que tendrá la entidad, se estableció la opción *Network Only*, la cual garantiza que se siga un camino específico. Esto es útil cuando se desea simular un recorrido estricto a través de una red de transporte o distribución (por ejemplo, rutas de camiones, caminos dentro de una planta de producción, etc.).

Otro aspecto importante es la programación que se dio al Source. Al ser el elemento que crea las entidades (camiones), se debe establecer que solo se genere una unidad. Para ello, en las propiedades del *CAMION_RECOLECTOR*, primeramente se definió que el *Arrival Mode* (patrón o forma en que las entidades llegan al sistema) sería de tipo *Interarrival Time*, es decir, que las entidades llegarán basadas en intervalos de tiempo entre llegadas (en lugar de en una tabla fija, calendario, etc.). El *Time Offset* (tiempo de espera antes de crear la primera

entidad) seguiría una distribución uniforme con un mínimo de 10 minutos y un máximo de 20, teniendo una media de 15 minutos aproximadamente, lo cual coincide con el tiempo promedio transcurrido antes de que los operarios salgan de la base.

Por lo que respecta al *Interarrival Time*, se estableció un valor de cero. Aunque esto normalmente indicaría que las llegadas ocurren todas al mismo tiempo, al estar sobrescrito por el *Time Offset*, este valor no tendrá efecto directo. En cuanto a las *Entities Per Arrival* (entidades que se crean cada vez que ocurre una llegada desde un objeto Source) se fijó en 1, es decir, que solo se generará un camión recolector. Esto es esencial, porque aunque existen varios camiones en el SERMUN, cada camión tiene su ruta designada. Al simularse de manera independiente cada recorrido, la programación debe ser específica para que solo se genere un vehículo.



Figura 3.18 Configuración de las propiedades del Source (SERMUN) (Fuente: Elaboración propia)

Ahora bien, situándonos en la pestaña *Stopping Conditions*, la opción *Maximun Arrivals* (máximo número de llegadas) se estableció en 1, para que solo se permita la llegada de una entidad durante toda la simulación.

En resumen, esta lógica de programación hará que el objeto SERMUN genere una única entidad CAMION_RECOLECTOR, después de un tiempo aleatorio entre 10 y 20 minutos desde el inicio de la simulación. Esto representa el tiempo de preparación antes de salir de la base, permitiendo respetar el comportamiento operativo del sistema real.

Siguiendo con la descripción del modelo, para la programación de los trayectos se utilizaron *TimePaths*, a los cuales se les aplicó un diseño que simulará las carreteras de la ciudad. Con respecto a la ventana de propiedades de estos objetos, la Figura 3.19 permite visualizar la configuración que se les dio. En la sección *General* se detallan aspectos genéricos como el nombre que llevará el objeto. Para este ejemplo, se seleccionó el *TimePath* llamado *STARBUCKS_MEZCLUCAS*. Dicho nombre se asignó para identificar que ese trayecto parte del negocio Starbucks hasta llegar a la mezcladora Lucas. Por consiguiente, el *Travel Time* (tiempo de viaje), se establece de acuerdo con lo señalado en la Tabla 3.2 para esos puntos. *Random.Uniform* son las palabras reservadas de Simio para indicar que se trata de la distribución uniforme y los valores entre paréntesis representan sus parámetros (mínimo, máximo). En cuanto a las unidades se estableció que se utilizarían minutos.

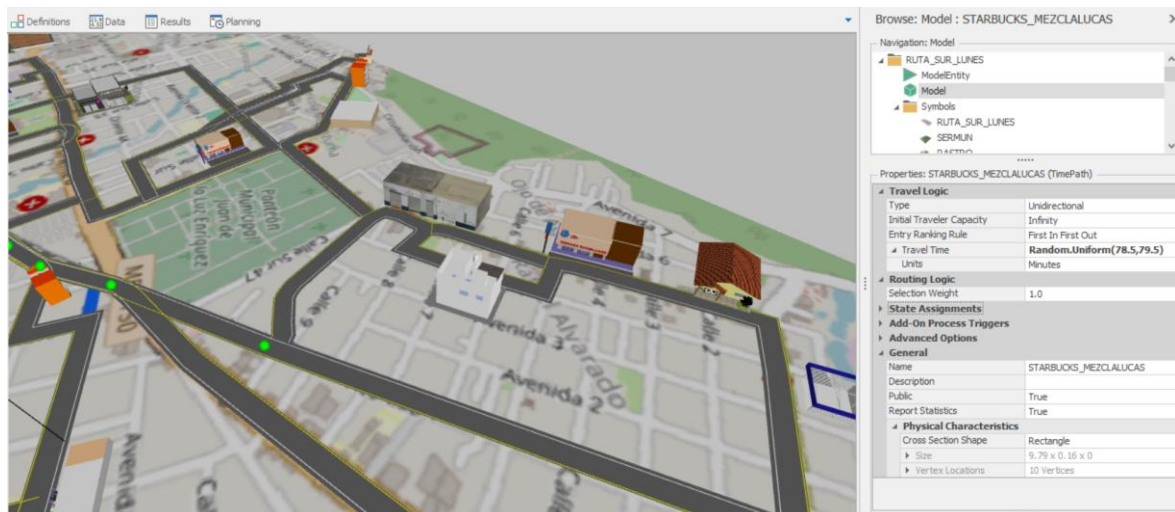


Figura 3.19 Configuración de las propiedades de un *TimePath* (Fuente: Elaboración propia)

En lo que concierne a los *Servers*, la Figura 3.20 muestra el ejemplo del negocio *FARM_GUADALAJARA_OT2*. Este objeto se estableció para representar a cada uno de los puntos de recolección. Generalmente, es en estos recursos donde las entidades deben detenerse para realizar una tarea, actividad o transformación durante un tiempo determinado, el cual se establece en el *Processing Time* (Tiempo de procesamiento). Al igual que para los trayectos, se definió que seguirían una distribución uniforme. En este caso, se presenta un mínimo de 1.5 y un máximo de 2.5 minutos. Aunado a ello, se aplicaron símbolos representativos dando mayor realismo a la simulación.

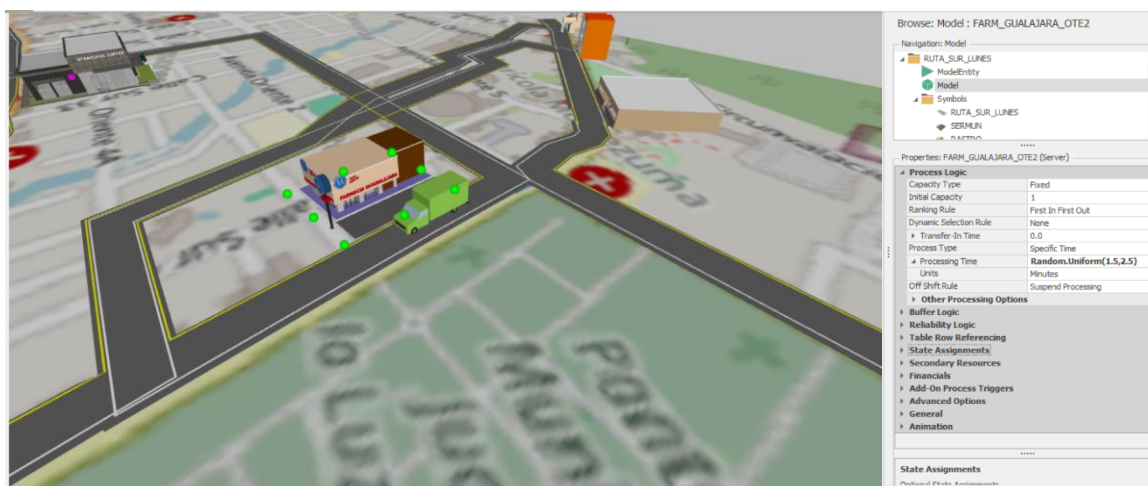


Figura 3.20 Configuración de las propiedades de un server (Fuente: Elaboración propia)

Como resumen, se presenta la Tabla 3.7, donde se concentra el número total de objetos empleados en el modelo para la ruta sur.

Tabla 3.7 Elementos del modelo ruta Sur (Fuente: Elaboración propia)

Tipo de objeto	Cantidad	Utilidad
Source	1	Simula la base (SERMUN) de donde parten los camiones recolectores.
Server	41	Representa cada negocio o punto de recolección que deben atenderse.
TimePath	42	Simula el camino que recorre el vehículo para trasladarse a cada negocio.
Sink	1	Simula el retorno de los camiones a la base cuando termina la jornada laboral.

La lógica de programación implementada se replicó en las cuatro rutas restantes: Centro, Norte, Calle Real y Orgánica. A continuación, se describen los elementos más destacados de cada una, con el fin de ofrecer al lector una comprensión más clara del trabajo realizado.

3.4.2 Modelo en Simio de la Ruta Centro

La Figura 3.21 muestra la vista bidimensional del modelo correspondiente a la ruta Centro, donde se aprecia que los puntos de recolección están ubicados en una zona más concentrada.

No obstante, al ser un área con un alto flujo vehicular y peatonal, y debido a las características de sus calles, la ruta presenta varios reprocesos. Esto se debe a la necesidad de mantener una circulación constante para evitar obstrucciones, especialmente cuando no se encuentran puntos estratégicos para realizar recolecciones simultáneas.

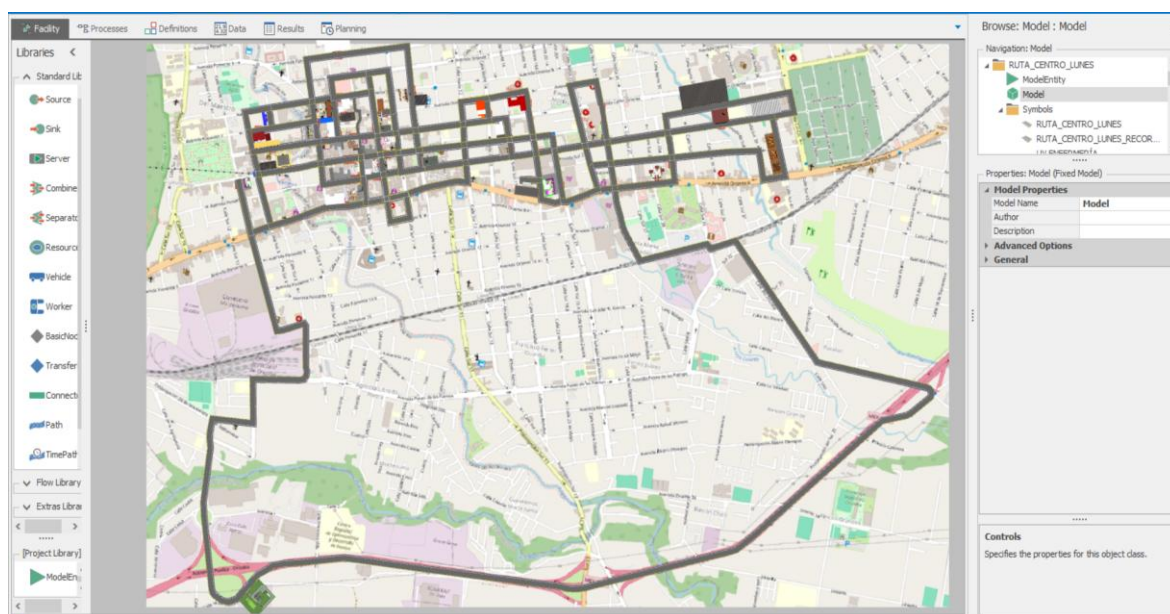


Figura 3.21 Vista 2D, modelo ruta Centro (Fuente: Elaboración propia)

Una de las grandes ventajas que ofrece el simulador es la posibilidad de lograr una representación visual realista del sistema, gracias a su amplia biblioteca de elementos gráficos que permiten incorporar vehículos, edificios, caminos y otros objetos con alto nivel de detalle. Esta funcionalidad no solo mejora la comprensión del comportamiento del modelo, sino que también facilita la comunicación de los resultados a personas no especializadas, como tomadores de decisiones o personal operativo.

En ese orden de ideas, la Figura 3.22 muestra la vista en tercera dimensión del modelo construido. Al ejecutar la simulación, es posible observar el recorrido completo del camión recolector, el cual realiza paradas en cada uno de los negocios siguiendo el orden establecido en la operación real, lo que refuerza la validez del modelo frente a las condiciones del entorno simulado.



Figura 3.22 Vista 3D, modelo ruta Centro (Fuente: Elaboración propia)

La Tabla 3.8 muestra el concentrado de objetos utilizados para el modelo de la zona Centro, presentando tan solo una unidad menos con respecto a los Servers y TimePaths de la zona Sur. Esto confirma que son de las rutas con mayor número de servicios. Sin embargo, las distancias son las que pueden marcar la diferencia en el grado de optimización de estas, lo cual se analizará cuando se corra el modelo y se identifique el porcentaje de utilización.

Tabla 3.8 Elementos del modelo ruta Centro (Fuente: Elaboración propia)

Tipo de objeto	Cantidad	Utilidad
Source	1	Simula la base (SERMUN) de donde parten los camiones recolectores.
Server	40	Representa cada negocio o punto de recolección que deben atenderse.
TimePath	41	Simula el camino que recorre el vehículo para trasladarse a cada negocio.
Sink	1	Simula el retorno de los camiones a la base cuando termina la jornada laboral.

3.4.3 Modelo en Simio de la Ruta Norte

El modelo resultante para la zona Norte se ilustra en la Figura 3.23, en su vista 2D. Como se aprecia, los puntos de recolección también presentan una mayor aglomeración, lo que puede dar indicios de obtener un mayor rango de optimización, ya que al eliminar retrasados el tiempo ahorrado puede permitir balancear esta zona.

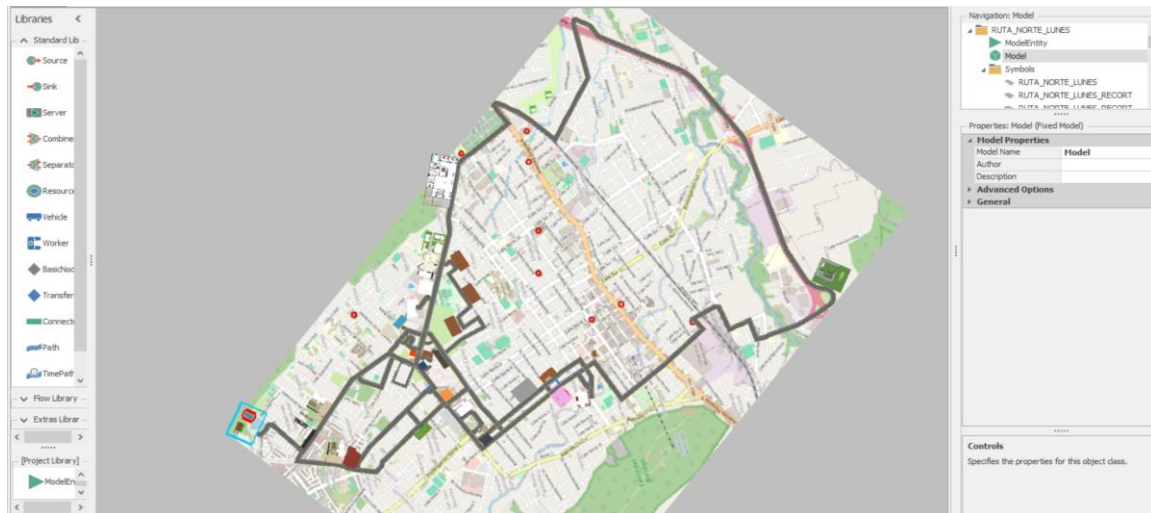


Figura 3.23 Vista 2D, modelo ruta Norte (Fuente: Elaboración propia)

La vista 3D de esta zona se presenta en la Figura 3.24, donde hay una mejor apreciación de los elementos gráficos.

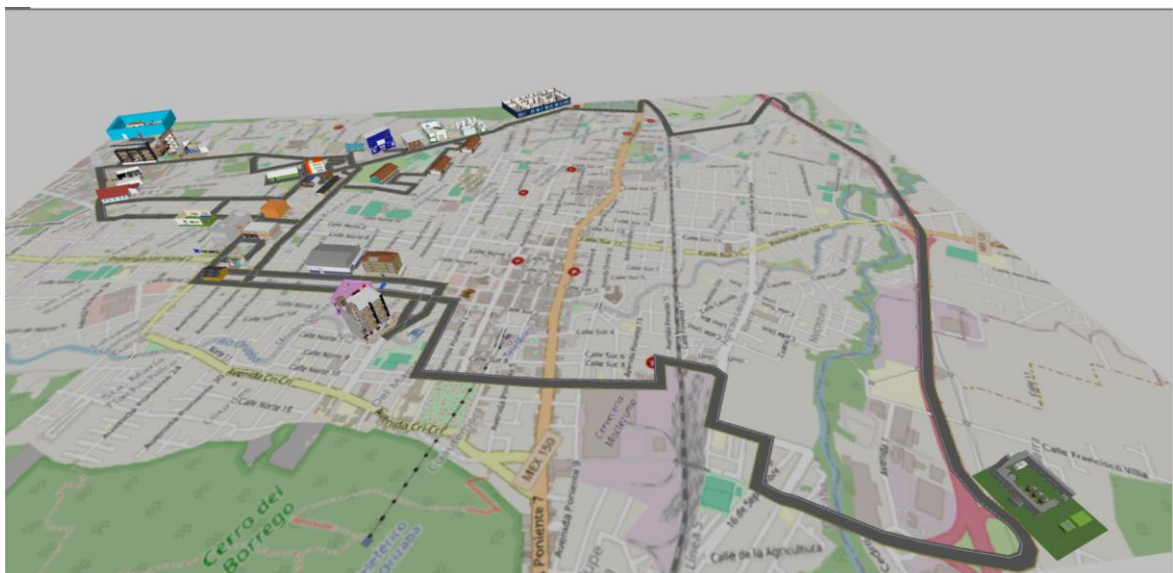


Figura 3.24 Vista 3D, modelo ruta Norte (Fuente: Elaboración propia)

El conteo de elementos que conforman este modelo se concentra en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Elementos del modelo ruta Norte (Fuente: Elaboración propia)

Tipo de objeto	Cantidad	Utilidad
Source	1	Simula la base (SERMUN) de donde parten los camiones recolectores.
Server	30	Representa cada negocio o punto de recolección que deben atenderse.
TimePath	31	Simula el camino que recorre el vehículo para trasladarse a cada negocio.
Sink	1	Simula el retorno de los camiones a la base cuando termina la jornada laboral.

Con una diferencia de 10 y 11 servicios con respecto a las zonas anteriores, la ruta Norte se puede considerar con una carga moderada, a reserva de lo que arroje el simulador al correrse.

3.4.4 Modelo en Simio de la Ruta Calle Real

La ruta encargada de los desechos generados principalmente en clínicas y hospitales se presenta en la Figura 3.25. Su proyección en 2D permite visualizar que las distancias que transita son mayores en comparación con las rutas mostradas, puesto que no solo abarca la ciudad de Orizaba, sino también los municipios de Río Blanco, Nogales y Mendoza.



Figura 3.25 Vista 2D, modelo ruta calle Real (Fuente: Elaboración propia)

Esto es importante considerar cuando se ejecute el modelo para analizar cómo impacta en el porcentaje de utilización, ya que no por tener menor cantidad de puntos de recolección indica que tenga tiempo excedente. Por su parte, la Figura 3.26 permite ver con mayor claridad el efecto animado que se dio a estos servicios. Siendo Orizaba la zona que mayor número de servicios concentra, por ello el nombre designado a la ruta.



Figura 3.26 Vista 3D, modelo ruta calle Real (Fuente: Elaboración propia)

En cuanto al extracto del número de objetos empleados, la Tabla 3.10 muestra los resultados.

Tabla 3.10 Elementos del modelo ruta calle Real (Fuente: Elaboración propia)

Tipo de objeto	Cantidad	Utilidad
Source	1	Simula la base (SERMUN) de donde parten los camiones recolectores.
Server	29	Representa cada negocio o punto de recolección que deben atenderse.
TimePath	30	Simula el camino que recorre el vehículo para trasladarse a cada negocio.
Sink	1	Simula el retorno de los camiones a la base cuando termina la jornada laboral.

3.4.5 Modelo en Simio de la Ruta Orgánica

Finalmente, la Figura 3.27 expone el modelo construido para la zona Orgánica, es decir, para la ruta designada a recolectar mayormente desechos que se descomponen naturalmente. Si esta imagen se utiliza como primera aproximación, es evidente que es la ruta con el menor número de servicios, aunque tiene una mayor dispersión geográfica.



Figura 3.27 Vista 2D, modelo ruta Orgánica (Fuente: Elaboración propia)

La Figura 3.28 muestra la vista en tercera dimensión de varios puntos de recolección que conforman este modelo.



Figura 3.28 Vista 3D, modelo ruta Orgánica (Fuente: Elaboración propia)

La Tabla 3.11 sintetiza los elementos del entorno simulado. Con respecto a las demás zonas, efectivamente, esta ruta es la que cuenta con el menor número de servicios. Aunque abarca un amplio radio de distancia, permanece dentro de los límites de la ciudad, lo que incrementa las posibilidades de lograr una optimización significativa.

Tabla 3.11 Elementos del modelo ruta Orgánica (Fuente: Elaboración propia)

Tipo de objeto	Cantidad	Utilidad
Source	1	Simula la base (SERMUN) de donde parten los camiones recolectores.
Server	16	Representa cada negocio o punto de recolección que deben atenderse.
TimePath	17	Simula el camino que recorre el vehículo para trasladarse a cada negocio.
Sink	1	Simula el retorno de los camiones a la base cuando termina la jornada laboral.

A partir de la información recopilada, se puede verificar que los modelos desarrollados operan conforme a lo previsto.

3.5 Ejecución de pruebas piloto

La ejecución de pruebas piloto permite detectar errores en la lógica o codificación del modelo, verificar que su comportamiento sea coherente con el sistema real, ajustar parámetros y obtener resultados iniciales del modelo de simulación que permitan usarlo como base en su proceso de validación. Cabe mencionar que no existe alguna fórmula o método predefinido que permita calcular el número óptimo de corridas piloto, por lo que arbitrariamente se eligieron 15, de las cuales, enseguida se presentan sus resultados.

La Figura 3.29 muestra los resultados preliminares del modelo para la zona Sur, con un tiempo promedio en sistema de 8.57 horas, lo cual es un valor muy cercano al tiempo del sistema real. Sin embargo, es indispensable validar el modelo y realizar análisis adicionales para sustentar conclusiones confiables.

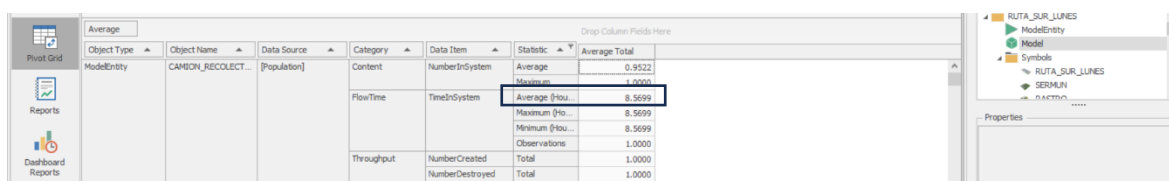


Figura 3.29 Resultados de 15 corridas piloto del modelo ruta Sur (Fuente: Elaboración propia)

En el caso de la Figura 3.30, expone los resultados para el modelo de la zona Centro, donde se tiene un tiempo promedio en sistema de 8.11 horas, igualmente similar al entorno real.

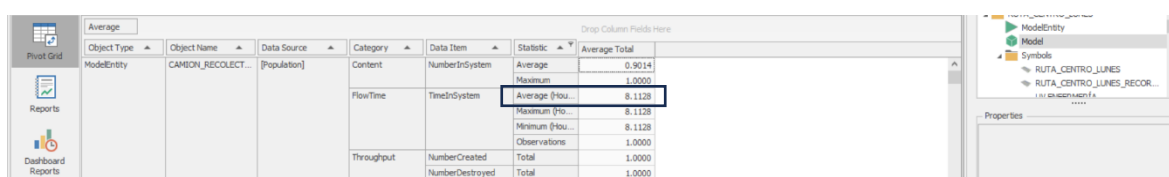


Figura 3.30 Resultados de 15 corridas piloto del modelo ruta Centro (Fuente: Elaboración propia)

Por su parte, la Figura 3.31 muestra un tiempo promedio en sistema de 9.07 horas para la zona Norte. Si bien es un valor próximo al del recorrido real, al ser un tiempo que supera el turno laboral, se refuerza la necesidad de validar el modelo para asegurar la consistencia de los resultados. Esta ruta es ejemplo de lo que se venía comentando sobre falsas suposiciones que se pueden tener, al pensar que entre menos servicios, menor tiempo de utilización.

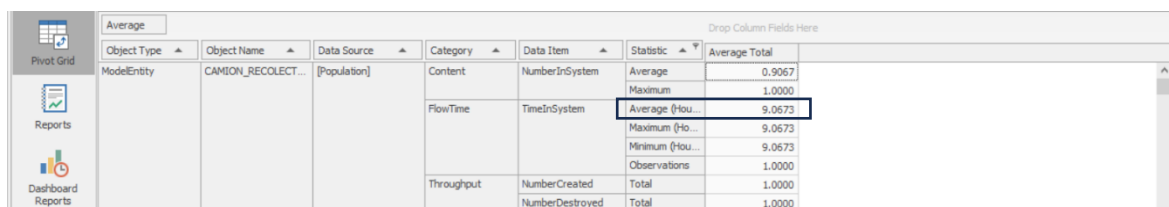


Figura 3.31 Resultados de 15 corridas piloto del modelo ruta Norte (Fuente: Elaboración propia)

En cuanto a la Figura 3.32, esta presenta los datos obtenidos para modelo correspondiente a la ruta calle Real, con un tiempo promedio en sistema de 11.51 horas. Estas corridas reflejan la situación actual, con un excedente de casi 3 horas de trabajo, atribuible principalmente al tiempo que implica trasladarse hasta el relleno sanitario y a las características de algunos servicios como el Hospital General de Orizaba, el cual presenta un tiempo promedio de servicio de 90 minutos.

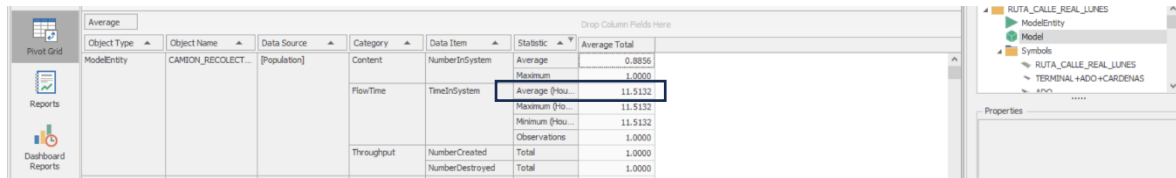


Figura 3.32 Resultados 15 corridas piloto del modelo ruta calle Real (Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, la Figura 3.33 muestra los valores generados para la ruta Orgánica. El modelo refleja un tiempo promedio en sistema de 8.45 horas.

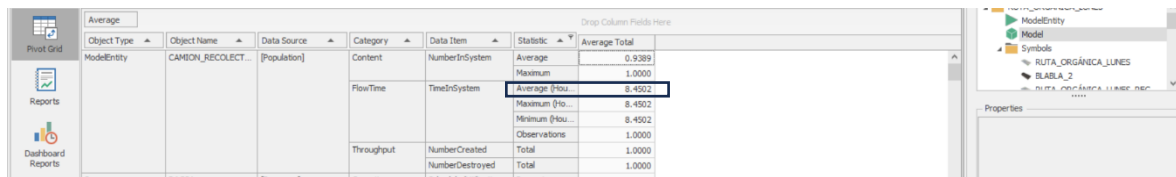


Figura 3.33 Resultados 15 corridas piloto del modelo ruta Orgánica (Fuente: Elaboración propia)

Tras finalizar las 15 corridas piloto por cada uno de los 5 modelos de simulación, se ha observado que los resultados reflejan la realidad. Sin embargo, es necesario validar el modelo, no solo a simple vista, como ya se hizo, sino también mediante pruebas estadísticas poderosas que comprueben su validez.

3.6 Validación del modelo programado

La validación es una etapa crítica en la metodología de simulación, ya que permite comprobar que el comportamiento del modelo representa adecuadamente al sistema real. Autores como Barrales V. et al.(2004) destacan su relevancia, subrayando que elegir el método apropiado para realizarla es fundamental para garantizar resultados confiables.

En este estudio, la validación se efectuó a través dos métodos: el MSE (Error Cuadrático Medio) y la prueba estadística t-pareada. El primero calcula el promedio de las diferencias entre los datos reales y los valores estimados, elevando dichas diferencias al cuadrado para evitar que los errores positivos y negativos se anulen entre sí al sumarlos (Bi et al., 2019). En cuanto a la prueba t-pareada, a partir de una base de datos integrada por los resultados de las corridas piloto (Y_j) y los datos observados directamente del sistema real (X_j), se realiza una prueba de hipótesis estadística, basada en la Ecuación 3.1 y Ecuación 3.2:

$$H_0: \mu_x = \mu_y \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$H_1: \mu_x \neq \mu_y \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Como explican Solís Galán et al. (2017), la hipótesis nula se rechaza si el intervalo de confianza obtenido no contiene el valor cero, lo que indicaría una diferencia estadísticamente significativa entre las medias, y por tanto, que el modelo de simulación no es válido. En cambio, si el intervalo incluye al cero, no se rechaza la hipótesis nula, sugiriendo que no existen diferencias significativas y, por ende, el modelo adecuadamente refleja la realidad.

Con base en lo anterior, se aplicará la prueba t-pareada, utilizando las Ecuación 2.4 a la Ecuación 2.7, con un nivel de significancia del 5%, valor comúnmente aceptado en estudios estadísticos por su equilibrio entre confiabilidad y riesgo de error tipo I. Como medida de desempeño se evaluará el *Tiempo promedio en sistema*, ya que refleja el objetivo de reducir el tiempo de traslado del camión. Este indicador resulta adecuado, ya que puede verse influido por variables controlables, como el orden de visita a los puntos de recolección o la elección de caminos que minimicen distancias y se eviten recorridos innecesarios.

La hipótesis nula e hipótesis alternativa se definen a continuación:

H_0 : la media del tiempo promedio en el sistema obtenida por el modelo de simulación no presenta una diferencia significativa respecto a la media del tiempo promedio en el sistema observada en el comportamiento real.

H_1 : la media del tiempo promedio en el sistema obtenida por el modelo de simulación sí presenta una diferencia significativa respecto a la media del tiempo promedio en el sistema observada en el comportamiento real.

Dado que se construyó un modelo por cada ruta que integra el programa de Servicios Especializados, tanto el MSE como la prueba t-pareada deben aplicarse en cada caso, teniendo como propósito verificar que cada uno de los entornos simulados refleje con precisión el comportamiento del sistema real que representa.

3.6.1 Validación del modelo de la Ruta Sur

La Tabla 3.12 presenta la comparación entre los datos reales del tiempo promedio en el sistema real y los valores obtenidos a través de la simulación. Cabe mencionar que la columna de valores reales fue proporcionada por el jefe del departamento.

Con dicha información, se calculó la diferencia, obteniéndose la columna correspondiente al error (e). Seguidamente, cada uno de estos errores fue elevado al cuadrado, conformando la última columna (e^2). Por último, de esta columna se obtuvo el promedio, dando como resultado el valor de la celda resaltada en color amarillo. Este valor al ser muy cercano a cero indica un alto grado de exactitud, dado que las diferencias entre los valores simulados y reales son mínimas. Esto sugiere que el modelo representa adecuadamente el comportamiento del sistema real en términos del tiempo promedio en el sistema.

Tabla 3.12 Validación del MSE, ruta Sur (Fuente: Elaboración propia)

N°	Tiempo promedio en el sistema		Validación MSE	
	Real	Simio	e	e^2
1	8.7201	8.7164	0.0037	0.0000137
2	8.8043	8.8138	-0.0095	0.0000903
3	8.8471	8.8386	0.0085	0.0000722
4	8.709	8.7119	-0.0029	0.0000084
5	8.7412	8.7386	0.0026	0.0000068
6	8.7824	8.7742	0.0082	0.0000672
7	8.6902	8.6957	-0.0055	0.0000302
8	8.7961	8.8049	-0.0088	0.0000774
9	8.8254	8.8278	-0.0024	0.0000058
10	8.8807	8.8729	0.0078	0.0000608
11	8.7603	8.7658	-0.0055	0.0000302
12	8.7408	8.7429	-0.0021	0.0000044
13	8.7153	8.7089	0.0064	0.0000410
14	8.7911	8.7849	0.0062	0.0000384
15	8.7795	8.7756	0.0039	0.0000152
Total				0.0005622
MSE				0.0000375

Para establecer una conclusión más sólida sobre la validez del modelo, se continuará con la aplicación de la prueba t-pareada. La Tabla 3.13 concentra los datos principales, donde (X_j) representa los datos reales y la columna (Y_j) los valores obtenidos del simulador.

Tabla 3.13 Datos para prueba t-pareada, ruta Sur (Fuente: Elaboración propia)

Corridas	X_j	Y_j	$Z_j = X_j - Y_j$	$(Z_j - \bar{Z}_{15})^2$
1	8.7201	8.7164	0.0037	0.00000896
2	8.8043	8.8138	-0.0095	0.00010418
3	8.8471	8.8386	0.0085	0.00006074
4	8.709	8.7119	-0.0029	0.00001301
5	8.7412	8.7386	0.0026	0.00000358
6	8.7824	8.7742	0.0082	0.00005615
7	8.6902	8.6957	-0.0055	0.00003852
8	8.7961	8.8049	-0.0088	0.00009038
9	8.8254	8.8278	-0.0024	0.00000965
10	8.8807	8.8729	0.0078	0.00005032
11	8.7603	8.7658	-0.0055	0.00003852
12	8.7408	8.7429	-0.0021	0.00000788
13	8.7153	8.7089	0.0064	0.00003241
14	8.7911	8.7849	0.0062	0.00003018
15	8.7795	8.7756	0.0039	0.00001020
Total				0.00055467
Promedio	8.7722333	8.7715267	0.000706667	

Sustituyendo las fórmulas correspondientes de la prueba t:

$$\hat{var}[\bar{Z}_{(n)}] = \frac{\sum_{i=1}^n [Z_i - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n(n-1)} = \frac{0.00055467}{15(14)} = 0.000002641286$$

Con un intervalo de confianza de $(100-(1-\alpha))$:

$$\begin{aligned} & \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\hat{var}[\bar{Z}_{(n)}]} \\ & 0.000706667 \pm t_{14, 0.025} \sqrt{0.000002641286} \\ & 0.000706667 \pm 2.1448 \sqrt{0.000002641286} \\ & 0.000706667 \pm 0.00348574 \\ & (-0.0027791, 0.0041924) \end{aligned}$$

Con un nivel de confianza del 95% y dada la evidencia muestral, como el intervalo incluye al cero, no se rechaza la hipótesis nula. Esto permite concluir que la diferencia promedio entre los tiempos del sistema real y el modelo de simulación no es estadísticamente significativa, por lo que el modelo de la ruta Sur es válido para análisis posteriores.

La validación para el resto de los modelos se basa en las mismas operaciones ya descritas, por lo que, para el resto de las rutas, la explicación de los procedimientos será más concisa,

enfocándose principalmente en la interpretación de los resultados y en determinar si el modelo supera o no dichas pruebas.

3.6.2 Validación del modelo de la Ruta Centro

La Tabla 3.14 presenta los resultados del MSE, así como los datos usados para aplicar la prueba t. Dada la baja magnitud del primer método, permite que el modelo supere este filtro. Por lo que el paso siguiente corresponde a la aplicación de la prueba t-pareada.

Tabla 3.14 MSE y datos para prueba t-pareada, ruta Centro (Fuente: Elaboración propia)

N°	Tiempo promedio en el sistema		Validación MSE		Corridas	X _j	Y _j	Z _j = X _j - Y _j	(Z _j - $\bar{Z}_{15}$) ²
	Real	Simio	e	e ²					
1	8.1365	8.135	0.0015	0.0000023	1	8.1365	8.135	0.0015	0.00000063
2	8.2585	8.2923	-0.0338	0.0011424	2	8.2585	8.2923	-0.0338	0.00119071
3	8.2271	8.2258	0.0013	0.0000017	3	8.2271	8.2258	0.0013	0.00000035
4	8.0892	8.0862	0.003	0.0000090	4	8.0892	8.0862	0.003	0.00000526
5	8.1123	8.1128	-0.0005	0.0000003	5	8.1123	8.1128	-0.0005	0.00000146
6	8.1401	8.1411	-0.001	0.0000010	6	8.1401	8.1411	-0.001	0.00000291
7	8.2606	8.1997	0.0609	0.0037088	7	8.2606	8.1997	0.0609	0.00362324
8	8.2164	8.2149	0.0015	0.0000023	8	8.2164	8.2149	0.0015	0.00000063
9	8.1619	8.1628	-0.0009	0.0000008	9	8.1619	8.1628	-0.0009	0.00000258
10	8.2917	8.2906	0.0011	0.0000012	10	8.2917	8.2906	0.0011	0.00000015
11	8.1162	8.1175	-0.0013	0.0000017	11	8.1162	8.1175	-0.0013	0.00000403
12	8.0957	8.0976	-0.0019	0.0000036	12	8.0957	8.0976	-0.0019	0.00000679
13	8.0343	8.0338	0.0005	0.0000003	13	8.0343	8.0338	0.0005	0.00000004
14	8.2368	8.2406	-0.0038	0.0000144	14	8.2368	8.2406	-0.0038	0.00002031
15	8.2257	8.2116	0.0141	0.0001988	15	8.2257	8.2116	0.0141	0.00017938
			Total	0.0050885	Total				0.00503848
			MSE	0.0003392	Promedio	8.1735333	8.17082	0.002713333	

Al aplicar las fórmulas correspondientes a la prueba t, se obtiene lo siguiente:

$$\hat{Var}[\bar{Z}_{(n)}] = \frac{\sum_{i=1}^n [Z_i - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n(n-1)} = \frac{0.00503848}{15(14)} = 0.000023993$$

Con un intervalo de confianza de (100-(1-α):

$$\begin{aligned} & \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\hat{Var}[\bar{Z}_{(n)}]} \\ & 0.002713333 \pm t_{14, 0.025} \sqrt{0.000023993} \\ & 0.002713333 \pm 2.1448 \sqrt{0.000023993} \\ & 0.002713333 \pm 0.0105058 \\ & (-0.0077925, 0.0132191) \end{aligned}$$

Dado un 95% de confianza y la información proporcionada por la muestra, como el intervalo incluye al cero, no se rechaza la hipótesis nula. Al no haber diferencia estadísticamente significativa, el modelo para la zona Centro también se considera válido.

3.6.3 Validación del modelo de la Ruta Norte

El lado izquierdo de la Tabla 3.15 concentra los resultados del cálculo del MSE, el cual dio un valor de 0.0001414, lo que significa que la diferencia promedio al cuadrado entre los tiempos reales y los simulados es muy pequeña.

Tabla 3.15 MSE y datos para prueba t-pareada, ruta Norte (Fuente: Elaboración propia)

N°	Tiempo promedio en el sistema		Validación MSE		Corridas	X _j	Y _j	Z _j = X _j - Y _j	(Z _i - Z ₁₅) ²
	Real	Simio	e	e ²					
1	9.0985	9.1149	-0.0164	0.0002690	1	9.1085	9.1149	-0.0064	0.00005050
2	9.1481	9.1387	0.0094	0.0000884	2	9.1481	9.1387	0.0094	0.00007557
3	9.1089	9.1254	-0.0165	0.0002723	3	9.1089	9.1254	-0.0165	0.00029607
4	9.0593	9.0511	0.0082	0.0000672	4	9.0593	9.0511	0.0082	0.00005615
5	9.0701	9.0673	0.0028	0.0000078	5	9.0701	9.0673	0.0028	0.00000438
6	9.075	9.0977	-0.0227	0.0005153	6	9.075	9.0977	-0.0227	0.00054787
7	9.1296	9.1242	0.0054	0.0000292	7	9.1296	9.1242	0.0054	0.00002203
8	9.0984	9.1017	-0.0033	0.0000109	8	9.0984	9.1017	-0.0033	0.00001605
9	9.0737	9.0995	-0.0258	0.0006656	9	9.0737	9.0995	-0.0258	0.00070260
10	9.1405	9.1349	0.0056	0.0000314	10	9.1405	9.1349	0.0056	0.00002394
11	9.0262	9.03	-0.0038	0.0000144	11	9.0262	9.03	-0.0038	0.00002031
12	9.0597	9.0628	-0.0031	0.0000096	12	9.0597	9.0628	-0.0031	0.00001449
13	9.0329	9.0257	0.0072	0.0000518	13	9.0329	9.0257	0.0072	0.00004216
14	9.0581	9.0523	0.0058	0.0000336	14	9.0581	9.0523	0.0058	0.00002594
15	9.0559	9.0633	-0.0074	0.0000548	15	9.0559	9.0633	-0.0074	0.00006572
Total				0.0021213	Total				0.00196381
MSE				0.0001414	Promedio	9.0829933	9.0859667	-0.00297333	

En cuanto a la prueba t-pareada:

$$\hat{Var}[\bar{Z}_{(n)}] = \frac{\sum_{i=1}^n [Z_i - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n(n-1)} = \frac{0.00196381}{15(14)} = 0.0000093515$$

Con un intervalo de confianza de (100-(1-α)):

$$\begin{aligned} & \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\hat{Var}[\bar{Z}_{(n)}]} \\ & -0.0029733 \pm t_{14, 0.025} \sqrt{0.0000093515} \\ & -0.0029733 \pm 2.1448 \sqrt{0.0000093515} \\ & -0.0029733 \pm 0.00655885 \\ & (-0.009532, 0.003585) \end{aligned}$$

Asumiendo un nivel de confianza del 95% y dados los resultados muestrales, al incluirse el cero en el intervalo, no se rechaza la hipótesis nula. Por consiguiente, el modelo es válido para representar adecuadamente el comportamiento del sistema real para la ruta Norte.

3.6.4 Validación del modelo de la Ruta Calle Real

Los datos para validar el modelo de los servicios de esta zona se presentan en la Tabla 3.16. En la primera prueba, el MSE arrojó un valor de 0.0009588. Como primera aproximación, esto indica que el modelo es adecuado. Sin embargo, se deben analizar los resultados de la prueba estadística t-pareada para robustecer la validación del modelo.

Tabla 3.16 MSE y datos prueba t-pareada, ruta calle Real (Fuente: Elaboración propia)

N°	Tiempo promedio en el sistema		Validación MSE		Corridas	X _j	Y _j	Z _j = X _j - Y _j	(Z _j - $\bar{Z}_{15}$) ²
	Real	Simio	e	e ²					
1	11.5095	11.5491	-0.0396	0.0015682	1	11.5095	11.5491	-0.0396	0.00162463
2	11.5834	11.5667	0.0167	0.0002789	2	11.5834	11.5667	0.0167	0.00025579
3	11.6588	11.5731	0.0857	0.0073445	3	11.6588	11.5731	0.0857	0.00722387
4	11.4926	11.4697	0.0229	0.0005244	4	11.4926	11.4697	0.0229	0.00049254
5	11.5301	11.5132	0.0169	0.0002856	5	11.5301	11.5132	0.0169	0.00026222
6	11.5483	11.5262	0.0221	0.0004884	6	11.5483	11.5262	0.0221	0.00045767
7	11.5457	11.5585	-0.0128	0.0001638	7	11.5457	11.5585	-0.0128	0.00018243
8	11.5125	11.5352	-0.0227	0.0005153	8	11.5125	11.5352	-0.0227	0.00054787
9	11.4982	11.5242	-0.026	0.0006760	9	11.4982	11.5242	-0.026	0.00071325
10	11.6083	11.5884	0.0199	0.0003960	10	11.6083	11.5884	0.0199	0.00036838
11	11.4709	11.4591	0.0118	0.0001392	11	11.4709	11.4591	0.0118	0.00012306
12	11.5189	11.4953	0.0236	0.0005570	12	11.5189	11.4953	0.0236	0.00052410
13	11.4458	11.4698	-0.024	0.0005760	13	11.4458	11.4698	-0.024	0.00061042
14	11.5117	11.4928	0.0189	0.0003572	14	11.5117	11.4928	0.0189	0.00033100
15	11.4886	11.5112	-0.0226	0.0005108	15	11.4886	11.5112	-0.0226	0.00054320
Total				0.0143813	Total				0.01426044
MSE				0.0009588	Promedio	11.52822	11.522167	0.006053333	

Sustituyendo valores:

$$\hat{var}[\bar{Z}_{(n)}] = \frac{\sum_{i=1}^n [Z_i - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n(n-1)} = \frac{0.01426044}{15(14)} = 0.0000679$$

Con un intervalo de confianza de (100-(1-α):

$$\begin{aligned} & \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\hat{var}[\bar{Z}_{(n)}]} \\ & 0.006053 \pm t_{14, 0.025} \sqrt{0.0000679} \\ & 0.006053 \pm 2.1448 \sqrt{0.0000679} \\ & 0.006053 \pm 0.0176735 \\ & (-0.0116205, 0.02373) \end{aligned}$$

A un nivel de confianza del 95% y de acuerdo con la evidencia estadística, dado que el intervalo incluye al cero, no se rechaza la hipótesis nula. Esto significa que el modelo para la zona Norte representa adecuadamente el comportamiento del sistema real.

3.6.5 Validación del modelo de la Ruta Orgánica

Finalmente, se realizó el cálculo del MSE y la prueba t para el caso de la ruta encargada de recolectar los desechos orgánicos. En la Tabla 3.17 se muestra un valor de 0.0006087 para el error cuadrático medio.

Tabla 3.17 MSE y datos prueba t-pareada, ruta Orgánica (Fuente: Elaboración propia)

N°	Tiempo promedio en el sistema		Validación MSE		Corridas	X _j	Y _j	Z _j = X _j - Y _j	(Z _j - $\bar{Z}_{15}$) ²
	Real	Simio	e	e ²					
1	8.4521	8.4676	-0.0155	0.0002402	1	8.4521	8.4676	-0.0155	0.00026266
2	8.5242	8.488	0.0362	0.0013104	2	8.5242	8.488	0.0362	0.00125978
3	8.4375	8.4645	-0.027	0.0007290	3	8.4375	8.4645	-0.027	0.00076766
4	8.4489	8.4273	0.0216	0.0004666	4	8.4489	8.4273	0.0216	0.00043653
5	8.4721	8.4502	0.0219	0.0004796	5	8.4721	8.4502	0.0219	0.00044916
6	8.4004	8.4309	-0.0305	0.0009302	6	8.4004	8.4309	-0.0305	0.00097386
7	8.4975	8.4712	0.0263	0.0006917	7	8.4975	8.4712	0.0263	0.00065502
8	8.466	8.4438	0.0222	0.0004928	8	8.466	8.4438	0.0222	0.00046196
9	8.4373	8.4632	-0.0259	0.0006708	9	8.4373	8.4632	-0.0259	0.00070791
10	8.4927	8.4694	0.0233	0.0005429	10	8.4927	8.4694	0.0233	0.00051046
11	8.4132	8.3996	0.0136	0.0001850	11	8.4132	8.3996	0.0136	0.00016624
12	8.4321	8.4673	-0.0352	0.0012390	12	8.4321	8.4673	-0.0352	0.00128929
13	8.4137	8.3987	0.015	0.0002250	13	8.4137	8.3987	0.015	0.00020430
14	8.4738	8.4511	0.0227	0.0005153	14	8.4738	8.4511	0.0227	0.00048371
15	8.4139	8.3936	0.0203	0.0004121	15	8.4139	8.3936	0.0203	0.00038390
Total				0.0091307	Total				0.00901242
MSE				0.0006087	Promedio	8.4516933	8.44576	0.005933333	

Como complemento para la validación, se continua con el desarrollo de las fórmulas para la segunda prueba, teniendo:

$$\hat{Var}[\bar{Z}_{(n)}] = \frac{\sum_{i=1}^n [Z_i - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n(n-1)} = \frac{0.00901242}{15(14)} = 0.00004292$$

Con un intervalo de confianza de (100-(1- α)):

$$\begin{aligned} & \bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\hat{Var}[\bar{Z}_{(n)}]} \\ & 0.005933 \pm t_{14, 0.025} \sqrt{0.00004292} \\ & 0.005933 \pm 2.1448 \sqrt{0.00004292} \\ & 0.005933 \pm 0.014051 \\ & (-0.00812, 0.01998) \end{aligned}$$

Según la evidencia obtenida y un nivel de confianza del 95% se concluye que el modelo de la ruta Orgánica es válido, ya que el intervalo incluye al cero. Por consiguiente, evaluados los cinco modelos, estos se pueden utilizar para continuar con el estudio.

3.7 Diseño de experimentos

Esta fase tiene como propósito principal analizar el comportamiento del sistema simulado mediante experimentación, no solo para validar su funcionamiento, sino también para generar información que permita proponer mejoras. Adicionalmente, busca determinar el número óptimo de replicaciones, lo cual es fundamental para garantizar que los resultados sean estadísticamente representativos y confiables, minimizando la variabilidad asociada a la aleatoriedad del modelo.

La expresión utilizada para determinar el número óptimo de replicaciones se presenta en la Ecuación 3.3:

$$n * (\beta) = \min \left\{ i \geq n: t_{i-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S^2(n)}{i}} \leq \beta \right\} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

En este sentido, se estableció un error absoluto (β) de 0.02 horas, salvo para la ruta Orgánica, a la cual se le asignó el valor de 0.01 horas. Esta decisión se sustentó en el análisis de la varianza de los tiempos promedio en cada zona. En cuanto al nivel de confianza, se fijó en 95%. La medida de desempeño se mantiene, siendo el tiempo promedio en el sistema. Cabe mencionar que, se deberá realizar el cálculo del número de corridas óptimas para cada uno de los modelos.

La Tabla 3.18 muestra los resultados al utilizar la fórmula de la Ecuación 3.3. Se observa que el número óptimo de corridas varía según la ruta: 28 para la ruta Sur, 55 para la ruta Centro, 15 para la ruta Norte, 17 para Calle Real y 33 para la ruta Orgánica. Dado que los modelos son independientes, cada uno podrá correrse el número de veces que se obtuvo.

Tabla 3.18 Concentrado de resultados corridas piloto (Fuente: Elaboración propia)

Corridas	Zonas				
	Sur	Centro	Norte	Real	Orgánica
1	8.7164	8.135	9.1149	11.5491	8.4676
2	8.8138	8.2923	9.1387	11.5667	8.488
3	8.8386	8.2258	9.1254	11.5731	8.4645
4	8.7119	8.0862	9.0511	11.4697	8.4273
5	8.7386	8.1128	9.0673	11.5132	8.4502
6	8.7742	8.1411	9.0977	11.5262	8.4309
7	8.6957	8.1997	9.1242	11.5585	8.4712
8	8.8049	8.2149	9.1017	11.5352	8.4438
9	8.8278	8.1628	9.0995	11.5242	8.4632
10	8.8729	8.2906	9.1349	11.5884	8.4694
11	8.7658	8.1175	9.03	11.4591	8.3996
12	8.7429	8.0976	9.0628	11.4953	8.4673
13	8.7089	8.0338	9.0257	11.4698	8.3987
14	8.7849	8.2406	9.0523	11.4928	8.4511
15	8.7756	8.2116	9.0633	11.5112	8.3936
S^2	0.0026	0.0054	0.0013	0.0015	0.0008
β	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01
α	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
$i=10$	0.0365	0.0526	0.0258	0.0277	0.0202
$i=15$	0.0282	0.0407	0.02	0.0214	0.0157
$i=17$	0.0262	0.0378	0.0185	0.0199	0.0145
$i=20$	0.0239	0.0344	0.0169	0.0181	0.0132
$i=25$	0.021	0.0303	0.0149	0.016	0.0117
$i=26$	0.0206	0.0297	0.0146	0.0156	0.0114
$i=27$	0.0202	0.0291	0.0143	0.0153	0.0112
$i=28$	0.0198	0.0285	0.014	0.015	0.011
$i=30$		0.0274		0.0145	0.0106
$i=33$		0.0261		0.0137	0.01
$i=55$		0.0199			
$i=54$		0.0201			

3.8 Ejecución de simulaciones

Para ejecutar las corridas que se determinaron en el paso anterior, Simio cuenta con una sección enfocada al diseño de experimentos. En ella es posible definir el número de corridas, configurar las variables de entrada que se desean analizar, y especificar las respuestas o medidas de desempeño que se evaluarán. Además, permite automatizar la ejecución de múltiples escenarios para facilitar el análisis estadístico y la comparación de resultados, optimizando así el proceso de simulación y toma de decisiones.

En ese orden de ideas, enseguida se detalla cómo se realizó el diseño de experimentos para cada ruta.

3.8.1 Ejecución de simulaciones Ruta Sur

Como se observa en la Figura 3.34, la pestaña *Project Home* es donde se puede crear un experimento. Al hacer clic sobre la opción *New Experiment* aparece el escenario, donde se podrá modificar el número de réplicas requeridas. Para el caso de la zona Sur, se estableció

en la celda de la columna *Required* el valor de 28. Asimismo, al situarnos en la ventana de propiedades del experimento, este se renombró como *Experimento_Ruta_Sur*.

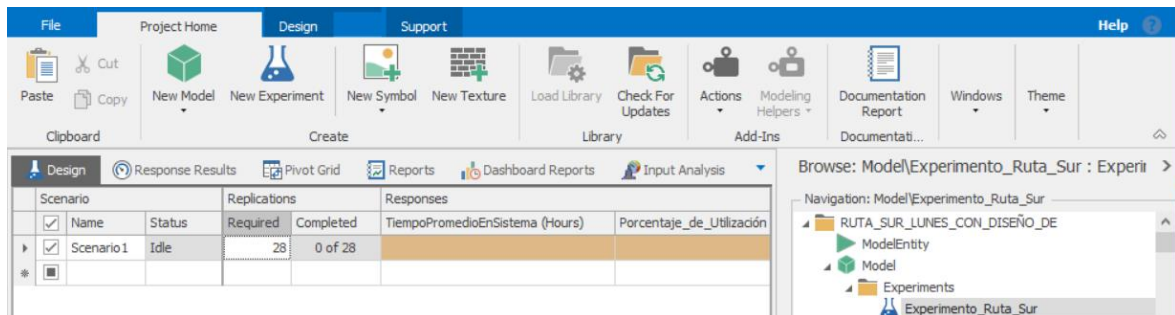


Figura 3.34 Sección Project Home en Simio (Fuente: Elaboración propia)

Con respecto a la columna *TiempoPromedioEnSistema*, se trata de una *Response*. Esta es una medida de desempeño utilizada para evaluar el comportamiento del sistema durante el experimento. Como lo que se desea evaluar es el tiempo promedio que pasa el camión en el sistema, se le asignó ese nombre. Sin embargo, esto no es suficiente para contabilizar el tiempo de recorrido, por lo que fue necesario usar un *State Variable* para capturar el tiempo de entrada y un *Tally* en el Sink, para registrar y acumular el tiempo que estuvo la entidad en el sistema. Enseguida se detallan las acciones realizadas:

1. En el ambiente model entity (al ser una característica que se asociará a la entidad), se accedió a la pestaña *Definitions* y se creó una variable de tipo real, a la cual se le asignó el nombre *TiempoInicio*. Esto se ilustra en la Figura 3.35.

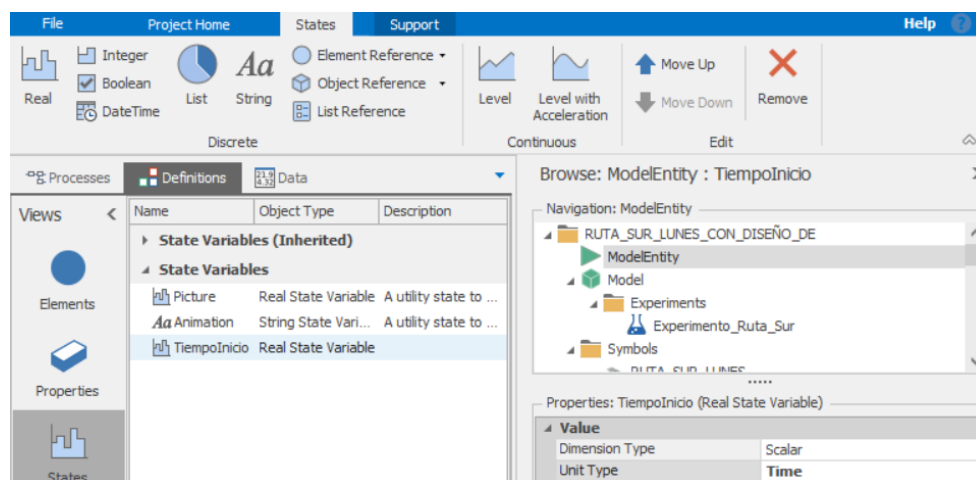


Figura 3.35 Creación de variable *TiempoInicio* (Fuente: Elaboración propia)

- En el nodo Output@SERMUN, en la opción *State Assignments -On Entering-* se añadió una asignación cuya programación se observa en la Figura 3.36. Con ello, la variable *TiempoInicio* registrará el tiempo exacto en que la model entity entra al sistema.

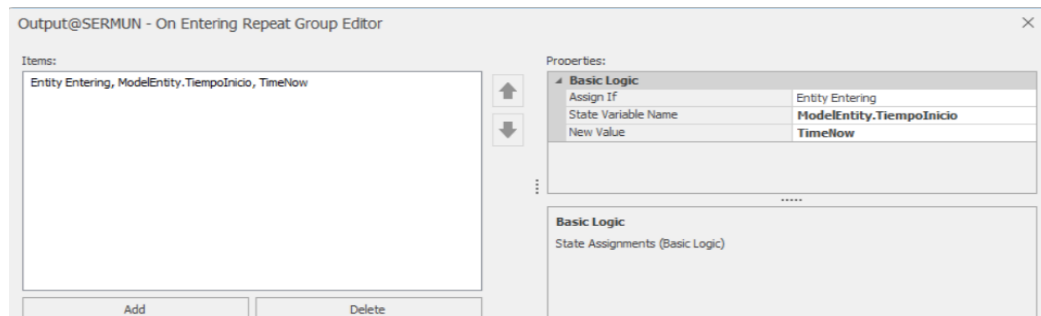


Figura 3.36 Asignación de *TiempoInicio* a la model entity (Fuente: Elaboración propia)

- En el ambiente del modelo, se creó un Tally llamado *Tally_TiempoEnSistema*. Esta opción se encuentra en la pestaña *Definitions*, tal como se ilustra en la Figura 3.37. Esto permitirá registrar el tiempo total que la entidad permanece en el sistema. Dentro de la programación de este elemento, se estableció *Time* como su tipo de unidad, ya que lo que se almacenará será el tiempo.

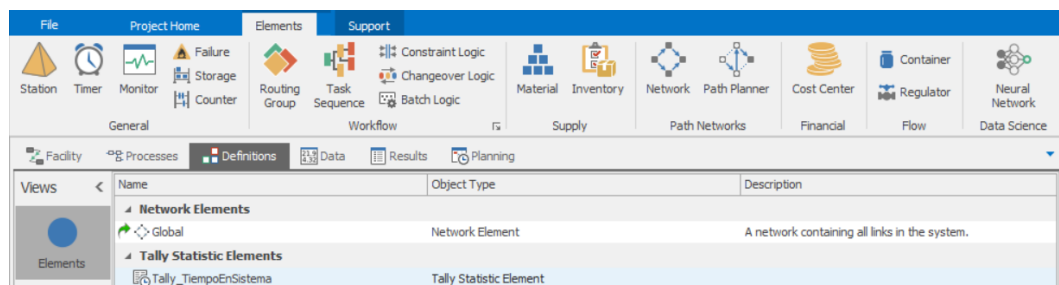


Figura 3.37 Creación de *Tally_TiempoEnSistema* (Fuente: Elaboración propia)

- Una vez creado el Tally, es necesario indicar en qué punto del recorrido se registrará la medida de desempeño. Para ello, en el nodo de entrada del Sink (SERMUN), dentro de la sección *Tally Statistics -On Entering-*, se programó la asignación mostrada en la Figura 3.38. Esta configuración permite calcular el tiempo total en el sistema de la *ModelEntity*, restando el tiempo final de la simulación menos la hora en que ingresó el camión recolector al modelo. Por esta razón se utilizan palabras clave propias del entorno Simio, como *TimeNow* y *ModelEntity.TiempoInicio*.

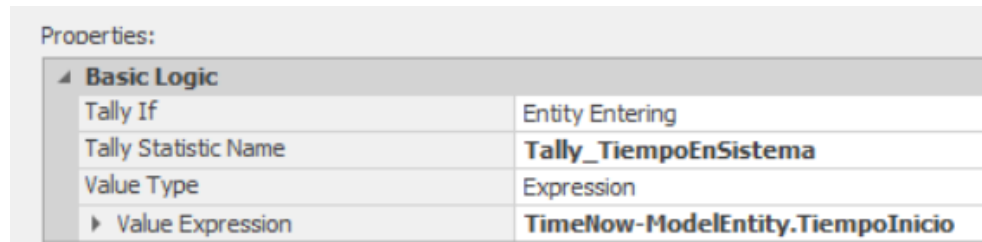


Figura 3.38 Creación de Tally_TiempoEnSistema (Fuente: Elaboración propia)

- Finalmente, la response se configuró conforme a lo mostrado en la Figura 3.39, utilizando la expresión *Tally_TiempoEnSistema.Average*.

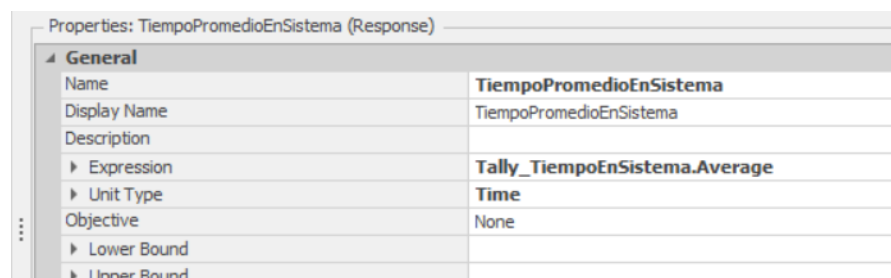


Figura 3.39 Programación final TiempoPromedioEnSistema (Fuente: Elaboración propia)

Ahora bien, con referente a la columna *Porcentaje de Utilización*, se trata de otra response que evaluará la eficiencia de la medida de desempeño anterior, en términos de porcentaje. Por consiguiente, solo se trata de dividir el promedio del Tally ya creado entre las horas que dura la jornada laboral y luego, multiplicar dicho resultado por 100. La programación se muestra en la Figura 3.40.

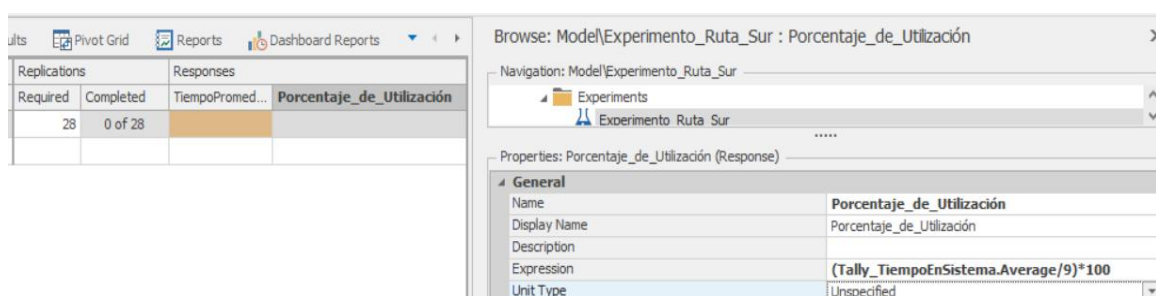
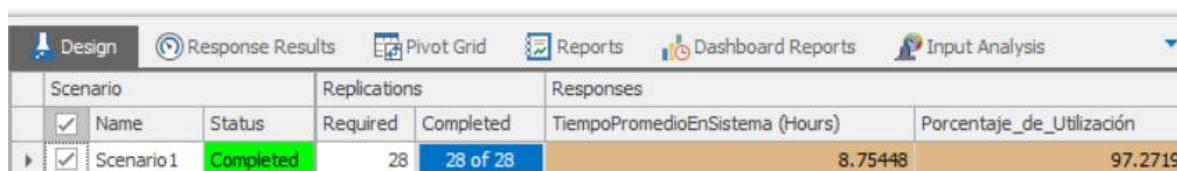


Figura 3.40 Programación de la response Porcentaje_de_Utilización (Fuente: Elaboración propia)

Programado lo anterior, se prosiguió a correr el experimento, de acuerdo a lo planeado. Los resultados que reporta la propia interfaz de la pestaña *Design* se presentan en la Figura 3.41, limitándose solo a presentar las variables de interés.

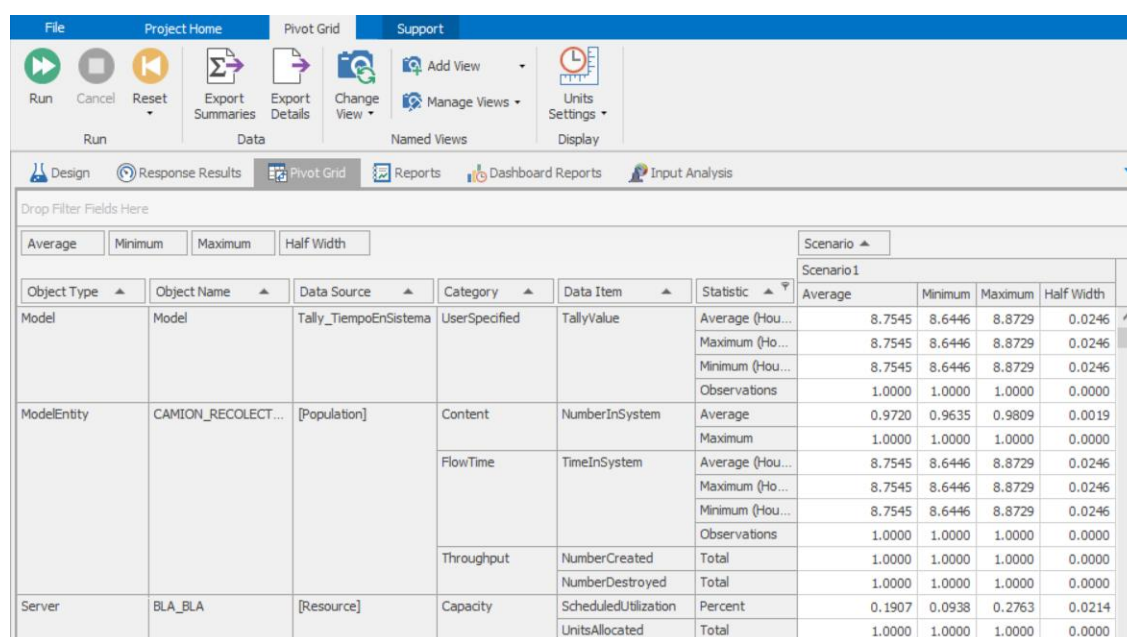


Scenario		Replications		Responses
☒	Name	Status	Required	Completed
☒	Scenario 1	Completed	28	28 of 28

Responses	
TiempoPromedioEnSistema (Hours)	Porcentaje_de_Utilización
8.75448	97.2719

Figura 3.41 Resultados experimento ruta Sur, pestaña Design (Fuente: Elaboración propia)

Si se desea un análisis de los demás objetos del modelo, la sección *Pivot Grid* permite un estudio más detallado. Esto se visualiza en la Figura 3.42.



Object Type	Object Name	Data Source	Category	Data Item	Statistic	Average	Minimum	Maximum	Half Width
Model	Model	Tally_TiempoEnSistema	UserSpecified	TallyValue	Average (Hou...	8.7545	8.6446	8.8729	0.0246
					Maximum (Ho...	8.7545	8.6446	8.8729	0.0246
					Minimum (Hou...	8.7545	8.6446	8.8729	0.0246
					Observations	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000
ModelEntity	CAMION_RECOLECT...	[Population]	Content	NumberInSystem	Average	0.9720	0.9635	0.9809	0.0019
					Maximum	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000
			FlowTime	TimeInSystem	Average (Hou...	8.7545	8.6446	8.8729	0.0246
					Maximum (Ho...	8.7545	8.6446	8.8729	0.0246
					Minimum (Hou...	8.7545	8.6446	8.8729	0.0246
					Observations	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000
			Throughput	NumberCreated	Total	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000
				NumberDestroyed	Total	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000
Server	BLA_BLA	[Resource]	Capacity	ScheduledUtilization	Percent	0.1907	0.0938	0.2763	0.0214
				UnitsAllocated	Total	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000

Figura 3.42 Resultados experimento ruta Sur, pestaña Pivot Grid (Fuente: Elaboración propia)

Con los resultados presentados se da por concluida esta etapa para la ruta Sur. En el caso de los modelos restantes, se aplicó la misma lógica de programación. Por ello, las siguientes secciones se enfocan en la interpretación de los datos generados tras ejecutar cada modelo el número de veces establecido.

3.8.2 Ejecución de simulaciones Ruta Centro

La configuración del experimento para la ruta Centro se muestra en la Figura 3.43. En este caso, el número de réplicas requeridas son 55. De igual modo, con respecto a las propiedades del experimento, se está trabajando con un 95% de nivel de confianza, tal como se definió.

Scenario	Name	Status	Replications Required	Replications Completed	Responses TiempoPromedioEnSistema (Hours)	Responses Porcentaje_de_Utilización
Scenario 1	Scenario 1	Completed	55	55 of 55	8.18058	90.8954

Figura 3.43 Resultados experimento ruta Centro, pestaña Design (Fuente: Elaboración propia)

3.8.3 Ejecución de simulaciones Ruta Norte

En la Figura 3.44 se presentan las propiedades y resultados del experimento para la ruta Norte, donde el número de corridas establecido fue de 15.

Scenario	Name	Status	Replications Required	Replications Completed	Responses TiempoPromedioEnSistema (Hours)	Responses Porcentaje_de_Utilización
Scenario 1	Scenario 1	Completed	15	15 of 15	9.08994	100.999

Figura 3.44 Resultados experimento ruta Norte, pestaña Design (Fuente: Elaboración propia)

3.8.4 Ejecución de simulaciones Ruta Calle Real

Para el caso del experimento para la ruta calle Real, la Figura 3.45 muestra su configuración. En este se establecieron 17 corridas, de acuerdo con lo planeado.

Scenario	Name	Status	Replications Required	Replications Completed	Responses TiempoPromedioEnSistema (Hours)	Responses Porcentaje_de_Utilización
Scenario 1	Scenario 1	Completed	17	17 of 17	11.5227	128.029

Figura 3.45 Resultados experimento ruta calle Real, pestaña Design (Fuente: Elaboración propia)

3.8.5 Ejecución de simulaciones Ruta Orgánica

Finalmente, la Figura 3.46 muestra el valor obtenido para el tiempo promedio en el sistema, a partir de las 33 corridas que se determinó debería correrse esta ruta.

Scenario	Name	Status	Replications Required	Completed	Responses TiempoPromedioEnSistema ...	Porcentaje_de_Utilización
Scenario 1		Completed	33	33 of 33	8.45356	93.9285

Analysis	
Warm-up Period	0
Default Replications	10
Confidence Level	95%

Figura 3.46 Resultados experimento ruta Orgánica, pestaña Design (Fuente: Elaboración propia)

3.9 Análisis de los datos de salida y Documentación e implementación de resultados

La Tabla 3.19 presenta un resumen de los resultados para cada una de las rutas evaluadas bajo el sistema actual, considerando el tiempo promedio en sistema, el porcentaje de utilización respecto a una jornada laboral estándar de 9 horas y el nivel de confianza correspondiente.

Tabla 3.19 Resultados por cada ruta (Fuente: Elaboración propia)

Ruta	Corridas	Tiempo promedio en Sistema (horas)	Porcentaje de Utilización	Nivel de confianza
Sur	28	8.7545	97.27%	95%
Centro	55	8.1806	90.90%	
Norte	15	9.0899	101.00%	
Calle Real	17	11.5527	128.36%	
Orgánica	33	8.4536	93.93%	

En este sentido, se observa que las rutas Sur, Centro y Orgánica se encuentran dentro del límite de la jornada laboral, con porcentajes de utilización de 97.27%, 90.90% y 93.93% respectivamente. Estos valores indican un uso adecuado del tiempo operativo disponible desde un enfoque técnico; sin embargo, también es importante señalar que estos niveles de utilización, al estar cercanos o superiores al 90%, reflejan una alta exigencia sobre los operarios.

En sistemas donde interviene el factor humano, un porcentaje de utilización mayor al 85–90% puede considerarse como señal de sobrecarga laboral inminente, ya que deja poco margen para imprevistos, pausas necesarias o recuperación física. Por tanto, aunque estas rutas aún se mantienen dentro del rango permitido, se consideran mejorables, pues operar constantemente cerca del 100% puede generar fatiga, disminuir la productividad a lo largo del tiempo, y aumentar el riesgo de errores o accidentes.

En contraste, para los recorridos que superan el umbral de la jornada laboral, la ruta calle Real representa el caso más crítico, con un tiempo promedio en sistema de 11.55 horas y un porcentaje de utilización del 128.36%, lo cual evidencia una sobrecarga operativa considerable. Este resultado coincide con lo previsto debido a que muchos de sus servicios implican tiempos de recolección prolongados. Además, algunas distancias son considerables al extenderse fuera del radio de la ciudad de Orizaba, aunado al tiempo que implica trasladarse hasta el relleno sanitario y disponer de los desechos.

Estas variaciones evidencian áreas de oportunidad para optimizar la planeación de los servicios, especialmente en las rutas con mayores tiempos en sistema.

Capítulo 4

Alternativas de mejora

Este capítulo presenta las propuestas de mejora para el sistema en estudio. Dado que la optimización de las rutas se orienta a minimizar la principal medida de desempeño que es el tiempo total de recorrido, considerando que el porcentaje de utilización actual es elevado y, en algunas zonas, incluso supera la capacidad máxima en términos de duración de la jornada laboral, se aplicará el Algoritmo del Agente Viajero (TSP) para determinar los trayectos que minimicen las distancias. Posteriormente, con apoyo de otras herramientas, se estimarán los tiempos de trayecto y se simularán los escenarios resultantes.

Esto tiene como finalidad evaluar cómo responde la principal medida de desempeño y proponer un diseño eficiente para cada ruta que integra el programa de recolección especializado, basado en métodos cuantitativos y confiables. De esta manera, se busca sustituir el diseño empírico de rutas, que hasta ahora se ha basado en la experiencia operativa, por un enfoque sistemático respaldado por herramientas de optimización, lo que permitirá una toma de decisiones más precisa, objetiva y sustentada en evidencia.

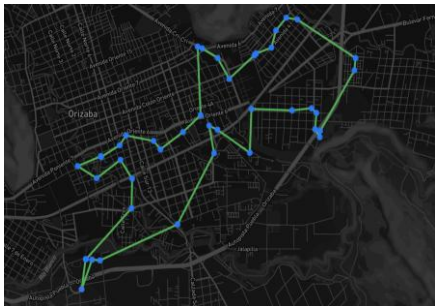
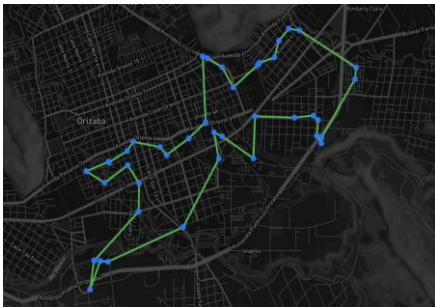
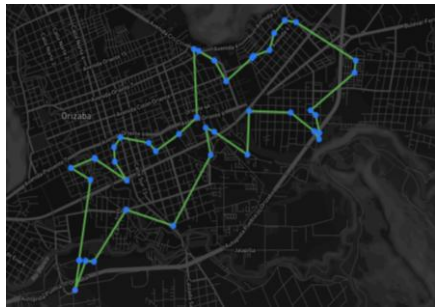
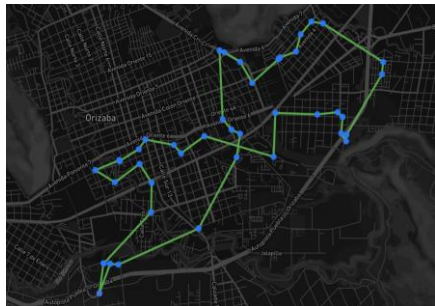
En este sentido, para comprender cómo se obtuvieron las propuestas para el nuevo diseño de las rutas, se detallarán todas las actividades realizadas para la zona Sur. Para las restantes solo se mostrará la información más relevante, ya que se basan en las mismas herramientas y metodología.

4.1 Optimización de la Ruta Sur

Como primer paso, empleando el software TSPVIS, se ubicaron los servicios que conforman esta ruta. Una vez que se abarcaron todos estos, se aplicó cada uno de los 12 métodos con los que cuenta el programa mencionado, recordando la sugerencia que se indica en la misma interfaz: aplicar un algoritmo de construcción seguido de uno de mejora. Los resultados se muestran en la Tabla 4.1, los cuales se ordenaron de menor a mayor distancia recorrida, incluyéndose las ilustraciones de los recorridos.

Cabe mencionar que solo se utilizaron los primeros 8 métodos del TSPVIS. Los últimos 4 no pudieron aplicarse, debido al tiempo de corrida requerido, el cual se hizo infinito debido a la gran cantidad de nodos o servicios.

Tabla 4.1 Resultados algoritmo TSP ruta Sur (Fuente: Elaboración propia)

Método	Tiempo de corrida (seg)	Distancia (km)	Recorrido
Two Opt Inversión	18	16.24	
Two Opt Inversion Reciprocal Exchange	18	16.24	
Convex Hull	4	16.31	
Simulated Annealing	58	16.48	

Método	Tiempo de corrida (seg)	Distancia (km)	Recorrido
Nearest Neighbor	4	17.73	
Nearest insertion	4	21.03	
Furthest insertion	4	25.20	
Arbitrary insertion	4	25.83	
Depth First Search	Infinito, no terminan las iteraciones.		-
Random			-
Branch and Bound Cost & Cost, Crossings			-

De acuerdo con los datos de la tabla anterior, se eligió el recorrido sugerido por el método Two Opt Inversión, al presentar la menor distancia. Aunque coincidió con el Two Opt

Inversión Reciprocal Exchange, en la mayoría de los casos, el primero es mayormente utilizado al brindar soluciones eficientes con una menor complejidad que el segundo algoritmo.

Posteriormente, se identificó el orden de atención de los servicios que arrojó el algoritmo seleccionado. Con base en ello, se estimaron los tiempos de traslado entre cada par de nodos mediante la herramienta Google Maps, asignándoles una distribución uniforme. Asimismo, se incluyó un margen adicional desde un 20% hasta un 100% de tiempo, con el propósito de considerar posibles eventualidades, tales como congestión vehicular, obras viales u otras condiciones imprevistas que pudieran afectar la operación. La Tabla 4.2 concentra parte de la información que servirá para alimentar el modelo de la ruta Sur optimizada. Consulte el anexo 7 para ver la lista completa.

Tabla 4.2 Recorrido optimizado ruta Sur (Fuente: Elaboración propia)

Nº	Trayecto	Tiempo Maps (min)	Tiempo extra (min)	Tiempo Total (min)	TimePaths Random.Uniform (min,máx)
1	SERMUN-Rastro municipal	8	2	10	(9.5,10.5)
2	Rastro municipal-Plaza Faro	1	1	2	(1.5,2.5)
3	Plaza Faro-Farm. Guadalajara Sur 33	1	1	2	(1.5,2.5)
4	Farm. Guadalajara Sur 33-Santa Gertrudis	5	1	6	(5.5,6.5)
.	...	.	.	.	...
.	...	.	.	.	...
.	...	.	.	.	...
39	Esc. Carlos A. Carrillo-DIF	3	1	4	(3.5,4.5)
40	DIF-Harinera y Manufact. de Orizaba	1	1	2	(1.5,2.5)
41	Harinera y Manufact. de Orizaba-Past. Grisel Librado R.	4	1	5	(4.5,5.5)
42	Past. Grisel Librado R.-SERMUN	5	1	6	(5.5,6.5)

Con los datos anteriores, nuevamente se utilizó la aplicación Google Mymaps y se trazó la nueva ruta que se propone siga el camión recolector. La Figura 4.1 muestra una comparativa entre la ruta Sur actual (imagen superior) y la ruta Sur optimizada (imagen inferior).

Visualmente se aprecian los cambios en ciertos recorridos. Por ejemplo, los círculos punteados de color negro señalan recorridos que se hacen actualmente y, en el diseño propuesto, se eliminan. En contraste, los círculos rojos indican trayectos que no se realizan bajo la logística actual, pero que con el método de optimización aplicado se añadieron. Por

tanto, emitir una conclusión sobre la eficiencia de la nueva ruta basada en el análisis gráfico resultaría apresurado y carente del respaldo necesario. En consecuencia, el siguiente paso es simular el recorrido propuesto para el camión recolector mediante Simio, utilizando los tiempos establecidos en la Tabla 4.2.

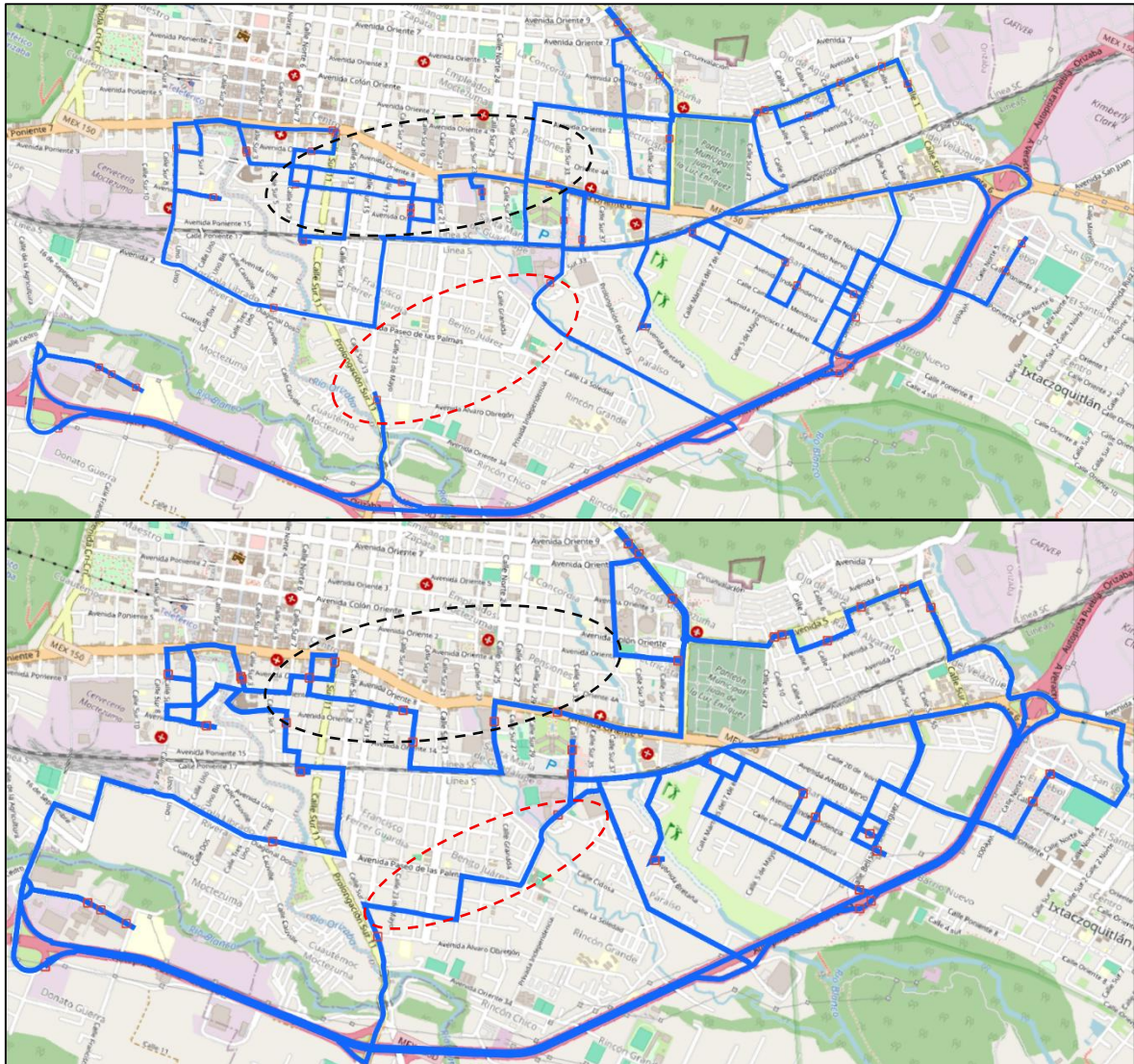


Figura 4.1 Comparativa ruta Sur actual (superior) vs ruta Sur optimizada (inferior) (Fuente: Elaboración propia)

Bajo el mismo método de trabajo que se empleó para la construcción de los modelos de las rutas actuales, la Figura 4.2 ilustra la vista bidimensional del modelo sugerido y mejorado para la ruta Sur.



Figura 4.2 Vista 2D del nuevo recorrido propuesto para la ruta Sur (Fuente: Elaboración propia)

Por su parte, la Figura 4.3 detalla el modelo en 3D, contribuyendo a la comprensión del entorno simulado y al análisis espacial de los desplazamientos.



Figura 4.3 Vista 3D del nuevo recorrido propuesto para la ruta Sur (Fuente: Elaboración propia)

Ahora bien, sin demeritar la importancia de la representación gráfica del sistema bajo estudio, la parte medular que sustentará esta propuesta es comprobar si la principal medida de desempeño logra reducirse. En este marco, los resultados tras correr el modelo de simulación se aprecian en la Figura 4.4, donde el *Tiempo Promedio en Sistema* arrojó un valor de 7.5118 horas, lo que representa un 83.46% de utilización. Esto significa una reducción de 1.2427 horas, con respecto al tiempo original, equivalente a un 14.19% de mejora.

Scenario		Replications		Responses	
Name	Status	Required	Completed	TiempoPromedioEnSistema ...	Porcentaje_de_Utilización
Scenario1	Comple	28	28 of 28	7.51175	83.4639

Navigation: Model\Experimento_Ruta_Sur_Optimizada

Model

Experiments

Experimento_Ruta_Sur_Optimizada

Figura 4.4 Resultados recorrido optimizado ruta Sur (Fuente: Elaboración propia)

Al comprobarse, a través de las corridas del modelo de simulación del recorrido propuesto que, efectivamente, se logra una reducción del tiempo que tarda el camión recolector en cubrir sus servicios, se presenta la Figura 4.5, como el diseño recomendado para la ruta Sur. En este contexto, el término diseño hace referencia a la secuencia en que deben atenderse los servicios o puntos de recolección.

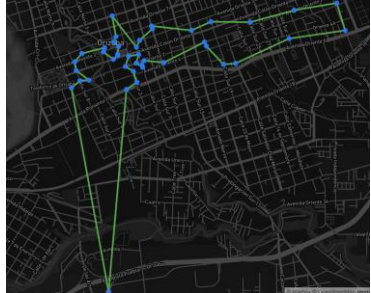
Servicios Especializados de Recolección de RSU Orizaba, Veracruz		
Diseño de ruta propuesto		
📍 Ruta: Sur		Algoritmo: TSP
📅 Día: Lunes		Método de solución: Two Opt Inversion
Indicador		
🕒 Tiempo promedio en el sistema optimizado	7.51 horas	
📊 Reducción en horas respecto al tiempo promedio en el sistema actual	1.24 horas	
✅ Porcentaje de mejora respecto al tiempo promedio en el sistema actual	13.81%	
Secuencia de atención		
1 Rastro municipal	23 Manufacturas Simón	
2 Plaza Faro	24 Llantera Rojo	
3 Farmacia Guadalajara Sur 33	25 FYPA	
4 Santa Gertrudis	26 Farmacia Guadalajara Ote. 2	
5 General de Seguros	27 Autohotel Paradise	
6 Escuela Felipe Suburbie	28 Quinta Escamela	
7 Jardín de niños Margarita Maza	29 Colate	
8 Parroquia Barrio Nuevo	30 Starbucks	
9 Holanda	31 Chedraui	
10 Las Gemelas lado A	32 Ceico preescolar	
11 Las Gemelas lado B	33 Abejitas	
12 Cedis Molinera de México	34 Bodega IMPS	
13 Empacadora Cianca	35 Hotel Trueba	
14 Filazinc	36 Hotel Haus	
15 Rovianda	37 CFE Ote. 8	
16 TIUSA	38 Guardería Nenitos	
17 Carnitas Cadena	39 Hotel Mirador	
18 Escuela Aztlán	40 Restaurante Bla Bla	
19 Jardín de niños Cri Cri	41 Escuela Carlos A. Carrillo	
20 Mezcladora Lucas	42 DIF	
21 Servicio Diez	43 Harinera y Manufacturera de Orizaba	
22 Framacia Guadalaiaara Ave. 5	44 Pastelería Grisel Librado Rivera	

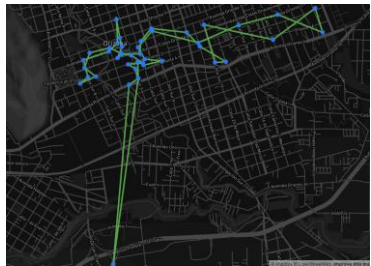
Figura 4.5 Recorrido optimizado propuesto, ruta Sur (Fuente: Elaboración propia)

4.2 Optimización de la Ruta Centro

Siguiendo las mismas operaciones, tras ubicar cada punto de recolección que conforma la ruta Centro, se aplicaron los mismos algoritmos que en el caso anterior obteniéndose la Tabla 4.3. Al compararse las distancias totales de cada enfoque, se selecciona el recorrido propuesto por el método Convex Hull, con un total de 10.85 km.

Tabla 4.3 Resultados algoritmo TSP ruta Centro (Fuente: Elaboración propia)

Método	Tiempo de corrida (seg)	Distancia (km)	Recorrido
Convex Hull	3	10.85	
Two Opt Inversion Y Two Opt Inversion Reciprocal Exchange	19	10.91	
Simulated Annealing	64	10.91	
Nearest Neighbor	3	12.98	

Método	Tiempo de corrida (seg)	Distancia (km)	Recorrido
Nearest insertion	3	13.59	
Furthest insertion	3	14.03	
Arbitrary insertion	3	14.55	

Parte de la secuencia de recolección, así como los tiempos y parámetros que alimentarán el modelo del diseño propuesto se exponen en la Tabla 4.4. Si se desea revisar la información completa, consúltase el anexo 8.

Tabla 4.4 Recorrido optimizado ruta Centro (Fuente: Elaboración propia)

Nº	Trayecto	Tiempo Maps (min)	Tiempo extra (min)	Tiempo Total (min)	TimePaths Random.Uniform (min,máx)
1	SERMUN-Coppel Madero	12	3	15	(14.5,15.5)
2	Coppel Madero-Soriana C. Real	8	2	10	(9.5,10.5)
3	Soriana C. Real- Rest Sugar y añadidos	11	3	14	(13.5,14.5)
.	...	.	.	.	...
.	...	.	.	.	...
.	...	.	.	.	...
39	Instituto Atenas-Grupo Anglo Francés	1	1	2	(1.5,2.5)
40	Grupo Anglo Francés-Scattola	3	1	4	(3.5,4.5)
41	Scattola-SERMUN	8	2	10	(9.5,10.5)

Continuando con el diseño de la alternativa propuesta para la ruta Centro, la Figura 4.6 detalla el recorrido a través de Mymaps. La parte superior muestra los traslados actuales que realiza el camión recolector, mientras que la imagen inferior corresponde al trayecto optimizado. Como se aprecia, hay una considerable reducción de desplazamientos, sin embargo, se debe evaluar el tiempo de permanencia que arroje el simulador para validar que realmente haya una mejora.

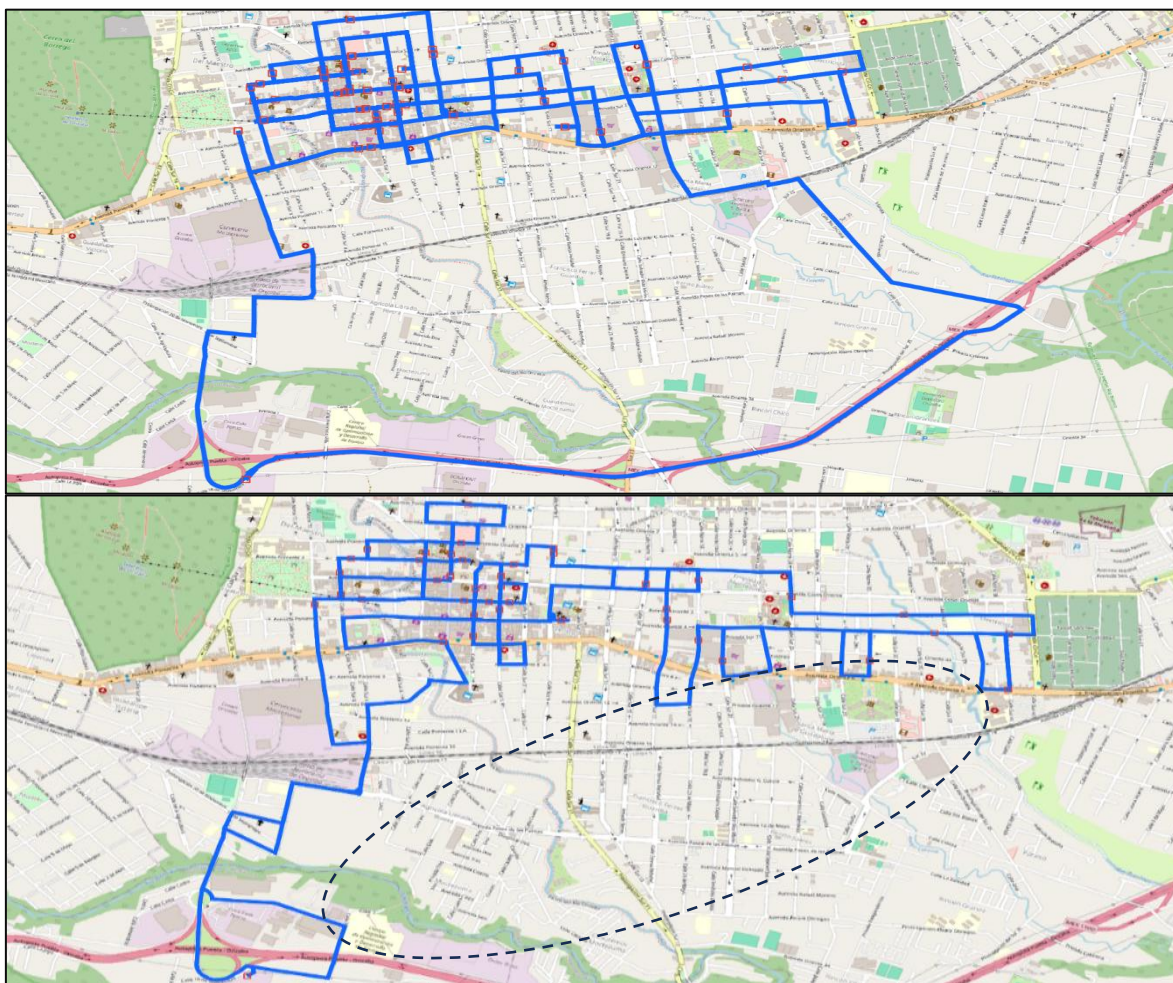


Figura 4.6 Comparativa ruta Centro actual (superior) vs ruta Centro optimizada (inferior) (Fuente: Elaboración propia)

En este sentido, se prosiguió a construir el modelo correspondiente basado en la misma lógica de programación. La finalidad de mantener esta estructura fue garantizar la consistencia entre los escenarios analizados y facilitar la comparación de resultados bajo condiciones homogéneas. Además, se cuidó que la secuencia de eventos y el

comportamiento del sistema reflejaran de forma precisa el orden propuesto por el algoritmo aplicado. El resultado se encuentra en la Figura 4.7, la cual ilustra la vista en tercera dimensión del entorno simulado.



Figura 4.7 Vista 3D del recorrido optimizado ruta Centro (Fuente: Elaboración propia)

Por último, la Figura 4.8 expone que tras correr el modelo, el *Tiempo Promedio en Sistema* a través del método Convex Hull, dio un valor de 7.3902 horas, equivalente al 82.11%. Es decir, se logran reducir 0.79036 horas (47.42 minutos) con relación al tiempo original que tarda el vehículo en operación, representando un 9.66% de mejora.

Design						
Scenario		Replications		Responses		
☒	Name	Status	Required	Completed	TiempoPromedioEnSistem...	Porcentaje_de_Utilización
☒	Scenario1	Comple...	55	55 of 55	7.39024	82.1138

Figura 4.8 Resultados recorrido optimizado ruta Centro (Fuente: Elaboración propia)

Al igual que en el caso anterior, tras confirmar la eficiencia de la alternativa propuesta por el TSPVIS, la Figura 4.9 muestra el orden de atención recomendado para la ruta Centro.

Servicios Especializados de Recolección de RSU		
Orizaba, Veracruz		
Diseño de ruta propuesto		
Ruta: Centro		Algoritmo: TSP
Día: Lunes		Método de solución: Convex Hull
Indicador		
🕒 Tiempo promedio en el sistema optimizado	7.39 horas	
📊 Reducción en horas respecto al tiempo promedio en el sistema actual	0.79 horas	
✅ Porcentaje de mejora respecto al tiempo promedio en el sistema actual	8.78%	
Secuencia de atención		
1 Coppel Madero	21 Panadería Los Angeles	
2 Soriana calle Real	22 Anexo Tortas Las Tradicionales	
3 Restaurante Sugar y añadidos	23 Pastelería Dauzón	
4 Juzgado 4º y Química Médica	24 CPO e Iglesia El Calvario	
5 Escuela Cultura y Progreso	25 Tortas Las de milanesa	
Salón Moctezuma y Banco Santander	26 Torre Telmex	
7 Iglesia del Carmén	27 Farmacia Guadalajara Colón	
8 Coyametla	28 Grupo Tortas: Mexicanas, Orizabeñas, La Gran Torta	
9 Cometra	29 Catedral y Veana	
10 Hotel Holiday Inn	30 Carnicería El Jarocho	
11 Nussa	31 Carnicerías Grijalva y Tortas Las Tradicionales	
12 Guardería Peques	32 Museo de Arte, Mercado de Artesanías y Jugos California	
13 Manitas que trabajan	33 Palacio de Hierro, Vertiche y CCP	
14 Panadería Ara	34 ISECF	
15 FYMSSSA	35 La Casona	
16 Los antojos del Fogón	36 Palacio Municipal	
17 Facultad de enfermería	37 Clínica El Buen Pastor	
18 Sanatorio Colón	38 Instituto Atenas	
19 CEUG	39 Grupo Anglo (Kinder y Primaria)	
20 Guardería Chiquitines	40 Scattola	

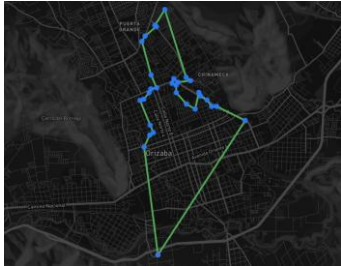
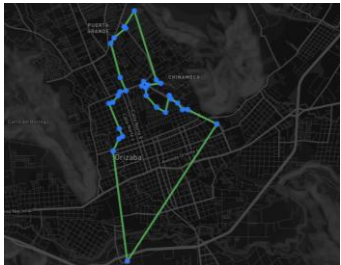
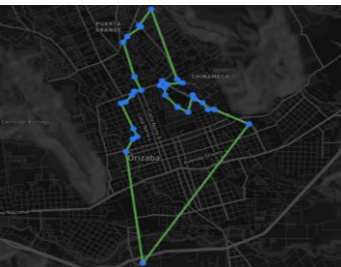
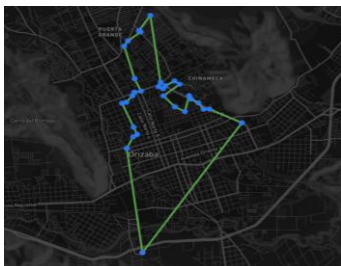
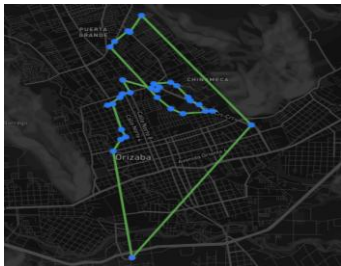
Figura 4.9 Recorrido optimizado propuesto, ruta Centro (Fuente: Elaboración propia)

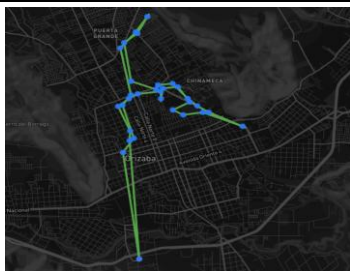
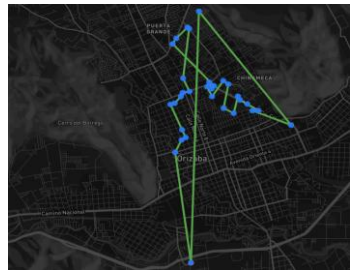
4.3 Optimización de la Ruta Norte

La Tabla 4.5 presenta los datos obtenidos tras la aplicación del TSPVIS. En ella se identifica que los métodos *Simulated Annealing*, *Two Opt Inversión* y *Two Opt Inversion Reciprocal Exchange*, alcanzaron la misma distancia óptima, diferenciándose en el tiempo de cómputo.

Por tanto, se elige el algoritmo Two Opt Inversion Reciprocal Exchange para la presente ruta, al ofrecer un equilibrio óptimo entre precisión y velocidad de procesamiento.

Tabla 4.5 Resultados algoritmo TSP ruta Norte (Fuente: Elaboración propia)

Método	Tiempo de corrida (seg)	Distancia (km)	Recorrido
Two Opt Inversion Reciprocal Exchange	10	15.08	
Two Opt Inversión	30	15.08	
Simulated Annealing	64	15.08	
Convex Hull	2	15.20	
Nearest Neighbor	2	17.37	

Método	Tiempo de corrida (seg)	Distancia (km)	Recorrido
Nearest insertion	2	18.12	
Furthest insertion	2	20.39	
Arbitrary insertion	2	23	

La Tabla 4.6 incluye parte de los parámetros que alimentarán a cada TimePath en el simulador. Si se desea consultar la información de todos los trayectos, considere el anexo 9.

Tabla 4.6 Recorrido optimizado ruta Norte (Fuente: Elaboración propia)

Nº	Trayecto	Tiempo Maps (min)	Tiempo extra (min)	Tiempo Total (min)	TimePaths Random.Uniform (min,máx)
1	SERMUN-Est. de Policía	11	13	24	(23.5,24.5)
2	Inspección de policía-UGM	3	1	4	(3.5,4.5)
3	UGM-Kinder Nino	4	1	5	(4.5,5.5)
.	...	.	.	.	...
.	...	.	.	.	...
.	...	.	.	.	...
29	Esc. Gómez Izquierdo-Pastelería Mayita	1	2	3	(2.5,3.5)
30	Pastelería Mayita-Hotel del Río	3	21	24	(23.5,24.5)
31	Hotel del Río-SERMUN	12	13	25	(24.5,25.5)

De manera gráfica, la Figura 4.10 muestra la comparación entre el recorrido actual y el circuito obtenido mediante el algoritmo Two Opt Inversion Reciprocal Exchange.



Figura 4.10 Comparativa ruta Norte actual (superior) vs ruta Norte optimizada (inferior) (Fuente: Elaboración propia)

El modelo resultante de esta propuesta se aprecia en la Figura 4.11, donde se visualiza parte de los puntos de recolección que conforman esta zona.



Figura 4.11 Vista 3D del recorrido optimizado ruta Norte (Fuente: Elaboración propia)

Por lo que respecta al *Tiempo Promedio en Sistema*, en la Figura 4.12 se observa que el modelo arrojó un valor de 7.9406 horas, lo que representa un 88.23% de utilización. Con este método se logra reducir en un 12.64% el tiempo que tarda el vehículo en cubrir sus servicios y regresar a la base.

Scenario	Status	Replications	Responses
Name	Required	Completed	TiempoPromedioEnSistema ...
Scenario1	Comple	15	7.94063
		15 of 15	88.2292

Figura 4.12 Resultados recorrido optimizado ruta Norte (Fuente: Elaboración propia)

Al validarse que el recorrido propuesto para la ruta Norte, eficientiza el desempeño del sistema al reducirse el tiempo promedio de recorrido, la Figura 4.13 ilustra la secuencia óptima sugerida para la atención de los servicios.

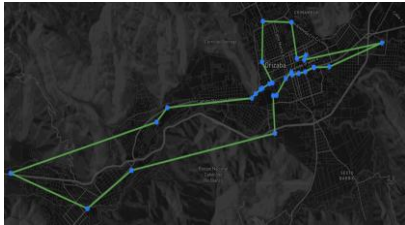
Servicios Especializados de Recolección de RSU Orizaba, Veracruz Diseño de ruta propuesto	
Ruta: Norte Día: Lunes	Algoritmo: TSP Método de solución: Two Opt Inversion Reciprocal Exchange
Indicador	
⌚ Tiempo promedio en el sistema optimizado	7.94 horas
📏 Reducción en horas respecto al tiempo promedio en el sistema actual	1.15 horas
✅ Porcentaje de mejora respecto al tiempo promedio en el sistema actual	12.77%
Secuencia de atención	
1 Inspección de policía	16 CDO Norte
2 UGM universidad	17 Panadería Flores
3 Kinder Nino	18 Ferretería El faro
4 Carne Mart	19 Abastecedora de Materiales del Centro
5 Fonda Las Gordas de Orizaba (Las tablitas)	20 Clínica de adicciones
6 Plaza Valle	21 IPE
7 Escuela primaria Ignacio Allende	22 Pollo El Sinaloense
8 Jardín de niños Rafael Delgado	23 Telmex Oriente 31
9 Escuela primaria Hermenegildo Galeana	24 Little Caesars
10 Jardín de niños Ignacio de la Llave	25 Carnicería Wendy
11 Gym Pluviosilla	26 Guardería Nenitos
12 Escuela primaria Úrsulo Galván	27 CUPRUM
13 Escuela primaria Ahuaializapan	28 Escuela Gómez Izquierdo
14 Jardín de niños Julio López Silva	29 Pastelería Mayita
15 Colegio Guillaumin	30 Hotel del Río

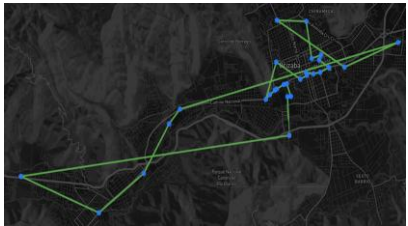
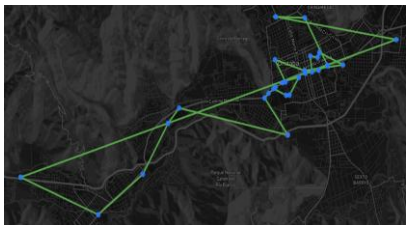
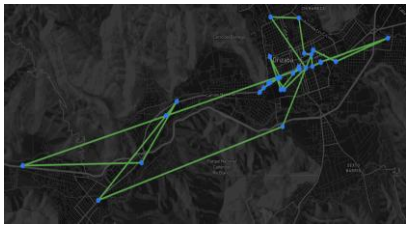
Figura 4.13 Recorrido optimizado propuesto, ruta Norte (Fuente: Elaboración propia)

4.4 Optimización de la Ruta Calle Real

Con base en la Tabla 4.7, nuevamente se elige el recorrido propuesto por el método Two Opt Inversion Reciprocal Exchange, al requerir un menor tiempo de cómputo y obtener la misma eficiencia que el algoritmo Two Opt Inversión.

Tabla 4.7 Resultados algoritmo TSP ruta calle Real (Fuente: Elaboración propia)

Método	Tiempo de corrida (seg)	Distancia (km)	Recorrido
Two Opt Inversion Reciprocal Exchange	8	38.31	
Two Opt Inversión	26	38.31	
Convex Hull	2	38.49	
Simulated Annealing	63	38.61	
Nearest insertion	2	44.35	

Método	Tiempo de corrida (seg)	Distancia (km)	Recorrido
Nearest Neighbor	2	44.5	
Furthest insertion	2	48.56	
Arbitrary insertion	2	55.78	

En relación con la secuencia que se deberá seguir, así como los tiempos y parámetros establecidos para construir el modelo, parte de la información se concentra en la Tabla 4.8. Para consultar la lista completa, revisar el anexo 10.

Tabla 4.8 Recorrido optimizado ruta calle Real (Fuente: Elaboración propia)

Nº	Trayecto	Tiempo Maps (min)	Tiempo extra (min)	Tiempo Total (min)	TimePaths Random.Uniform (min,máx)
1	SERMUN-Hospital Covadonga	9	2	11	(10.5,11.5)
2	Hosp. Covadonga-ADO	3	1	4	(3.5,4.5)
3	ADO-Sora	4	1	5	(4.5,5.5)
4	Sora-Yambo	5	1	6	(5.5,6.5)
.	...	.	.	.	...
.	...	.	.	.	...
.	...	.	.	.	...
28	UMF N°3-UMF N°4	8	2	10	(9.5,10.5)
29	UMF N°4-Relleno Sanitario	10	2	12	(11.5,12.5)
30	Relleno Sanitario-SERMUN	20	4	24	(23.5,24.5)

Al situar en el mapa cada punto de recolección se obtuvo la imagen inferior de la Figura 4.14, la cual ilustra el trayecto optimizado para esta ruta. La imagen superior corresponde al circuito actual para facilitar la comparación gráfica. Esto permite observar que la mayoría

de los servicios, sobre todo lo que salen del radio de la ciudad de Orizaba, no tuvieron modificaciones drásticas.

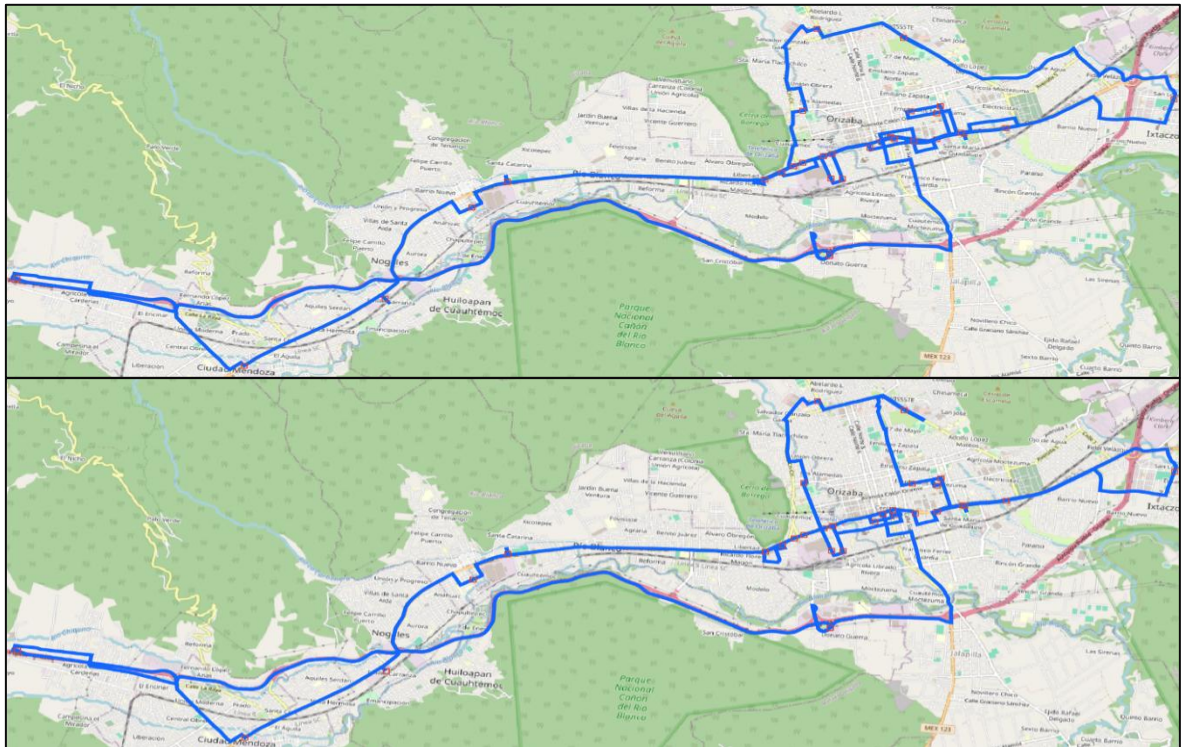


Figura 4.14 Comparativa ruta calle Real actual (superior) vs ruta calle Real optimizada (inferior) (Fuente: Elaboración propia)

Trasladado al simulador, el modelo resultante de esta alternativa se aprecia en la Figura 4.15.



Figura 4.15 Vista 3D del recorrido optimizado ruta calle Real (Fuente: Elaboración propia)

En cuanto a los resultados tras correr el modelo, estos se detallan en la Figura 4.16. Con un *Tiempo Promedio en Sistema* de 11.0464 horas, correspondiente a un 122.74% de

utilización. Con una disminución de 30.38 minutos (0.51 horas), esta alternativa logra mejorar el desempeño de la ruta en un 4.38% respecto al porcentaje de utilización actual. Aunque no es una mejora tan representativa como las que se han venido presentando, disminuir ese tiempo resulta atractivo considerando la complejidad de estos servicios.

Scenario		Replications		Responses	
Name	Status	Required	Completed	TiempoPromedioEnSistem...	Porcentaje_de_Utilización
Scenario 1	Comple...	17	17 of 17	11.0464	122.737

Figura 4.16 Resultados simulación ruta calle Real optimizada (Fuente: Elaboración propia)

Tras conocer los resultados anteriores, la propuesta de recorrido que se recomienda para el departamento de Limpia Pública en la ruta calle Real, se muestra en la Figura 4.17.

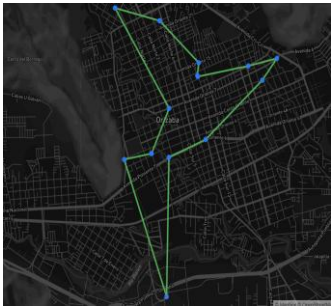
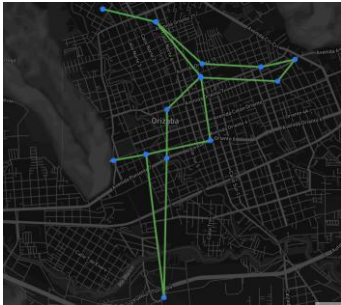
Servicios Especializados de Recolección de RSU Orizaba, Veracruz Diseño de ruta propuesto		
 Ruta: Calle Real	Algoritmo: TSP	
 Día: Lunes	Método de solución: Two Opt Inversion Reciprocal Exchange	
Indicador		
 Tiempo promedio en el sistema optimizado	11.05 horas	
 Reducción en horas respecto al tiempo promedio en el sistema actual	0.51 horas	
☒ Porcentaje de mejora respecto al tiempo promedio en el sistema actual	5.63%	
Secuencia de atención		
1 Hospital Covadonga	15 UMF N°7	
2 ADO	16 El pozolazo	
3 Sora	17 McDonalds	
4 Restaurante Yambo	18 La Braza Sur 11 y Dominos	
5 HGRO N°1	19 Unidad de Hemodiálisis Covadonga	
6 UMF N°5	20 Pollo El Sinaloense Pte. 7	
7 Braza Sur 29	21 Sanatorio Escudero	
8 Marisquería Los nuevos jarochos	22 Pollo Feliz	
9 Hospital Concordia	23 Centro de Seguridad Social (Casa de la Asegurada)	
10 Jurisdicción Sanitaria	24 Almacén delegacional IMSS	
11 UMF N°1	25 UMF N°2	
12 Centro de Capacitación IMSS	26 UMF N°3	
13 Oficina de quejas IMSS	27 UMF N°4	
14 Delegación IMSS	28 Relleno sanitario	

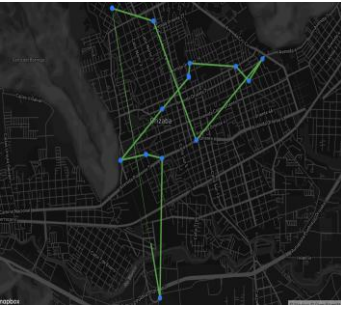
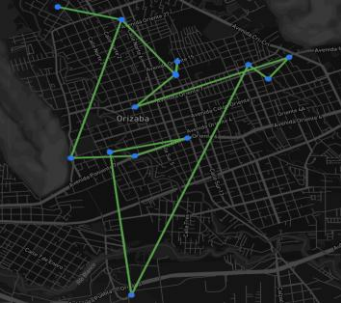
Figura 4.17 Recorrido optimizado propuesto, ruta calle Real (Fuente: Elaboración propia)

4.5 Optimización de la Ruta Orgánica

Para el caso de la última ruta que conforma el programa de servicios especializados, los resultados tras aplicar cada método del TSPVIS, se presentan en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Resultados algoritmo TSP ruta Orgánica (Fuente: Elaboración propia)

Método	Tiempo de corrida (seg)	Distancia (km)	Recorrido
Two Opt Inversion y Two Opt Inversion Reciprocal Exchange	2	11.81	
Simulated Annealing	32	11.81	
Convex Hull	1	12.04	
Nearest insertion	1	13.65	

Método	Tiempo de corrida (seg)	Distancia (km)	Recorrido
Furthest insertion	1	13.72	
Nearest Neighbor	1	13.90	
Arbitrary insertion	1	15.41	

Por lo que respecta a la Tabla 4.10, esta muestra parte de la secuencia en que deberán atenderse los servicios, los tiempos determinados para cada trayecto y los respectivos parámetros que alimentarán el modelo. Para mayor detalle, véase el anexo 11.

Tabla 4.10 Recorrido optimizado ruta Orgánica (Fuente: Elaboración propia)

Nº	Trayecto	Tiempo Maps (min)	Tiempo extra (min)	Tiempo Total (min)	TimePaths Random.Uniform (min,máx)
1	SERMUN-Hotel Pluviosilla	10	2	12	(11.5,12.5)
2	Hotel Pluviosilla-Hotel Misión Orizaba	6	1.5	7.5	(7,8)
3	Hotel Misión Orizaba-Fogón Do Brasil	7	2	9	(8.5,9.5)
4	Fogón Do Brasil-Estrella Do Brasil	2	1	3	(2.5,3.5)
.	...	.	.	.	...
.	...	.	.	.	...
.	...	.	.	.	...
14	Mercado Melchor Ocampo-Mercado de Flores	5	1	6	(5.5,6.5)
15	Mercado de Flores-Jugos Colohua	6	2	8	(7.5,8.5)
16	Jugos Colohua-SERMUN	9	2	11	(10.5,11.5)

Seguidamente, se digitalizaron los puntos en la aplicación correspondiente, con la finalidad de comparar los recorridos generados. La ilustración superior de la Figura 4.18 corresponde a los desplazamientos actuales, mientras que la imagen inferior detalla el circuito optimizado.

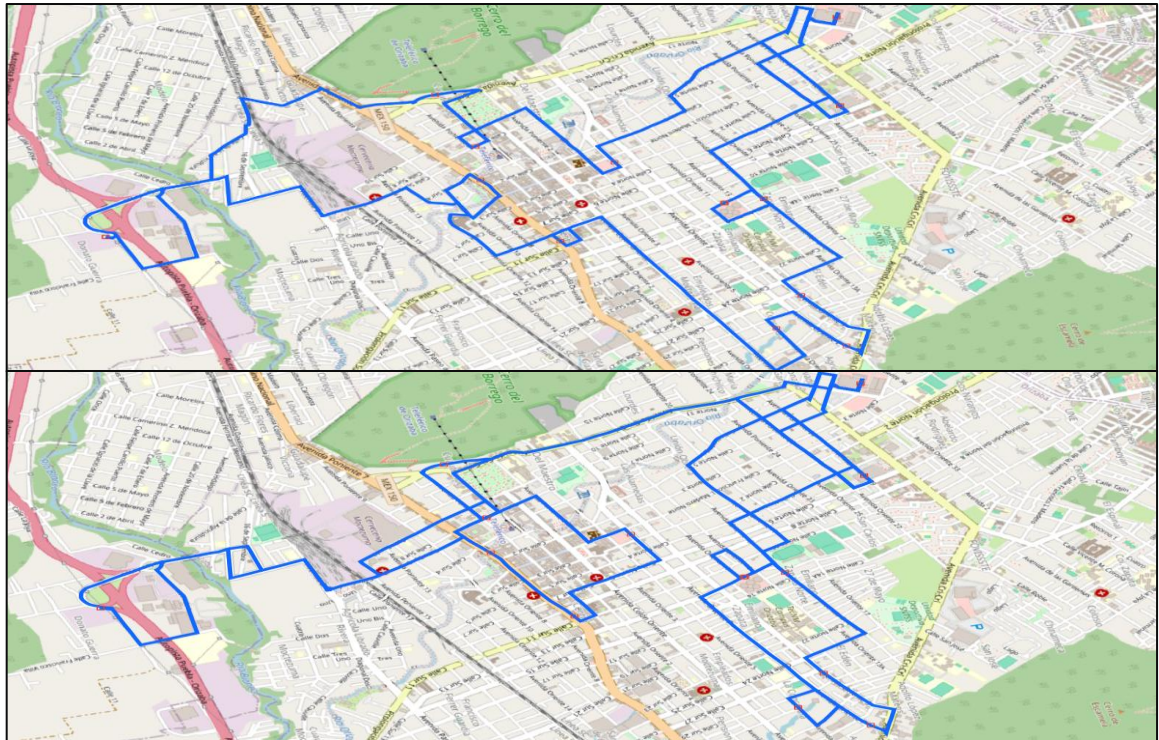


Figura 4.18 Comparativa ruta Orgánica actual (superior) vs ruta Orgánica optimizada (inferior)
(Fuente: Elaboración propia)

Por lo que se refiere a la representación del sistema propuesto, la Figura 4.19 permite visualizar el modelo construido.



Figura 4.19 Vista 3D del recorrido optimizado ruta Orgánica (Fuente: Elaboración propia)

Considerando la Figura 4.20, la alternativa para la ruta Orgánica revela un *Tiempo Promedio en Sistema* de 7.2892 horas y un *Porcentaje de Utilización* del 80.99%. Esto significa 1.16 horas menos con respecto al tiempo original, representando un 13.77% de mejora.

Scenario		Replications		Responses	
Name	Status	Required	Completed	TiempoPromedioEnSistema...	Porcentaje_de_Utilización
Scenario1	Comple...	33	33 of 33	7.2892	80.9911

Figura 4.20 Resultados simulación ruta Orgánica optimizada (Fuente: Elaboración propia)

Con base en lo anterior, la Figura 4.21 muestra el itinerario optimizado que se recomienda para la ruta Orgánica.

Servicios Especializados de Recolección de RSU Orizaba, Veracruz Diseño de ruta propuesto		
📍 Ruta: Orgánica		Algoritmo: TSP
📅 Día: Lunes		Método de solución: Two Opt Inversion
Indicador		
🕒 Tiempo promedio en el sistema optimizado	7.29 horas	
📊 Reducción en horas respecto al tiempo promedio en el sistema actual	1.16 horas	
☑ Porcentaje de mejora respecto al tiempo promedio en el sistema actual	12.94%	
Secuencia de atención		
1 Hotel Pluviosilla	9 Soriana Circunvalación	
2 Hotel Misión Orizaba	10 Mercado Cerritos	
3 Fogón Do Brasil	11 Soriana Circunvalación	
4 Estrella Do Brasil	12 Mercado Cerritos	
5 Partida Lab	13 Mercado Melchor Ocampo	
6 DACSA	14 Mercado de Flores	
7 Mercado Zapata	15 Jugos Colohua	
8 Frutería Los Bukis		

Figura 4.21 Recorrido optimizado propuesto, ruta Orgánica (Fuente: Elaboración propia)

A modo de cierre, en la Tabla 4.11 se resumen los resultados para cada una de las rutas, incluyéndose el algoritmo en el que se basó la optimización, la comparación entre el tiempo original y el tiempo obtenido con el TSP, así como el porcentaje de mejora. En todos los casos se logró una disminución tanto en el tiempo promedio en el sistema como en el porcentaje de utilización. Sin embargo, la ruta Sur destaca por lograr la mayor mejora con una reducción de 1.24 horas en tiempo promedio, equivalente a un 14.19% de mejora con respecto al porcentaje de utilización actual.

Tabla 4.11 Comparativo de resultados (Fuente: Elaboración propia)

Ruta	Corridas en Simio	Recorrido actual		Recorrido optimizado			Disminución en horas con respecto al tiempo actual	Porcentaje de mejora del tiempo promedio en el sistema
		Tiempo promedio en Sistema (horas)	Porcentaje de Utilización	Algoritmo empleado	Tiempo promedio en Sistema (horas)	Porcentaje de Utilización		
Sur	28	8.7545	97.27%	Two Opt Inversión	7.5118	83.46%	1.2427	14.19%
Centro	55	8.1806	90.90%	Convex Hull	7.39024	82.11%	0.79036	9.66%
Norte	15	9.0899	101.00%	Two Opt Inversion Reciprocal Exchange	7.9406	88.23%	1.1493	12.64%
Calle Real	17	11.5527	128.36%	Two Opt Inversion Reciprocal Exchange	11.0464	122.74%	0.5063	4.38%
Orgánica	33	8.4536	93.93%	Two Opt Inversión	7.2892	80.99%	1.1644	13.77%

En la misma línea, la ruta Norte presenta una mejora del 12.64%, correspondiente a 1.15 horas que se lograron disminuir respecto al tiempo promedio en el sistema. Esto resulta relevante, ya que en el escenario real esta ruta opera por encima de su capacidad (101%). Al ser optimizada, su porcentaje de utilización se reduce a un valor mucho más sostenible (88.23%).

De igual manera, la ruta Orgánica muestra una mejora significativa, con una disminución 1.1644 horas, correspondiente un 13.77% de mejora. En cuanto a las rutas Centro y calle Real muestran mejoras menores en términos absolutos (0.79036 y 0.5063 horas, respectivamente), pero no por ello menos importantes, ya que contribuyen al objetivo general de reducir la carga de trabajo y mejorar el uso de los recursos. Asimismo, demuestran

la utilidad de este tipo de métodos para la optimización de rutas, ya que a pesar de las restricciones propias de estas zonas, los recorridos propuestos por los algoritmos consiguieron disminuir el tiempo promedio en el sistema.

Cabe mencionar que, a pesar de que el software TSPVIS es muy eficiente, este utiliza información determinística. Por consiguiente, para modelar mejor la realidad, involucrando la incertidumbre del sistema actual, se utilizó la simulación en Simio, lo cual permitió construir modelos válidos y apegados al entorno real del programa de recolección especializado de la ciudad de Orizaba.

Adicionalmente, Simio permite observar gráficamente el comportamiento optimizado del camión recolector, gracias a su vista en tercera dimensión con la que cuenta el software. Esto lo convierte en una herramienta muy poderosa para el convencimiento y la toma de decisiones adecuada para la Coordinación del Departamento de Limpia Pública.

Capítulo 5

Conclusiones

Con base en el trabajo realizado durante el desarrollo de esta tesis, se pueden extraer conclusiones desde diferentes enfoques: con respecto a los resultados sobre la problemática del sistema en estudio, con referente a la utilidad de las técnicas y herramientas aplicadas, así como de los conocimientos, tanto técnicos como humanos, que se adquirieron a lo largo del proyecto.

En ese orden de ideas, se comenzará por analizar los resultados del análisis de los recorridos actuales contra los valores obtenidos tras la aplicación de los métodos con los que cuenta el TSPVIS. Al comparar el tiempo promedio en el sistema y el porcentaje de utilización para cada una de las cinco rutas, se evidenció que la sobrecarga actual está condicionada principalmente al empirismo con el que se realizan los recorridos. Esta presunción se justifica al observar que, al aplicar los algoritmos de solución del Problema del Agente Viajero (TSP), fue posible reducir de manera consistente tanto el tiempo total en el sistema como el porcentaje de utilización del camión en las cinco rutas analizadas.

El TSP está orientado a encontrar la secuencia más eficiente de visitas a un conjunto de puntos, minimizando la distancia total recorrida. En contraste, el enfoque empírico carece de un criterio sistemático y cuantitativo, lo que incrementa la probabilidad de trayectos redundantes o subóptimos. La comparación directa mostró que los recorridos actuales, al no estar basados en técnicas de optimización, generan sobrecargas operativas que podrían evitarse con una planificación más estructurada.

Pasar de porcentajes por arriba del 93%, a niveles entre el 80% y 88% (a reserva de la ruta calle Real), demuestra que existe un margen considerable de mejora en la planificación de rutas. Esta reducción no solo optimiza los recursos materiales, sino también contribuye al bienestar de los operarios, al evitar condiciones de trabajo cercanas al límite de su capacidad.

Este tipo de mejoras reflejan el impacto directo que una mejor secuenciación puede tener sobre la eficiencia general del servicio. Además, el hecho de que todas las rutas, lograron mejoras en ambos indicadores clave (tiempo y utilización), valida la consistencia del modelo propuesto.

Considerando lo anterior y dado que la representación del ruteo del programa de recolección especializado a través del software Simio, permitió analizar el tiempo promedio en el sistema y el porcentaje de utilización, así como diseñar propuestas, al modelar los recorridos sugeridos por los algoritmos de solución del Agente Viajero y que se proporcionaron al personal correspondiente, se considera que el objetivo general se ha alcanzado. Asimismo, como se fue demostrando en cada etapa de la metodología aplicada, los objetivos específicos definidos fueron elementos clave para la consecución de dicho propósito.

Ahora bien, en relación con las técnicas y herramientas empleadas, se hizo evidente la utilidad de la simulación como técnica de análisis para la toma de decisiones. La simulación permitió representar de manera dinámica el sistema real, integrando elementos de incertidumbre que son característicos de los procesos logísticos urbanos. Si bien TSPVIS posibilita la obtención de rutas optimizadas desde una perspectiva determinista, este software no contempla eventos inesperados. En contraste, Simio resultó ser una herramienta poderosa precisamente por su capacidad de modelar dicha incertidumbre, lo cual fue posible, por ejemplo, mediante el uso de la distribución uniforme. Esta permitió incorporar la probabilidad de ocurrencia de situaciones no previstas como el tráfico, obras viales, la complejidad de ciertas calles, entre otros.

Asimismo, las funcionalidades gráficas de Simio, en particular su capacidad de animación en 3D, constituyen otra de sus grandes fortalezas, ya que permiten realizar un análisis espacial de los desplazamientos. Esta característica facilita una mejor representación del sistema y, por ende, una mayor comprensión de su comportamiento por parte de los distintos actores involucrados en la toma de decisiones.

Producto de lo anterior, fueron las alternativas que se materializaron, a través de las listas de secuencia sugeridas para cada ruta. Sin duda, representan una aportación valiosa para reducir el empirismo en la logística actual del programa de recolección de Servicios Especializados, al incluir herramientas analíticas que permiten integrar recursos matemáticos y tecnológicos que, como se demostró, contribuyen a mejorar el desempeño de cualquier sistema.

Finalmente, en torno al aprendizaje alcanzado a través del desarrollo de esta investigación, es claro que no solo se limita a aspectos teóricos. Si bien, estos fueron la base para comprender y aplicar correctamente la metodología seleccionada, el proyecto permitió un crecimiento personal. La convivencia con los colaboradores, la participación en los recorridos para la toma de tiempos, entre otros aspectos, implicaron una interacción directa en el entorno operativo, permitiendo comprender las condiciones reales del sistema. Esta experiencia fortaleció habilidades como la observación crítica, el trabajo en equipo, la empatía y la capacidad de adaptación, competencias esenciales tanto para la práctica profesional como para el ámbito académico-investigativo.

Referencias bibliográficas

- Anaya Fuentes, G. E., Hernández Gress, E. S., Seck Tuoh Mora, J. C., & Medina Marín, J. (2016). Solución al Problema de Secuenciación de Trabajos mediante el Problema del Agente Viajero. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 13, 430–437. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2016.07.003>
- Arredondo Lozano, F. (2001). *Recolección eficiente de los desechos sólidos, una alternativa para contribuir a la solución del problema ecológico de la ciudad de Monterrey* [Universidad Autónoma de Nuevo León: Facultad de Contaduría Pública y Administración]. <http://eprints.uanl.mx/924/1/1020146108.PDF>
- Ayuntamiento de Orizaba. (2021). “ECORI”: Planta de separación de residuos sólidos Orizaba. *Revista Iberoamericana de Gobierno Local*, 19, 1–7. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9378888>
- Ayuntamiento de Orizaba. (2022). *Manual de Procedimientos Limpia Pública*.
- Bacchini, R. D., Vázquez, L. V., Bianco, M. J., & García Fronti, J. I. (2018). *Introducción a la probabilidad y la estadística* (Primera). Facultad de Ciencias Económicas. http://bibliotecadigital.econ.uba.ar/download/libros/Bacchini_Introduccion-a-la-probabilidad-y-a-la-estadistica-2018.pdf
- Barrales V., L., Peña R., I., & Fernández de la Reguera B., P. (2004). Validación de modelos: un enfoque aplicado. *Agricultura Técnica*, 64(1). <https://doi.org/10.4067/S0365-28072004000100008>
- Bi, L., Feleke, A.-->Genetu, & Guan, C. (2019). A review on EMG-based motor intention prediction of continuous human upper limb motion for human-robot collaboration. *Biomedical Signal Processing and Control*, 51, 113–127. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.02.011>
- Box, G. E. P. (2021). *The most important probability distributions for business process simulation*. <https://softwaresim.com/blog/the-most-important-probability-distributions-for-business-process-simulation/>
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (1998). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*.
-

- <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>
- Candela, C. A., Sepúlveda, L. E., Chavarro, J. C., Meneses, C. A., Sanabria, J. A., & Arcila, O. (2022). Implementación de algoritmos para calcular el Convex Hull. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 16(32), 27–34.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672022000200027
- Coss Bu, R. (2015). *Simulación: un enfoque práctico*. LIMUSA.
- Cruz García, M. J. (2023). *Evaluación de la Ruta 8 de Recolección de Residuos Sólidos en la Ciudad de Orizaba, Veracruz, Usando Simulación en SIMIO*. Instituto Tecnológico de Orizaba.
- Diario Oficial de la Federación. (2003a). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*.
https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=688657&fecha=08/10/2003#gsc.tab=0
- Diario Oficial de la Federación. (2003b). *Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003*.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=658648&fecha=20/10/2004#gsc.tab=0
- Diario Oficial de la Federación. (2022). *Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2022-2024*.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5673264&fecha=05/12/2022#gsc.tab=0
- El Sol de Orizaba. (2023, June). *Celebran primer aniversario de planta recicladora Ecori*.
<https://oem.com.mx/elsoldeorizaba/local/planta-recicladora-ecori-ha-reciclado-mas-del-60-por-ciento-de-basura-de-orizaba-en-lo-que-va-del-2023-14978005>
- El Sol de Orizaba. (2024). *¿Qué significa la escoba de platino? Entregan a Orizaba un reconocimiento internacional*. <https://oem.com.mx/elsoldeorizaba/ciencia-y-salud/orizaba-recibe-el-premio-internacional-escoba-de-platino-que-significa-13216214>
- Fuentes Penna, A. (2014). Problema del agente viajero. *Boletín Científico de La Escuela Superior de Tlahuelilpan*, 2(3).
<https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/tlahuelilpan/n3/e5.html>
-

- Gobierno de México. (2018). *Informe del Medio Ambiente*.
<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap7.html#tema1>
- Gobierno de México. (2024). *Orizaba*.
<https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/orizaba?redirect=true#population-and-housing>
- Gobierno del Estado de Veracruz, & SEDEMA. (2024). *Sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos*. <https://www.veracruz.gob.mx/medioambiente/residuos-solidos/>
- Golpe Político. (2024). “Orizaba recibirá la ‘Escoba de Platino’, máximo reconocimiento internacional a organismos por iniciativas ambientales.”
<https://golpepolitico.com/2024/07/16/orizaba-recibira-la-escoba-de-platino-maximo-reconocimiento-internacional-a-organismos-por-iniciativas-ambientales/>
- Google Maps. (2024). *Vista satelital Orizaba, Veracruz*.
https://www.google.com.mx/maps/place/Orizaba,+Ver./@18.8591677,-97.1383281,12554m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x85c502a4c0439f05:0xd83faa836b275780!8m2!3d18.8504744!4d-97.1036396!16zL20vMDI0eWRi?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI0MTIxMS4wIKXMDS-oASAFQAw%3D%3D
- Guasch, A., Piera, M. Á., Casanovas, J., & Figueras, J. (2003). *Modelado y Simulación. Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios*. (Segunda). Edicions UPC.
- Gutiérrez Galicia, F. (2008). *Análisis del Sistema de Recolección de Residuos Sólidos Urbanos en el Centro Histórico de Morelia, aplicando Sistemas de Información Geográfica (SIG)* [Universidad Nacional Autónoma de México [Facultad de Ingeniería]].
https://ru.dgb.unam.mx/jspui/bitstream/20.500.14330/TES01000638105/3/0638105_A1.pdf
- Gutiérrez González, E., & Vladimirovna Panteleeva, O. (2016). *Estadística Inferencial I para ingenierías y ciencias* (Primera). Grupo Editorial Patria.
<https://elibro.net/es/ereader/itorizababiblio/40474>
- Law, A. M., & Kelton, W. D. (2007). *Simulation modeling and analysis*. 3.
- Learnsignal. (2024). *What is Uniform Distribution in Finance*.
-

- <https://www.learnsignal.com/blog/what-is-uniform-distribution/#:~:text=Definition,scenario exemplifies a uniform distribution.>
- López, E., Salas, Ó., & Murillo, Á. (2014). El problema del agente viajero: un algoritmo determinístico usando búsqueda Tabú. *Revista Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 21(1), 127–144. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rmta/v21n1/a08v21n1.pdf>
- Lüer, A., Benavente, M., Bustos, J., & Venegas, B. (2009). El problema de rutas de vehículos: extensiones y métodos de resolución, estado del arte. *EIG*. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/36313303/Art_23-libre.pdf?1421614047=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEl_Problema_de_Rutas_de_Vehiculos_Extens.pdf&Expires=1737564436&Signature=YjpEPz7~iLBFCg88Va9Ln1E4cvmhdfNz0Q5RTr8-w3KG2mMEJ8qmYn~
- Mendenhall, W., Beaver, R. J., & M. Beaver, B. (2006). *Introducción a la probabilidad y estadística* (Décimo ter). Cengage Learning Editores. <https://www.fcfm.buap.mx/jzacarias/cursos/estad2/libros/book5e2.pdf>
- Minga Quezada, M. I., & Zhiminacela León, Y. F. (2019). *Optimización de las rutas de recolección de los residuos sólidos urbanos del Centro Cantonal SÍGSIG* [Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18149/1/UPS-CT008622.pdf>
- Minitab. (2024). *Distribuciones de probabilidad continuas y discretas*. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/probability-distributions-random-data-and-resampling-analyses/supporting-topics/basics/continuous-and-discrete-probability-distributions/#:~:text=Una distribución discreta describe la,lista de ente>
- Moras Sánchez, C. G. (2020). *Unidad IV. Diseño de la calidad de la simulación*.
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/#>
- 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 [Instituto Tecnológico de Orizaba].
<http://repositorios.orizaba.tecnm.mx:8080/xmlui/handle/123456789/654>
- Pérez de Vargas Moreno, B. (2015). *Resolución del Problema del Viajante de Comercio (TSP) y su variante con Ventanas de Tiempo (TSPTW) usando métodos heurísticos de búsqueda local* [Universidad de Valladolid].
<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/13378/TFG-I-252.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pérez Rave, J. I., Jaramillo Álvarez, G. P., Parra Mesa, C. M., & Moreno Velásquez, L. F. (2010). Tetraheurística sistémica (THS) para el TSP. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 18(2), 187–202.
https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052010000200006
- Pineda Amador, Y. (2015). *Rediseño de rutas de recolección de residuos sólidos mediante el problema de Ruteo de Vehículos Capacitados sobre Arcos* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2015/mayo/0730091/0730091.pdf>
- Racero Moreno, J., & Pérez Arriaga, E. (2006). Optimización del sistema de rutas de recolección de residuos sólidos domiciliarios (Ecoeficiencia). *X Congreso de Ingeniería de Organización*, 1–14.
http://www.adingor.es/Documentacion/CIO/cio2006/docs/000226_final.pdf
- Robles Hernández, J. G. (2004). *Análisis del proceso de limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de la basura del municipio de Culiacán, Sinaloa, y la propuesta de diseño institucional de una política pública, para su mejoramiento* [Instituto Politécnico Nacional].
https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/2262/534_2005_ESCA-ST_MAESTRIA_robles_hernandez_joseguadalupe.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rodríguez Ojeda, L. (2007). *Probabilidad y Estadística básica para ingenieros*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/25020/1/PROBABILIDAD_Y_ESTADISTICA_BASICA_PARA_INGENIEROS.pdf
- Ruiz, V. (2010). Pruebas de bondad de ajuste. *Monitoreo de Poblaciones de Vida Silvestre*, x, 13 pp.
- Secretaría de Turismo. (2019). *Orizaba, Veracruz*.

- <https://www.gob.mx/sectur/articulos/orizaba-veracruz>
- Secretaría de Turismo. (2024). *Pueblos mágicos: Orizaba*.
<https://pueblosmagicos.mexicodesconocido.com.mx/veracruz/orizaba/>
- Secretaría del Medio Ambiente, & Gobierno de México. (2022). *Inventario de Residuos Sólidos de la ciudad de México 2023*.
https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPCA/residuos/IRS_2022_Completo.pdf
- SEMARNAT. (2010). *Guía de Diseño para la Identificación Gráfica del Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos*.
<https://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/residuos/solidos/Documents/guia-diseno.pdf>
- SEMARNAT. (2024). *Clasificación, reciclaje y valoración de los RSU*.
<https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/clasificacion-reciclaje-y-valoracion-de-los-rsu>
- SIEGVER. (2023). *Cuadernillos municipales: Orizaba*. http://ceieg.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2023/08/Orizaba.CM_.Ver_.2023.2.pdf
- Sierra Fernández, A. (2023). *Algoritmos heurísticos para el problema del viajante; colonia de hormigas y Christofides* [Universidad de Cantabria].
<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/29846/SierraFernandezAlejandro.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Simio Simulación ES. (2025). *SIMIO: Software avanzado para modelación y simulación de sistemas y procesos*. <https://www.Simio-simulacion.es/>
- Solís Galán, Y., Moras Sánchez, C. G., Cortés Robles, G., Ojeda Juárez, I., & Martínez Hernández, L. (2017). Simulación de una estación de transferencia municipal de Residuos Sólidos Urbanos con el software SIMIO. *Journal CIM*, 5(2), 559–566.
<http://repositorios.orizaba.tecnm.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/685/SA-D17A-02.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Standridge, C. R. (2013). *Beyond lean: Simulation in Practice* (Second). Grand Valley State University. <https://library.act.edu.et/index.php?p=fstream&fid=526&bid=548>
- Susunaga Miranda, M. A., Ortiz Muñoz, B., Castañeda Chávez, M. del R., Lango Reynoso, F., & Hernández Berriel, M. del C. (2022). Sitios de disposición final de residuos

- sólidos abandonados en la Región de Sotavento del estado de Veracruz, México, utilizando herramientas SIG. *Enfoque UTE*, 13(4), 11–28. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.853>
- Texson, G. (2005). *Diseño de un simulador de vuelo para la compra y venta de acciones en el mercado accionario mexicano*. 5–28.
- TSPvis. (2025). *TSPVIS*. <https://tspvis.com/>
- Vásquez, O. (2005). Modelo de simulación de gestión de residuos sólidos domiciliarios en la Región Metropolitana de Chile. *Revista de Dinámica de Sistemas*, 1(1), 27–52. https://www.academia.edu/88462484/Modelo_de_simulación_de_gestión_de_residuos_sólidos_domiciliarios_en_la_Región_Metropolitana_de_Chile
- Zuñiga López, L. F., Camargo Martínez, A., García Castro, J., & Flores Escamilla, E. (2012). *Matemáticas IV (Estadística descriptiva e inferencial)*. <http://www.fcaenlinea.unam.mx/apuntes/interiores/docs/2012/informatica/4/1445.pdf>

Anexos

Anexo 1 Lectura completa de tiempos de traslado y servicio Ruta Sur

Zona	CVO	Negocio	Hora de llegada	Hora de salida
		SERMUN		06:15
Sur	1	Rastro municipal	06:22	06:28
Sur	2	Plaza Faro	06:30	06:37
Sur	3	Pastelería Grisela	06:51	06:51
Sur	4	Escuela Carlos A Carrido	06:54	06:57
Sur	5	Hotel Trueba	07:08	07:20
Sur	6	Hotel HAUS	07:08	07:20
Sur	7	CFE receptora Ote 8	07:24	07:24
Sur	8	Chedraui	07:32	08:12
Sur	9	Farmacia Guadalajara Ote. 2	08:20	08:22
Sur	10	Quinta Escamela	08:27	08:32
Sur	11	Colate	08:35	08:36
Sur	12	Hotel Paradise	08:37	08:40
Sur	13	Farmacia Guadalajara Sur 33	08:44	08:46
Sur	14	General de Seguros	08:49	08:51
Sur	15	Escuela Felipe Suburbie	09:00	09:03
Sur	16	Kinder Margarita Maza de Juárez	09:05	09:10
Sur	17	Iglesia Barrio Nuevo	09:13	09:17
Sur	18	Holanda	09:19	09:21
Sur	19	Gasolinera Las Gemelas (lado A)	09:23	09:26
Sur	20	Escuela primaria matutina Aztlán	09:46	09:50
Sur	21	Jardín de niños Cri Cri	09:51	09:53
Sur	22	Carnitas Cadena	10:05	10:09
Sur	23	Empacadora Cianca	10:20	10:30
Sur	24	Filazinc	10:32	10:36
Sur	25	Rovianda	10:38	10:41
Sur	26	TIUSA	10:43	11:06
Sur	27	Gasolinera Las Gemelas (lado B)	11:15	11:22
Sur	28	Cedis Orizaba Molinera de México	11:23	11:25
Sur	29	Residencial Santa Gertrudis	11:34	12:04
Sur	30	Starbucks	12:08	12:10
Sur	31	Mezcladora Lucas	13:29	13:33
Sur	32	Servicio Diez	13:35	13:37
Sur	33	Farmacia Guadalajara Col. Rafael Alvarado	13:38	13:39
Sur	34	Manufacturera Simón	13:41	13:45
Sur	35	Tepeyac (herbicidas FYPA)	13:49	13:50
Sur	36	Rojo Llantas	13:50	13:51
Sur	37	Centro de Desarrollo infantil Abejitas	14:00	14:10
Sur	38	CEICO preescolar	14:00	14:10
Sur	39	Bodega IMPS	14:10	14:11
Sur	40	DIF municipal	14:15	14:16
Sur	41	Harinera y Manufacturera de Orizaba	14:22	14:31
Sur	42	Guardería nenitos	14:34	14:40
Sur	43	Hotel Mirador	14:40	14:41
Sur	44	Bla Bla	14:42	14:43

Anexo 2 Tiempos de traslado y de servicio con distribuciones Ruta Sur

Ruta	CVO	Negocio	Hora de llegada	Hora de salida	Tiempo de servicio	Tiempo de traslado	Tiempo Processing Time Simio	Tiempo TimePath Simio
		SERMUN		06:15	15		Random.Uniform(10,20)	
Sur	1	Rastro municipal	06:22	06:28	00:06	00:07	Random.Uniform(5.5,6.5)	Random.Uniform(6.5,7.5)
Sur	2	Plaza Faro	06:30	06:37	00:07	00:02	Random.Uniform(6.5,7.5)	Random.Uniform(1.8,2.2)
Sur	3	Pastelería Grisel	06:51	06:51	00:00	00:14	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(13.5,14.5)
Sur	4	Escuela primaria Carlos A Carrido	06:54	06:57	00:03	00:03	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(2.8,3.2)
Sur	5	Hotel Trueba	07:08	07:20	00:12	00:11	Random.Uniform(11.5,12.5)	Random.Uniform(10.5,11.5)
Sur	6	Hotel HAUS	07:08	07:20	00:12	00:11		
Sur	7	CFE receptora ote 8	07:24	07:24	00:00	00:04	Random.Uniform(0.5,0.7)	Random.Uniform(3.5,4.5)
Sur	8	Chedraui	07:32	08:12	00:40	00:08	Random.Uniform(39.5,40.5)	Random.Uniform(7.5,8.5)
Sur	9	Farmacia Guadalajara (Frente a panteón)	08:20	08:22	00:02	00:08	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(7.5,8.5)
Sur	10	Quinta Escamela	08:27	08:32	00:05	00:05	Random.Uniform(4.5,5.5)	Random.Uniform(4.5,5.5)
Sur	11	Colate	08:35	08:36	00:01	00:03	Random.Uniform(0.7,1.3)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Sur	12	Hotel Paradise	08:37	08:40	00:03	00:01	Random.Uniform(2.7,1.3)	Random.Uniform(0.8,1.2)
Sur	13	Farmacia Guadalajara Plaza Faro	08:44	08:46	00:02	00:04	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(3.5,4.5)
Sur	14	General de Seguros (por Santa Gertrudis)	08:49	08:51	00:02	00:03	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Sur	15	Suburbie	09:00	09:03	00:03	00:09	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(8.5,9.5)
Sur	16	Kinder Margarita Maza de Juárez	09:05	09:10	00:05	00:02	Random.Uniform(4.5,5.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Sur	17	Iglesia Barrio Nuevo	09:13	09:17	00:04	00:03	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Sur	18	Holanda	09:19	09:21	00:02	00:02	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(1.7,2.3)
Sur	19	Gasolinera Las Gemelas (lado A)	09:23	09:26	00:03	00:02	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(1.7,2.3)
Sur	20	Escuela primaria matutina Aztlan	09:46	09:50	00:04	00:20	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(19.5,20.5)
Sur	21	Jardín de niños Cri Cri	09:51	09:53	00:02	00:01	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(0.8,1.3)
Sur	22	Carnitas Cadena	10:05	10:09	00:04	00:12	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(11.5,12.5)
Sur	23	Empacadora Cianca	10:20	10:30	00:10	00:11	Random.Uniform(9.5,10.5)	Random.Uniform(10.5,11.5)
Sur	24	Filazinc	10:32	10:36	00:04	00:02	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Sur	25	Rovianda	10:38	10:41	00:03	00:02	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Sur	26	TIUSA	10:43	11:06	00:23	00:02	Random.Uniform(22.5,23.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Sur	27	Gasolinera Las Gemelas (lado B)	11:15	11:22	00:07	00:09	Random.Uniform(6.5,7.5)	Random.Uniform(8.5,9.5)
Sur	28	Cedis Orizaba Molinera de México	11:23	11:25	00:02	00:01	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Sur	29	Residencial Santa Gertrudis	11:34	12:04	00:30	00:09	Random.Uniform(29.5,30.5)	Random.Uniform(8.5,9.5)
Sur	30	Starbucks	12:08	12:10	00:02	00:04	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(3.5,4.5)
Sur	31	Mezcladora Lucas	13:29	13:33	00:04	01:19	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(78.5,79.5)
Sur	32	Servicio Diez	13:35	13:37	00:02	00:02	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Sur	33	Farmacia Guadalajara Col. Rafael Alvarado	13:38	13:39	00:01	00:01	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Sur	34	Manufacturera Simón	13:41	13:45	00:04	00:02	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Sur	35	Tepeyac (herbicidas FYPA)	13:49	13:50	00:01	00:04	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(4.5,5.5)
Sur	36	Rojo Llantas	13:50	13:51	00:01	00:00		
Sur	37	Centro de Desarrollo infantil Abejitas	14:00	14:10	00:10	00:09	Random.Uniform(9.5,10.5)	Random.Uniform(8.5,9.5)
Sur	38	CEICO preescolar	14:00	14:10	00:10	00:09		
Sur	39	Bodega IMPS	14:10	14:11	00:01	00:01	Random.Uniform(0.5,1.0)	Random.Uniform(0.5,1.0)
Sur	40	DIF municipal	14:15	14:16	00:01	00:04	Random.Uniform(0.5,1.0)	Random.Uniform(3.5,4.5)
Sur	41	Manufacturera de Orizaba	14:22	14:31	00:09	00:06	Random.Uniform(8.5,9.5)	Random.Uniform(5.5,6.5)
Sur	42	Guardería nenitos	14:34	14:40	00:06	00:03	Random.Uniform(5.5,6.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Sur	43	Hotel Mirador	14:40	14:41	00:01	00:00	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(0.3,0.6)
Sur	44	Bla Bla	14:42	14:43	00:01	00:01	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)

Anexo 3 Tiempos de traslado y de servicio con distribuciones Ruta Centro

Zona	CVO		Negocio	Hora de llegada	Hora de salida	Tiempo de servicio	Tiempo de traslado	Tiempo Processing Time Simio	Tiempo Timepath Simio
			SERMUN		06:15	15		Random.Uniform(10,20)	
Centro	1		UV Enfermería	06:22	06:25	00:03	00:07	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(6.5,7.5)
Centro	2		Nussa	07:02	07:09	00:07	00:37	Random.Uniform(6.5,7.5)	Random.Uniform(36.5,37.5)
Centro	3		Manitas que trabajan	07:15	07:15	00:00	00:06	Random.Uniform(0.4,0.6)	Random.Uniform(5.5,6.5)
Centro	4		Panadería Ara	07:17	07:21	00:04	00:02	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Centro	5		Guardería Rebsamen	07:28	07:30	00:02	00:07	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(6.5,7.5)
Centro	6		Cometra	07:36	07:39	00:03	00:06	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(5.5,6.5)
Centro	7	Bloque 1	Guardería Chiquitines	07:45	07:47	00:02	00:06	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(5.5,6.5)
Centro	8		Panadería Angeles	07:47	07:48	00:01	00:00	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Centro	9		Carnicería El jarocho	07:50	07:56	00:06	00:02	Random.Uniform(5.5,6.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Centro	10		La Casona	08:41	08:45	00:04	00:45	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(44.5,45.5)
Centro	11	Bloque 2	Anglo Jardin	08:48	08:50	00:02	00:03	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Centro	12		Anglo Primaria	08:48	08:50	00:02	00:03		
Centro	13		Soriana calle Real	08:54	08:55	00:01	00:04	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(3.5,4.5)
Centro	14		Coppel Madero	08:56	09:00	00:04	00:01	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Centro	15		Clínica Buen Pastor	09:03	09:04	00:01	00:03	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Centro	16		Farmacia Guadalajara Colón	09:06	09:07	00:01	00:02	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Centro	17	Bloque 3	La Gran Torta	09:07	09:14	00:07	00:00	Random.Uniform(6.5,7.5)	Random.Uniform(0.5,0.7)
Centro	18		Tortas Orizabeñas Colón	09:07	09:14	00:07	00:00		
Centro	19		Tortas Mexicanas Colón	09:14	09:16	00:02	00:00	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(0.5,0.7)
Centro	20	Bloque 4	Carnicería Grijalva	09:17	09:20	00:03	00:01	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Centro	21		Tortas "Las tradicionales de Orizaba"	09:17	09:20	00:03	00:01		
Centro	22		CEUG	09:25	09:26	00:01	00:05	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(4.5,5.5)
Centro	23		Coyametzla	09:27	09:28	00:01	00:01	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Centro	24		Iglesia del Carmén	09:33	09:42	00:09	00:05	Random.Uniform(8.5,9.5)	Random.Uniform(4.5,5.5)
Centro	25	Bloque 5	Dauzón(BLOQUE5)	09:43	09:52	00:09	00:01	Random.Uniform(8.5,9.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Centro	26		Iglesia El Calvario	09:43	09:52	00:09	00:01		
Centro	27		CPO	09:43	09:52	00:09	00:01		
Centro	28		Anexo tortas tradicionales (Oriente 3 104)	09:54	09:56	00:02	00:02	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Centro	29		Tortas mexicanas Sur 3	09:58	10:01	00:03	00:02	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Centro	30		Banamex centro	10:02	10:11	00:09	00:01	Random.Uniform(8.5,9.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Centro	31	Bloque 6	Torre Telmex	10:02	10:11	00:09	00:00		
Centro	32		Santander oriente 2	10:02	10:11	00:09	00:00		
Centro	33		Salón club Moctezuma	10:02	10:11	00:09	00:00		
Centro	34		Palacio municipal	10:13	10:17	00:04	00:02	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Centro	35		Instituto Atenas	10:18	10:24	00:06	00:01	Random.Uniform(5.5,6.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Centro	36		ISECF	10:25	10:27	00:02	00:01	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Centro	37	Bloque 7	Mercado de artesanías	10:29	10:33	00:04	00:02	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Centro	38		DIF (museo de arte popular)	10:29	10:33	00:04	00:00		
Centro	39		Jugos California (Norte 3 119, Centro Orizaba)	10:29	10:33	00:04	00:00		
Centro	40	Bloque 8	Optima	10:34	10:38	00:04	00:01	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Centro	41		Coppel Canadá	10:34	10:38	00:04	00:00		
Centro	42		Veana	10:34	10:38	00:04	00:00		
Centro	43		Catedral San Miguel Arcangel	10:38	10:45	00:07	00:00	Random.Uniform(6.5,7.5)	Random.Uniform(0.4,0.6)
Centro	44		Vertiche	10:46	10:58	00:12	00:01	Random.Uniform(11.5,12.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Centro	45	Bloque 9	Cuidado con el perro	10:46	10:58	00:12	00:00		
Centro	46		Deportenis	10:46	10:58	00:12	00:00		
Centro	47		Palacio de Hierro	10:46	10:58	00:12	00:00		
Centro	48	Bloque 10	Juzgado 4° de Primera instancia (Plaza Sta María)	11:14	11:18	00:04	00:16	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(15.5,16.5)
Centro	49		Laboratorios de Análisis Clínicos						
Centro	50		Química Médica de Córdoba	11:14	11:18	00:04	00:00		
Centro	51	Bloque 11	Escuela Cultura y Progreso	11:14	11:18	00:04	00:00	Random.Uniform(16.5,17.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Centro	52		Cafetería Sugar	11:20	11:37	00:17	00:02		
Centro	53		Despacho de contadores Trueba (Oriente 4 172, Centro)	11:20	11:37	00:17	00:00		
Centro	54		Zapatería 3 caballos	11:20	11:37	00:17	00:00		
Centro	55		Banorte ote 4	11:20	11:37	00:17	00:00		
Centro	56		Revés de Café	11:20	11:37	00:17	00:00		
Centro	57		Lic Jaime (Oriente 4, 88 altos)	11:20	11:37	00:17	00:00		
Centro	58		Financiera junto al Banorte*	11:20	11:37	00:17	00:00		
Centro	59		Anfora	11:20	11:37	00:17	00:00		
Centro	60		CFE Madero	11:20	11:37	00:17	00:00	Random.Uniform(15.5,16.5)	Random.Uniform(12.5,13.5)
Centro	61		FYMSSA	11:50	12:06	00:16	00:13		
Centro	62		Los antojos del Fogón (Fogoncito)	12:09	12:12	00:03	00:03	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Centro	63		Holiday Inn	12:17	12:30	00:13	00:05	Random.Uniform(12.5,13.5)	Random.Uniform(4.5,5.5)
Centro	64		Sanatorio Colón	12:34	12:40	00:06	00:04	Random.Uniform(5.5,6.5)	Random.Uniform(3.5,4.5)
Centro	65		Soriana calle Real	12:56	13:30	00:34	00:16	Random.Uniform(33.5,34.5)	Random.Uniform(15.5,16.5)
Centro	66		Scattola	13:42	13:43	00:01	00:12	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(11.5,12.5)

Anexo 4 Tiempos de traslado y de servicio con distribuciones Ruta Norte

Zona	CVO	Negocio	Hora de llegada	Hora de salida	Tiempo de servicio	Tiempo de traslado	Tiempo Processing Time Simio	Tiempo Timepath Simio
		SERMUN		06:15	15			Random.Uniform(10,20)
Norte	1	Inspección de policía	06:37	06:50	00:13	00:22	Random.Uniform(21.5,22.5)	Random.Uniform(12.5,13.5)
Norte	2	Panadería Flores	07:23	07:35	00:12	00:33	Random.Uniform(32.5,33.5)	Random.Uniform(11.5,12.5)
Norte	3	CDO Norte	07:40	07:43	00:03	00:05	Random.Uniform(4.5,5.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Norte	4	Plaza Valle	08:02	09:54	01:52	00:19		
Norte	5	Cinepolis	08:02	09:54	01:52	00:00	Random.Uniform(18.5,19.5)	Random.Uniform(111.5,112.5)
Norte	6	Sanborn's	08:02	09:54	01:52	00:00		
Norte	7	Pollo Sinaloense Cri Cri	10:01	10:02	00:01	00:07	Random.Uniform(6.5,7.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Norte	8	IPE	10:03	10:06	00:03	00:01	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Norte	9	Gym Pluviosilla	10:20	10:22	00:02	00:14	Random.Uniform(13.5,14.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Norte	10	Jardín de Niños Ignacio de la llave	10:25	10:29	00:04	00:03	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(3.5,4.5)
Norte	11	Escuela Hermeregildo Galeana	10:31	10:36	00:05	00:02	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(4.5,5.5)
Norte	12	Jardín Rafael Delgado	10:47	10:50	00:03	00:11	Random.Uniform(10.5,11.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Norte	13	Escuela Ignacio Allende	10:52	10:55	00:03	00:02	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Norte	14	Guardería Kinder Nino	10:57	11:06	00:09	00:02	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(8.5,9.5)
Norte	15	UGM licenciatura	11:08	11:10	00:02	00:02	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Norte	16	Carne Mart (Circunvalación 14 G Loc. A, Espinal bajo)	11:16	11:19	00:03	00:06	Random.Uniform(5.5,6.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Norte	17	Cocina "Las Tablitas" (Las Gordas")	11:22	11:24	00:02	00:03	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Norte	18	Colegio Guillaumin	12:12	12:15	00:03	00:48	Random.Uniform(47.5,48.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Norte	19	Ursulo Galván	12:22	12:31	00:09	00:07	Random.Uniform(6.5,7.5)	Random.Uniform(8.5,9.5)
Norte	20	Jardín Julio López Silva	12:42	12:47	00:05	00:11	Random.Uniform(10.5,11.5)	Random.Uniform(4.5,5.5)
Norte	21	Escuela Ahauailizapan	12:50	12:53	00:03	00:03	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Norte	22	Hotel del Río	13:26	13:28	00:02	00:33	Random.Uniform(32.5,33.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Norte	23	Mayita	13:32	13:43	00:11	00:04	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(10.5,11.5)
Norte	24	Escuela Gómez	13:45	13:45	00:00	00:02	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(0.4,0.6)
Norte	25	CUPRUM	13:46	13:48	00:02	00:01	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Norte	26	Guardería Nenitos	13:49	13:52	00:03	00:01	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Norte	27	Carnicería Wendy	14:01	14:03	00:02	00:09	Random.Uniform(8.5,9.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Norte	28	Little Cesar's	14:04	14:21	00:17	00:01	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(16.5,17.5)
Norte	29	Clínica de Rehabilitación	14:36	14:39	00:03	00:15	Random.Uniform(14.5,15.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Norte	30	Ferretería de Materiales del Centro	14:40	14:44	00:04	00:01	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(3.5,4.5)
Norte	31	Ferretería El faro	14:46	14:48	00:02	00:02	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Norte	32	Telmex Ote 31	14:51	14:55	00:04	00:03	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(3.5,4.5)

Anexo 5 Tiempos de traslado y de servicio con distribuciones Ruta Calle Real

Zona	CVO	Negocio	Hora de llegada	Hora de salida	Tiempo de servicio	Tiempo de traslado	Tiempo Processing Time Simio	Tiempo Timepath Simio
		SERMUN		06:15	15			Random.Uniform(10,20)
Real	1	ADO	06:35	06:40	00:05	00:20	Random.Uniform(19.5,20.5)	Random.Uniform(4.5,5.5)
Real	2	Sora	06:44	07:24	00:40	00:04	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(39.5,40.5)
Real	3	HGRO N°1	07:30	09:00	01:30	00:06	Random.Uniform(5.5,6.5)	Random.Uniform(89.5,90.5)
Real	4	La braza (fte a Yamboo)	09:03	09:05	00:02	00:03	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Real	5	Hospital Covadonga	09:08	09:45	00:37	00:03	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(36.5,37.5)
Real	6	Delegación IMSS	09:49	10:01	00:12	00:04	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(11.5,12.5)
Real	7	Clínica 7	10:01	10:10	00:09	00:00	Random.Uniform(0.4,0.6)	Random.Uniform(8.5,9.5)
Real	8	Pozolazo	10:12	10:14	00:02	00:02	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Real	9	Unidad de Hemodialisis Covadonga	10:16	10:26	00:10	00:02	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(9.5,10.5)
Real	10	Pollo El sinaloense PNTE 7	10:27	10:28	00:01	00:01	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Real	11	Sanatorio Escudero	10:28	10:30	00:02	00:00	Random.Uniform(0.4,0.6)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Real	12	Casa de la asegurada	10:31	10:47	00:16	00:01	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(15.5,16.5)
Real	13	Pollo Feliz	10:49	10:50	00:01	00:02	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Real	14	McDonalds Ote 6	10:56	11:09	00:13	00:06	Random.Uniform(5.5,6.5)	Random.Uniform(12.5,13.5)
Real	15	La braza (junto a ADO) Braza I	11:10	11:15	00:05	00:01	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(4.5,5.5)
Real	16	Dominos pizza (fte a braza)	11:10	11:15	00:05	00:00		
Real	17	Marisquería Los nuevos jarocho	11:21	11:24	00:03	00:06	Random.Uniform(5.5,6.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Real	18	Hospital Concordia	11:28	11:31	00:03	00:04	Random.Uniform(3.5,4.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Real	19	UMF #1	11:31	11:38	00:07	00:00	Random.Uniform(0.4,0.6)	Random.Uniform(6.5,7.5)
Real	20	Jurisdicción sanitaria	11:39	11:51	00:12	00:01	Random.Uniform(0.5,1.5)	Random.Uniform(11.5,12.5)
Real	21	Yam boo	12:00	12:05	00:05	00:09	Random.Uniform(8.5,9.5)	Random.Uniform(4.5,5.5)
Real	22	UMF #5	13:24	13:36	00:12	01:19	Random.Uniform(78.5,79.5)	Random.Uniform(11.5,12.5)
Real	23	Centro de Capacitación del IMSS	14:05	14:11	00:06	00:29	Random.Uniform(28.5,29.5)	Random.Uniform(5.5,6.5)
Real	24	UMF #6	14:17	14:21	00:04	00:06	Random.Uniform(5.5,6.5)	Random.Uniform(3.5,4.5)
Real	25	Oficina de Quejas del IMSS (Pte. 8 569, Unión Obrera, 94350 Orizaba, Ver.)	14:28	14:31	00:03	00:07	Random.Uniform(6.5,7.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Real	26	Almacén delegacional del IMSS	14:51	14:53	00:02	00:20	Random.Uniform(19.5,20.5)	Random.Uniform(1.5,2.5)
Real	27	UMF #2	15:02	15:03	00:01	00:09	Random.Uniform(8.5,9.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Real	28	UMF #3 (Del parque Emilio Carranza)	15:12	15:20	00:08	00:09	Random.Uniform(8.5,9.5)	Random.Uniform(7.5,8.5)
Real	29	UMF # 4	15:53	16:00	00:07	00:33	Random.Uniform(32.5,33.5)	Random.Uniform(6.5,7.5)

Anexo 6 Tiempos de traslado y de servicio con distribuciones Ruta Orgánica

Zona	CVO	Negocio	Hora de llegada	Hora de salida	Tiempo de servicio	Tiempo de traslado	Tiempo Processing Time Simio	Tiempo Timepath Simio
		SERMUN		06:15	15			Random.Uniform(10,20)
Orgánica	1	Mercado de Flores Locales Rocío	07:00	07:01	00:01	00:45	Random.Uniform(44.5,45.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Orgánica	2	Mercado Melchor Ocampo	07:08	07:16	00:08	00:07	Random.Uniform(6.5,7.5)	Random.Uniform(7.5,8.5)
Orgánica	3	Hotel Misión orgánica	07:29	07:30	00:01	00:13	Random.Uniform(12.5,13.5)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Orgánica	4	Hotel Pluviosilla	07:32	07:48	00:16	00:02	Random.Uniform(1.5,2.5)	Random.Uniform(15.5,16.5)
Orgánica	5	M. Cerritos	08:08	08:28	00:20	00:20	Random.Uniform(19.5,20.5)	Random.Uniform(19.5,20.5)
Orgánica	6	Los bukis	08:35	08:52	00:17	00:07	Random.Uniform(6.5,7.5)	Random.Uniform(16.5,17.5)
Orgánica	7	Mercado Zapata	08:55	09:11	00:16	00:03	Random.Uniform(2.5,3.5)	Random.Uniform(15.5,16.5)
Orgánica	8	DACSA	09:11	09:12	00:01	00:00	Random.Uniform(0.4,0.8)	Random.Uniform(0.5,1.5)
Orgánica	9	Fogón Do Brasil Ote 5	09:31	09:41	00:10	00:19	Random.Uniform(18.5,19.5)	Random.Uniform(9.5,10.5)
Orgánica	10	Estrella do Brasil Ote 7	09:49	09:52	00:03	00:08	Random.Uniform(7.5,8.5)	Random.Uniform(2.5,3.5)
Orgánica	11	Partida Lab	09:57	10:03	00:06	00:05	Random.Uniform(4.5,5.5)	Random.Uniform(5.5,6.5)
Orgánica	12	Soriana cir. Orgánica	10:19	10:55	00:36	00:16	Random.Uniform(15.5,16.5)	Random.Uniform(35.5,36.5)
Orgánica	13	Mercado Cerritos	12:13	12:30	00:17	01:18	Random.Uniform(77.5,78.5)	Random.Uniform(16.5,17.5)
Orgánica	14	Soriana circunvalación	12:50	13:30	00:40	00:20	Random.Uniform(19.5,20.5)	Random.Uniform(39.5,40.5)
Orgánica	15	Jugos Colohua orgánica	13:40	13:45	00:05	00:10	Random.Uniform(9.5,10.5)	Random.Uniform(4.5,5.5)
Orgánica	16	Mercado de Flores Locales Rocío	14:00	14:30	00:30	00:15	Random.Uniform(14.5,15.5)	Random.Uniform(29.5,30.5)

Anexo 7 Ruta Sur optimizada

Nº	Trayecto	Tiempo Maps (min)	Tiempo extra (min)	Tiempo Total (min)	TimePaths Random.Uniform (min,máx)
1	SERMUN-Rastro municipal	8	2	10	(9.5,10.5)
2	Rastro municipal-Plaza Faro	1	1	2	(1.5,2.5)
3	Plaza Faro-Farm. Guadalajara Sur 33	1	1	2	(1.5,2.5)
4	Farm. Guadalajara Sur 33-Santa Gertrudis	5	1	6	(5.5,6.5)
5	Santa Gertrudis-General de Seguros	2	1	3	(2.5,3.5)
6	General de seguros-Esc. Felipe Suburbie	1	1	2	(1.5,2.5)
7	Esc. Felipe Suburbie-Jardín Margarita Maza	2	1	3	(2.5,3.5)
8	Jardín Margarita Maza-Parroquia B. Nuevo	2	1	3	(2.5,3.5)
9	Parroquia B. Nuevo-Holanda	1	1	2	(1.5,2.5)
10	Holanda-Las gemelas A	7	2	9	(8.5,9.5)
11	Las gemelas A-Las Gemelas B	8	2	10	(9.5,10.5)
12	Las Gemelas B-Cedis Molinera de México	1	0.5	1.5	(1,2)
13	Cedis Molinera de México-Cianca	9	2	11	(10.5,11.5)
14	Cianca-Filazinc	1	0.5	1.5	(1,2)
15	Filazinc-Rovianda	1	0.5	1.5	(1,2)
16	Rovianda-TIUSA	1	0.5	1.5	(1,2)
17	TIUSA-Carnitas Cadena	6	2	8	(7.5,8.5)
18	Carnitas Cadena-Escuela Aztlán	11	3	14	(13.5,14.5)
19	Escuela Aztlán-Jardín Cri Cri	1	0.5	1.5	(1,2)
20	Jardín Cri Cri-Mezcladora Lucas	6	2	8	(7.5,8.5)
21	Mezcladora Lucas-Servicio Diez	1	1	2	(1.5,2.5)
22	Servicio Diez-Farmacia Guadalajara Av. 5	1	0.5	1.5	(1,2)
23	Farm. Guadalajara Av. 5-Manufacturas Simón	2	1	3	(2.5,3.5)
24	Manufacturas Simón-Llantera Rojoy FYPA	2	1	3	(2.5,3.5)
25	Llantera Rojo y FYPA-Fam. Guadalajara Ote.2	1	1	2	(1.5,2.5)
26	Farm. Guadalajara Ote.2-Autohotel Paradise	3	1	4	(3.5,4.5)
27	Autohotel Paradise-Quinta Escamela	2	1	3	(2.5,3.5)
28	Quinta Escamela-Colate	1	0.5	1.5	(1,2)
29	Colate-Starbucks	5	1	6	(5.5,6.5)
30	Starbucks-Chedraui	4	1	5	(4.5,5.5)
31	Chedraui-Ceico Preescolar y abejitas	2	1	3	(2.5,3.5)
32	Ceico Preescolar y abejitas-IMPS	1	0.5	1.5	(1,2)
33	IMPS-Hotel Trueba y Haus	3	1	4	(3.5,4.5)
34	Hotel Trueba y Haus-CFE Ote. 8	1	0.5	1.5	(1,2)
35	CFE Ote.8-Guardería Nenitos	1	1	2	(1.5,2.5)
36	Guardería Nenitos-Hotel Mirador	1	0.5	1.5	(1,2)
37	Hotel Mirador-Bla Bla	3	1	4	(3.5,4.5)
38	Bla Bla-Esc. Carlos A. Carrillo	3	1	4	(3.5,4.5)
39	Esc. Carlos A. Carrillo-DIF	3	1	4	(3.5,4.5)
40	DIF-Harinera y Manufact. de Orizaba	1	1	2	(1.5,2.5)
41	Harinera y Manufact. de Orizaba-Past. Grisel Librado R.	4	1	5	(4.5,5.5)
42	Past. Grisel Librado R.-SERMUN	5	1	6	(5.5,6.5)

Anexo 8 Ruta Centro optimizada

Nº	Trayecto	Tiempo Maps (min)	Tiempo extra (min)	Tiempo Total (min)	TimePaths Random.Uniform (min,máx)
1	SERMUN-Coppel Madero	12	3	15	(14.5,15.5)
2	Coppel Madero-Soriana C. Real	8	2	10	(9.5,10.5)
3	Soriana C. Real- Rest Sugar y añadidos	11	3	14	(13.5,14.5)
4	Rest. Sugar y añadidos-Juzgado 4º y Química Médica	1	1	2	(1.5,2.5)
5	Juzgado 4º y Química Médica-Esc. Cultura y Progreso	2	1	3	(2.5,3.5)
6	Esc. Cultura y Progreso-Salón Moctezuma y Santander	1	0.5	1.5	(1,2)
7	Salón Moctezuma y Santander-Iglesia del Carmén	3	1	4	(3.5,4.5)
8	Iglesia del Carmén-Coyametla	4	1	5	(4.5,5.5)
9	Coyametla-Cometra	1	1	2	(1.5,2.5)
10	Cometra-Hotel Holliday Inn	5	1	6	(5.5,6.5)
11	Hotel Holliday Inn-Nussa	6	2	8	(7.5,8.5)
12	Nussa-Guard Peques Rebsamen	3	1	4	(3.5,4.5)
13	Guard. Peques Rebsamen-Manitas que trabajan	3	1	4	(3.5,4.5)
14	Manitas que trabajan-Panadería Ara	2	1	3	(2.5,3.5)
15	Panadería Ara-FYMSSSA	3	1	4	(3.5,4.5)
16	FYMSSSA-Los Antojos del Fogón	2	1	3	(2.5,3.5)
17	Los Antojos del Fogón-Facultad de enfermería	4	1	5	(4.5,5.5)
18	Facult. De enfermería-Sanatorio Colón	3	1	4	(3.5,4.5)
19	Sanatorio Colón-CEUG	3	1	4	(3.5,4.5)
20	CEUG-Guard. Chiquitines	2	1	3	(2.5,3.5)
21	Guard. Chiquitines-Panadería Los Angeles	1	0.5	1.5	(1,2)
22	Panadería Los Angeles-Anexo Tortas tradicionales	2	1	3	(2.5,3.5)
23	Anexo Tortas Trad.-Dauzón	5	1	6	(5.5,6.5)
24	Dauzón-Calvario y CPO	1	0.5	1.5	(1,2)
25	Calvario y CPO-Tortas las de milanesa	2	1	3	(2.5,3.5)
26	Las de Milanesa-Torre Telmex	1	1	2	(1.5,2.5)
27	Torre Telmex-Farm. Guadalajara Colón	5	1	6	(5.5,6.5)
28	Farm. Guadalajara Colón-Grupo Tortas (Orizabeñas, Mexicanas, Gran Torta)	1	0.5	1.5	(1,2)
29	Grupo Tortas-Catedral y Veana	1	0.5	1.5	(1,2)
30	Catedral y Veana-Carnicería El Jarocho	5	1	6	(5.5,6.5)
31	Carnicería El Jarocho-Carnicerías Grijalva y Tortas Las Tradicionales	4	1	5	(4.5,5.5)
32	Grijalva y Tortas Las Tradicionales-Museo de arte, merc. de artesanías y Jugos California	1	1	2	(1.5,2.5)
33	Museo de arte, merc. de artesanías y Jugos California-Grupo Palacio de Hierro	1	1	2	(1.5,2.5)
34	Grupo Palacio de Hierro-ISECF	6	1	7	(6.5,7.5)
35	ISECF-La Casona	1	1	2	(1.5,2.5)
36	La Casona-Palacio municipal	2	1	3	(2.5,3.5)
37	Palacio municipal-Clinica Buen Pastor	1	0.5	1.5	(1,2)
38	Clinica Buen Pastor-Instituto Atenas	1	0.5	1.5	(1,2)
39	Instituto Atenas-Grupo Anglo Francés	1	1	2	(1.5,2.5)
40	Grupo Anglo Francés-Scattola	3	1	4	(3.5,4.5)
41	Scattola-SERMUN	8	2	10	(9.5,10.5)

Anexo 9 Ruta Norte optimizada

Nº	Trayecto	Tiempo Maps (min)	Tiempo extra (min)	Tiempo Total (min)	TimePaths Random.Uniform (min,máx)
1	SERMUN-Est. de Policía	11	3	14	(23.5,24.5)
2	Inspección de policía-UGM	3	1	4	(3.5,4.5)
3	UGM-Kinder Nino	4	1	5	(4.5,5.5)
4	Kinder Nino-Carne Mart	2	1	3	(2.5,3.5)
5	Carne Mart-Las tablitras	1	1	2	(1.5,2.5)
6	Las tablitras-Plaza Valle	1	41	42	(41.5,42.5)
7	Plaza Valle-Esc. Prim. Fed. Ignacio Allende	3	1	4	(3.5,4.5)
8	Esc. Prim. Fed. Ignacio Allende-Jardín Rafael Delgado	2	1	3	(2.5,3.5)
9	Jardín Rafael Delgado-Esc. Prim. Hermenegildo Galeana	6	2	8	(7.5,8.5)
10	Esc. Prim. Hermenegildo-Jardín Ignacio de la Llave	3	1	4	(3.5,4.5)
11	Jardín Ignacio de la Llave-Gym Pluviosilla	3	1	4	(3.5,4.5)
12	Gym Pluviosilla-Escuela Úrsulo Galván	1	1	2	(1.5,2.5)
13	Escuela Úrsulo Galván-Escuela Ahauializapan	3	1	4	(3.5,4.5)
14	Escuela Ahauializapan-Jardín Julio López Silva	1	1	2	(1.5,2.5)
15	Jardín Julio López Silva-Colegio Guillaumin	2	1	3	(2.5,3.5)
16	Colegio Guillaumin-CDO Norte	6	2	8	(7.5,8.5)
17	CDO Norte-Panadería Flores	2	3	5	(4.5,5.5)
18	Panadería Flores-Ferretería El Faro	1	2	3	(2.5,3.5)
19	Ferretería El Faro-Abastecedora de Mat del Centro	2	3	5	(4.5,5.5)
20	Abastecedora de Mat del Centro-Clinica de adicciones	1	2	3	(2.5,3.5)
21	Clinica de adicciones-IPE	3	4	7	(6.5,7.5)
22	IPE-Pollo El Sinaloense	5	6	11	(10.5,11.5)
23	Pollo El Sinaloense-Telmex Ote. 31	1	2	3	(2.5,3.5)
24	Telmex Ote. 31-Little Caesars	3	4	7	(6.5,7.5)
25	Little Caesars-Carnicería Wendy	1	2	3	(2.5,3.5)
26	Carnicería Wendy-Guardería Nenitos	1	2	3	(2.5,3.5)
27	Guardería Nenitos-CUPRUM	5	6	11	(10.5,11.5)
28	CUPRUM-Esc. Gómez Izquierdo	2	3	5	(4.5,5.5)
29	Esc. Gómez Izquierdo-Pastelería Mayita	1	2	3	(2.5,3.5)
30	Pastelería Mayita-Hotel del Río	3	21	24	(23.5,24.5)
31	Hotel del Río-SERMUN	12	13	25	(24.5,25.5)

Anexo 10 Ruta Calle Real optimizada

Nº	Trayecto	Tiempo Maps (min)	Tiempo extra (min)	Tiempo Total (min)	TimePaths Random.Uniform (min,máx)
1	SERMUN-Hospital Covadonga	9	2	11	(10.5,11.5)
2	Hosp. Covadonga-ADO	3	1	4	(3.5,4.5)
3	ADO-Sora	4	1	5	(4.5,5.5)
4	Sora-Yambo	5	1	6	(5.5,6.5)
5	Yambo-HGRO N°1	4	1	5	(4.5,5.5)
6	HGRO N°1-UMF N°5	7	2	9	(8.5,9.5)
7	UMF N°5-Braza Sur 29	9	2	11	(10.5,11.5)
8	Braza Sur 29-Los Jarochos	3	1	4	(3.5,4.5)
9	Los Jarochos-Hosp. Concordia	3	1	4	(3.5,4.5)
10	Hosp. Concordia-Jurisdicción Sanitaria	1	1	2	(1.5,2.5)
11	Jurisdicción sanitaria-UMF N°1	2	1	3	(2.5,3.5)
12	UMF N°1-Centro de Capacitación IMSS	9	2	11	(10.5,11.5)
13	Centro de Capacitación IMSS-UMF N°6	7	2	9	(8.5,9.5)
14	UMF N°6-Oficina de Quejas IMSS	7	2	9	(8.5,9.5)
15	Oficina de Quejas IMSS-Delegación IMSS	4	1	5	(4.5,5.5)
16	Delegación IMSS-UMF N°7	1	1	2	(1.5,2.5)
17	UMF N°7-Pozolazo	2	1	3	(2.5,3.5)
18	Pozolazo-McDonalds	3	1	4	(3.5,4.5)
19	McDonalds-La Braza Sur 11	1	1	2	(1.5,2.5)
20	La Braza Sur 11-U.Hemodiálisis Covagonga	6	2	8	(7.5,8.5)
21	U.Hemodiálisis Covagonga-El Sinaloense	1	1	2	(1.5,2.5)
22	El Sinaloense-Escudero	1	1	2	(1.5,2.5)
23	Escudero-Pollo feliz	2	1	3	(2.5,3.5)
24	Pollo Feliz-Asegurada	4	1	5	(4.5,5.5)
25	Asegurada-Almacén IMSS	9	2	11	(10.5,11.5)
26	Almacén IMSS-UMF N°2	2	1	3	(2.5,3.5)
27	UMF N°2-UMF N°3	7	2	9	(8.5,9.5)
28	UMF N°3-UMF N°4	8	2	10	(9.5,10.5)
29	UMF N°4-Relleno Sanitario	10	2	12	(11.5,12.5)
30	Relleno Sanitario-Sermun	20	4	24	(23.5,24.5)

Anexo 11 Ruta Orgánica optimizada

Nº	Trayecto	Tiempo Maps (min)	Tiempo extra (min)	Tiempo Total (min)	TimePaths Random.Uniform (min,máx)
1	SERMUN-Hotel Pluviosilla	10	2	12	(11.5,12.5)
2	Hotel Pluviosilla-Hotel Misión Orizaba	6	1.5	7.5	(7,8)
3	Hotel Misión Orizaba-Fogón Do Brasil	7	2	9	(8.5,9.5)
4	Fogón Do Brasil-Estrella Do Brasil	2	1	3	(2.5,3.5)
5	Estrella Do Brasil-Partida Lab	2	1	3	(2.5,3.5)
6	Partida Lab-DACSA	4	1	5	(4.5,5.5)
7	DACSA-Mercado Zapata	1	1	2	(1.5,2.5)
8	Mercado Zapata-Los Bukis	2	1	3	(2.5,3.5)
9	Los Bukis-Soriana Circunvalación	5	1	6	(5.5,6.5)
10	Soriana Circunvalación-Mercado Cerritos	4	1	5	(4.5,5.5)
11	Mercado Cerritos-Soriana Circunvalación	5	1	6	(5.5,6.5)
12	Soriana Circunvalación-Mercado Cerritos	4	1	5	(4.5,5.5)
13	Mercado Cerritos-Mercado Melchor Ocampo	9	2	11	(10.5,11.5)
14	Mercado Melchor Ocampo-Mercado de Flores	5	1	6	(5.5,6.5)
15	Mercado de Flores-Jugos Colohua	6	2	8	(7.5,8.5)
16	Jugos Colohua-SERMUN	9	2	11	(10.5,11.5)