



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

**“EVALUACIÓN DE LA RUTA 8 DE RECOLECCIÓN DE
RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE ORIZABA,
VERACRUZ USANDO SIMULACIÓN EN SIMIO”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

PRESENTA:

ING. MARÍA JOSÉ CRUZ GARCÍA

DIRECTOR DE TESIS:

M.I.I. CONSTANTINO GERARDO MORAS SÁNCHEZ

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. MIGUEL JOSUÉ HEREDIA ROLDÁN



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO

ABRIL 2023



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, 21/abril/2023

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

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

C. CRUZ GARCÍA MARÍA JOSÉ
Candidato a Grado de Maestro en:
INGENIERÍA INDUSTRIAL
PRESENTE

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

**"EVALUACIÓN DE LA RUTA 8 DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD
DE ORIZABA, VERACRUZ USANDO 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®

Cuahtemoc Sánchez R.

CUAUHTEMOC SANCHEZ RAMIREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



CSR/magh

OG-13-F06



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



2023
AÑO DE
Francisco
VILLA
EL REVOLUCIONARIO DEL NOROCCIDENTE



Orizaba, Veracruz **Marzo 30, de 2023.**
Asunto: **Revisión de trabajo escrito**

C. CUAUHEMOC SANCHEZ RAMIREZ
JEFE 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.:

CRUZ GARCÍA MARÍA JOSÉ

La cual lleva el título de:

EVALUACIÓN DE LA RUTA 8 DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE
ORIZABA, VERACRUZ USANDO SIMULACIÓN EN SIMIO

y concluyen que se acepta.

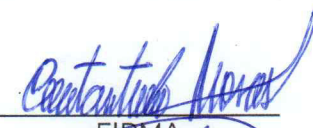
ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: **MII CONSTANTINO G. MORAS SÁNCHEZ**

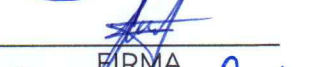
SECRETARIO: **DR. MIGUEL JOSUÉ HEREDIA ROLDÁN**

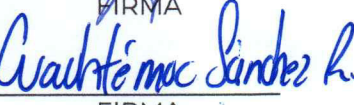
VOCAL: **M.C. MAGNO ANGEL GONZÁLEZ HUERTA**

VOCAL SUP.: **DR. CUAUHTÉMOC SÁNCHEZ RAMÍREZ**


FIRMA


FIRMA


FIRMA


FIRMA

TA-09-F18



Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a las personas más importantes en mi vida, mi Mamá, mi Papá y mi Nana y mi abuela María.

Mi Mamá y mi Abuela María, por motivos que aún no alcanzo a entender, ya no están más conmigo, mi madre el 25 de mayo del presente año, cumple 4 años de partir con Dios y mi abuela partiría un 2 de noviembre del 2022.

No hay día en que no piense en ustedes, y me parte el alma que ya no estén conmigo, es como si junto con ustedes una parte de mi corazón se hubiera marchado, ojalá siguieran aquí, aun así estoy agradecida con el tiempo que Dios me brindó con ambas.

También esto me lo dedico a mí, no he logrado vencer la depresión, pero aprendí a no perder contra ella, aprendí a luchar por las personas que amo y aún están conmigo. La idea de acabar con mi vida ya no ronda más por mi cabeza y ahora solo es un triste recuerdo amargo.

“Siempre llevaré conmigo, el recuerdo de los dos amores más grande de mi vida.

El primero, me enseñó a como estar preparada para enfrentar la vida, y el segundo, me enseñó a cómo enfrentar la vida sin estar preparada”.

(Derbez, 2013)

Y por último, Mamá, estoy cumpliendo lo prometido, estoy siendo valiente, estoy siendo fuerte, y te agradezco por darme la vida, porque también te prometí que daría lo mejor de mí y no me voy a rendir, nunca más lo haré, porque la vida es bella.

Con amor, Majito.

Agradecimientos

A mi estimado director de tesis el M.I.I. Constantino Gerardo Moras Sánchez a quien le agradezco por apoyarme en todo este largo camino, guiarme con paciencia y sabiduría durante este proyecto. Maestro Tino, es un excelente asesor y estoy muy contenta por haber trabajado con usted, es un gran maestro y maravillosa persona.

Al Dr. Miguel Josué Heredia Roldán, quien me brindó la oportunidad de trabajar con él y encontrar el lugar donde desarrollar el proyecto. Es un excelente maestro y tiene una paciencia increíble, es una de las personas más gratas que he conocido y lo admiro mucho. Gracias por ayudarme en este largo pero corto camino, mi estimado profe Mickey.

También le agradezco a mis profesores de la maestría, Dr. Carlos Diaz Ramos, M.C. Jorge Luis Hernández Mortera, Dr. Alfonso Aguilar Lasserre y M.C. Magno Ángel González Huerta, cada una de sus materias fue un reto para mí, puesto que no soy Ing. Industrial, soy Ing. Químico, Me divertí muchísimo en el transcurso de la maestría y los retos que cada uno presentó para mi persona, muchas gracias por ser maestros tan apasionados con su labor.

A mis compañeros de maestría, Maricruz Moctezuma, Edgar Aguilar, Luis Ángel Bello, Eve, Dani y Will. Gracias por ser mis amigos y mostrarme tanto de tan poco, fueron una parte importante para lograr salir de mi depresión.

Mi querida Maestra Nancy, gracias por confiar en mí y darme tu apoyo incondicional, mi Nana, una persona que sin tener que hacerlo, básicamente me adoptó como una más de sus hijas, ahora tengo dos mamás, una en el cielo y otra en la tierra.

Gracias Dios, estaba negada a ti, pero ahora veo que, en efecto, tus tiempos son perfectos.

Me siento agradecida y orgullosa de ahora ser parte del Instituto Tecnológico de Orizaba, que forma parte del TecNM, y también ser parte de la UV, principales casas de estudio de la Ciudad de Orizaba, Ver.

Gracias también al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por haberme permitido estudiar una maestría, debido al financiamiento otorgado.

Resumen

En este proyecto se desarrolló un modelo de simulación utilizando el software SIMIO de la ruta 8 perteneciente a la ciudad de Orizaba, Ver, donde se busca evaluar la eficiencia de la recolección de basura mediante el sistema de barrido manual implementado analizando las medidas de desempeño de interés, las cuales son los tiempos de recolección y la estimación aproximada de los RSU recolectados, así como el número de trabajadores asignados a la ruta.

Para ello se utilizó la metodología de simulación planteada por Law y Kelton que abarca desde la formulación del problema hasta la documentación de los resultados mediante una serie de 10 pasos. Los datos para la construcción del modelo en SIMIO corresponden al proceso de barrido manual o barrido fino, que consta de diferentes procesos. Una vez terminada la construcción del modelo son implementadas las pruebas estadísticas para su validación (la prueba de la t-pareada) y la obtención del número óptimo de corridas del modelo (prueba de $n^*(\beta)$), para obtener el modelo base que tiene como finalidad representar el sistema real.

Una vez obtenido este modelo y analizar los datos brindados, se procede a realizar tres alternativas diferentes en las cuales son planteados escenarios modificando el modelo real. En la alternativa 1 se disminuye la cantidad de botes en un 10% así como una reubicación de éstos, en la alternativa 2 se realiza un aumento del 10% de los puntos de recolección, así como una reubicación de éstos, y en la alternativa 3 se realiza una reubicación de los botes y se disminuye la cantidad de trabajadores que realizan el recorrido de la ruta planteando un nuevo recorrido dentro de la ruta. Finalmente se obtiene cuatro modelos diferentes: Modelo base del sistema real, alternativa 1, alternativa 2 y la alternativa 3.

Con base a los resultados obtenidos del Modelo Base se tiene que: La alternativa 1 solo presenta una disminución en los tiempos de recorrido en una sola calle con un 3% de disminución en los tiempos y con relación a los RSU se obtuvo una mejoría del 11%. La alternativa 2 reflejó un aumento de un mínimo de 2% y un máximo del 5% en los tiempos de recorrido y con relación a los RSU se tiene un aumento de entre 4% y 11%, y por último, en la alternativa 3 se obtuvo una reducción de entre 9.8% y un 25.7% en los tiempos de recorrido, y en la recolección de RSU se obtuvo un aumento de entre 4.9% y 6.2% por calle.

Abstract

In this project, a simulation model was developed using SIMIO software for Route 8 in the city of Orizaba, Veracruz. The objective is to evaluate the efficiency of manual waste collection through the implemented sweeping system by analyzing performance measures of interest, which are collection times and the approximate estimation of collected solid waste, as well as the number of workers assigned to the route.

To do this, the simulation methodology proposed by Law and Kelton was used, which covers the formulation of the problem up to the documentation of the results through a series of 10 steps. The data for the construction of the model in SIMIO correspond to the manual sweeping process, which consists of different processes. Once the construction of the model is finished, statistical tests are implemented for validation (paired t-test) and the obtaining of the optimal number of model runs (test $n^*(\beta)$), to obtain the base model that aims to represent the real system.

Once this model is obtained and the provided data is analyzed, three different alternatives are proposed in which scenarios are modified from the real model. In alternative 1, the number of bins is decreased by 10% as well as their relocation. In alternative 2, there is a 10% increase in collection points, as well as their relocation. In alternative 3, bins are relocated and the number of workers who carry out the route is decreased, proposing a new route within the route. Finally, four different models are obtained: the base model of the real system, alternative 1, alternative 2, and alternative 3.

Based on the results obtained from the Base Model, it is found that: Alternative 1 only presents a decrease in travel times on a single street, with a 3% decrease in travel times and an improvement of 11% in the collected solid waste. Alternative 2 reflected a minimum increase of 2% and a maximum of 5% in travel times, with an increase of between 4% and 11% in the collected solid waste. Finally, in alternative 3, a reduction of between 9.8% and 25.7% in travel times was obtained, and an increase of between 4.9% and 6.2% in collected solid waste per street.

Contenido

Índice de ecuaciones	vi
Índice de figuras	vi
Índice de tablas	vii
Introducción.....	1
Capítulo 1 Generalidades.....	3
1.1 Generalidades	3
1.1.1 Enfoque estratégico.....	4
1.1.2 Marco geográfico	4
1.1.3 Estructura organizacional del área	6
1.1.4 Descripción del proceso	7
1.1.5 Planteamiento del problema.....	8
1.1.6 Objetivos.....	8
1.1.6.1 Objetivo general.....	8
1.1.6.2 Objetivos específicos.....	9
1.1.7 Justificación	9
Capítulo 2 Marco Teórico.....	11
2.1 Residuos Sólidos Urbanos (RSU).....	11
2.1.1 Sistemas de Aseo Urbano	12
2.1.2 Residuos Sólidos Domiciliarios no peligrosos depositados en vía pública.....	12
2.1.3 Almacenamiento de la recolección de Residuos Sólidos depositados en vía pública y sus contenedores	13
2.1.4 Disposición final de la recolección de residuos	14
2.1.5 Plantas recicladoras.....	15
2.1.6 Métodos para estimar las cantidades de residuos.....	16
2.2 Regulación en México para la disposición de desechos urbanos.....	18
2.3 Sistema de recolección de residuos en la Ciudad de Orizaba, Veracruz.....	19
2.4 Pruebas de Bondad de Ajuste	19
2.4.1 La prueba Chi-Cuadrada	20
2.4.2 La prueba de Kolmogorov – Smirnov.....	20
2.4.3 La prueba de Anderson-Darling.....	21
2.5 Distribuciones de probabilidad	22
2.5.1 Distribuciones Continuas	22
2.5.2 Distribuciones Discretas	25
2.6 Simulación	26
2.6.1 Clasificación de los modelos de simulación	27
2.6.2 Ventajas y desventajas de la simulación	28
2.6.3 Verificación y Validación del Modelo	28
2.6.3.1 Procedimiento estadístico para comparar datos reales con datos simulados	28
2.6.3.2 Procedimiento para la determinación de corridas óptimas del modelo	30
2.7 SIMIO.....	31
2.7.1 Elementos Básicos de SIMIO	31
Capítulo 3 Metodología.....	33
3.1 Formulación del problema y plan de estudio.....	33
3.2 Recolección de datos y construcción del modelo conceptual	33

Contenido	
3.3 Validación del modelo conceptual.....	38
3.4 Construcción del programa	38
3.5 Verificación del modelo de simulación	49
3.5.1 Estimación de basura recolectada	54
3.6 Determinación del número óptimo de corridas	55
3.7 Análisis de los resultados obtenidos	57
Capítulo 4 Análisis de las alternativas	60
Conclusiones	73
Capítulo 5 Referencias	76
Anexos	78

Índice de ecuaciones

Ecuación 2.1	17
Ecuación 2.2	17
Ecuación 2.3	20
Ecuación 2.4	20
Ecuación 2.5	21
Ecuación 2.6	21
Ecuación 2.7	21
Ecuación 2.8	21
Ecuación 2.9	21
Ecuación 2.10	23
Ecuación 2.11	23
Ecuación 2.12	24
Ecuación 2.13	25
Ecuación 2.14	26
Ecuación 2.15	26
Ecuación 2.16	29
Ecuación 2.17	29
Ecuación 2.18	29
Ecuación 2.19	29
Ecuación 2.20	29
Ecuación 2.21	29
Ecuación 2.22	29
Ecuación 2.23	29
Ecuación 2.24	30
Ecuación 2.25	30
Ecuación 2.26	31

Índice de figuras

Figura 1.1 Vista Satelital de la Ciudad de Orizaba, Ver (Google Maps).....	5
Figura 1.2 Vista Detallada de la Ruta 8.....	6
Figura 1.3 Diagrama base del barrido fino	7
Figura 2.1 Contenedores de plástico (izquierda) y contenedor industrial (derecha).....	14
Figura 2.2 La curva normal	22

Contenido

Figura 2.3 Distribuciones logarítmicas normales.	24
Figura 2.4 Distribuciones de Weibull ($\alpha=1$).....	25
Figura 3.1 Puntos de recolección localizados.....	35
Figura 3.2. Gráfica de probabilidad para recogido	37
Figura 3.3 Modelo Conceptual	38
Figura 3.4. Recorrido “Ala de Avión”.....	39
Figura 3.5. Componentes básicos de la Calle Colón	40
Figura 3.6. Timepath	40
Figura 3.7. Ejemplo de la parte final del modelado de una calle	41
Figura 3.8. División de la ruta	42
Figura 3.9. Fragmento de la Parte (A) de la ruta 8	42
Figura 3.10. Parte en “Y”	43
Figura 3.11 TransferNode ruta 8	43
Figura 3.12. Primer proceso	44
Figura 3.13. Intersección Ruta 8.....	44
Figura 3.14. Proceso para Timepath.....	44
Figura 3.15. Fragmento de la parte (B) de la ruta 8.....	45
Figura 3.16 Barra de tareas “Definitions> State”	45
Figura 3.17 State Variables	46
Figura 3.18 After Processing - Editor de propiedades.....	46
Figura 3.19 Resultado final de la elaboración de tablas dentro de SIMIO.	48
Figura 3.20. Barra de tareas. Breakpoint	49
Figura 3.21 Ejemplo de Tiempo de Recorrido	57
Figura 3.22 Resultado Sistema Actual	58
Figura 3.23 Basura Recolectada	59
Figura 4.1 Distribución actual de los puntos de recolección	60
Figura 4.2 Resultados de la Alternativa 1.....	63
Figura 4.3 Tiempo de recorrido en horas (Sistema Real vs Alternativa 1).....	64
Figura 4.4 Recolección de RSU (Sistema Real vs Alternativa 1).....	64
Figura 4.5 Resultados Alternativa 2.	66
Figura 4.6 Tiempo de recorrido en horas (Sistema Real vs Alternativa 2).....	66
Figura 4.7 Recolección de RSU (Sistema Real vs Alternativa 2).....	67
Figura 4.8 Alternativa 3 mostrada de forma gráfica.....	68
Figura 4.9 Resultados de la Alternativa 3.....	69
Figura 4.10 Tiempo de Recorrido (Sistema Real vs Alternativa 3).....	70
Figura 4.11 Recolección de RSU (Sistema Actual vs Alternativa 3)	71

Índice de tablas

Tabla 2.1 Diferencia de plantas recicladoras.....	16
Tabla 2.2 Biblioteca SIMIO	32
Tabla 3.1 Datos obtenidos de la cantidad de botes ubicados en la ruta 8.	35
Tabla 3.2.Distribuciones del modelo del sector centro de la ruta 8	37
Tabla 3.3. Distribuciones del modelo del sector Calle Real	38
Tabla 3.4. Objetos de SIMIO utilizados en la construcción del modelo de simulación.	39
Tabla 3.5. Orden de las Calles en el modelo	40
Tabla 3.6. Numeración asignada a las calles y cuadras	41
Tabla 3.7 Tiempo recorrido en horas.....	47
Tabla 3.8 Tiempo total del recorrido en horas.....	49
Tabla 3.9 Datos para prueba t-pareada de Calle Real.....	50
Tabla 3.10 Datos para prueba t-pareada de Oriente 9.....	51
Tabla 3.11 Datos para la prueba de t- pareada Calle Colón.....	52
Tabla 3.12 Intervalos de Confianza	53
Tabla 3.13 Corridas óptimas obtenidas para el modelo	57

Contenido

Tabla 3.14 Resultados del Sistema Actual	59
Tabla 4.1 Puntos de recolección por calle del sistema actual	61
Tabla 4.2 Resumen de puntos de recolección.....	61
Tabla 4.3 Modificaciones Alternativa 1	62
Tabla 4.4 Cantidad de puntos de recolección de acuerdo con la Alternativa 1	63
Tabla 4.5 Resultados del tiempo de recorrido por calle en horas (Alternativa 1).....	63
Tabla 4.6 Modificaciones Alternativa 2	65
Tabla 4.7 Cantidad de puntos de recolección de acuerdo con la Alternativa 2	65
Tabla 4.8 Resultados del tiempo de recorrido por calle en horas (Alternativa 2).....	66
Tabla 4.9 Resultados de las sumas del Sistema Real.....	69
Tabla 4.10 Resumen de resultados de la Alternativa 3	70
Tabla 4.11 Comparación de los tiempos de recorridos en horas	70
Tabla 4.12 Resultados de la Alternativa 3 (Galones)	71

Introducción

Los Residuos son definidos como los productos o materiales que son desechados en estado sólido, líquido, semisólidos o gaseoso, además de esto son clasificados de acuerdo con sus características en tres grupos: Residuos Sólidos Urbanos (RSU), Residuos de Manejo especial (RME) y Residuos Peligrosos (RP).

El manejo inadecuado de los Residuos Sólidos Urbanos tienen un fuerte impacto en el medio ambiente, el gran volumen con el que son generados se ve ligado a la discusión sobre la fabricación y consumo sostenible, en su mayoría son bienes para el hogar los causantes de que una gran variedad de residuos sean producidos día con día, es por esto que calcular de manera exacta la generación de RSU es una tarea compleja, ya que no es posible tener un registro exacto de todos los residuos que son producidos en una localidad; sin embargo, se realizan estimaciones de manera indirecta a partir de la medición de residuos producidos por persona o por hogar. (SEMARNAT, 2020).

La importancia de la correcta disposición y manejo de los RSU no solo es responsabilidad de los ciudadanos, también es responsabilidad de las autoridades competentes de cada ciudad o región, la recolección, gestión y manejo de los RSU es amplia y variada pero aun así tienen la misma finalidad, reducir el impacto ambiental en la disposición final de éstos. En el caso de la ciudad de Orizaba, Veracruz, la gestión de RSU se conforma por una serie de varios procesos.

El presente proyecto se enfoca únicamente a la recolección de los RSU dentro de la ciudad, la cual se realiza mediante dos formas: la primera consta de camiones recolectores encargada de las grandes cantidades de basura generadas en el hogar, los mercados, la zona comercial, etc. Mientras que la segunda forma es mediante el barrido manual de las calles, cuya función es mantener las calles y avenidas limpias. Ambos procesos se realizan mediante una correcta recolección a través de rutas planificadas que abarcan toda la localidad, conformadas por 13 rutas diferentes. La ruta que formará parte de este estudio es la ruta 8 la cual se ubica en el centro histórico de la ciudad y por esta razón cuenta con una mayor relevancia. Teniendo como objetivo principal realizar una evaluación de la eficiencia del sistema de recolección de RSU y poder identificar los posibles factores que afecten al sistema de manera directa o indirecta.

Esta ruta será evaluada mediante el desarrollo de un modelo de simulación con base en la metodología de Law y Kelton llevada a cabo en el software SIMIO. Dicha metodología cuenta con una serie de 10 pasos, donde se empieza desde la formulación del problema y el plan de

estudios, la recolección de los datos, la construcción y validación del modelo conceptual, para posteriormente construir el modelo y mediante una serie de pruebas estadísticas obtener las distribuciones con las cuales se alimenta al modelo además de realizar la verificación de éste, también se obtiene el número de corridas óptimas del modelo.

Una vez realizado lo anterior y pasando de manera positiva todas las pruebas aplicadas, es posible analizar los datos brindados por el sistema real del modelo de simulación mediante los cuales podremos proponer al menos tres alternativas donde se plantean diferentes escenarios con los cuales se busca dar con la solución más viable, minimizando el tiempo de recorrido, maximizando la cantidad de RSU recolectados y optimizando el número de trabajadores asignados a la ruta.

Finalmente se comparan los datos obtenidos del sistema real contra los datos obtenidos mediante las alternativas realizadas, con la intención de mostrar si se puede obtener una mejoría en el sistema real con los cambios realizados en cada uno de los escenarios.

Capítulo 1 Generalidades

1.1 Generalidades

La ciudad de Orizaba pertenece a la región de las altas montañas de Veracruz, con un total de 27.9 km² de superficie y sus 120,000 habitantes colocándola en el cuarto municipio más poblado del estado (SIEGVER, 2021).

Dicha ciudad a sido nombrada pueblo mágico 5 años consecutivos, contando con una gran cantidad de atractivos turísticos promoviendo la economía y el consumo local, debido a que fue una importante ciudad virreinal, su historia acumuló un patrimonio que hoy en día se ve reflejado sus calles y avenidas por su arquitectura. Otro título que dicha ciudad ostenta es el de la Escoba de Oro, otorgado por la asociación Atregus apoyar, premiar y difundir el buen saber hacer de la gestión de los residuos y el aseo urbano.

El mantener el título de Pueblo Mágico es resultado del arduo trabajo de las autoridades municipales, encargadas de coordinar, mantener y asegurar el patrimonio de la ciudad, así como cuidar de las calles, avenidas y bulevares del centro histórico, que se considera uno de los más importantes de la región, debido al tránsito con mayor afluencia de personas, visitantes, y turistas. Tomando en cuenta estos factores, se genera un mayor consumo de bienes y servicios lo que genera una cantidad considerable de desechos urbanos de diferentes tipos: orgánicos, inorgánicos y sanitarios. Una mala gestión de este tipo de residuos puede desencadenar diversos problemas, desde generar un aspecto negativo a las calles y avenidas hasta la propagación de plagas como roedores o insectos. Es por este motivo que el buen manejo de residuos generados día con día es un factor primordial, dicha responsabilidad recae sobre las autoridades competentes de cada municipio, siendo común que en estos se cuente con un departamento o coordinación de limpia pública.

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.

1.1.2 Marco geográfico

Una importante gestión del tratamiento de los Residuos Urbanos es vital para mantener la armonía e imagen de una ciudad, un medio ambiente de calidad evitando focos de infección y plagas que pueden surgir en el dado caso de un mal manejo ya que se pone en riesgo la integridad y salud física de los habitantes.

La recolección de los desechos urbanos es manipulada de maneras diferentes de acuerdo con las autoridades correspondientes y el país a donde pertenecen siguiendo las normativas adecuadas para evitar el daño al medio ambiente. En Orizaba se cuenta con un departamento de Limpia Pública, en dicho departamento se cuentan con un sistema de Recolección de Sólidos Urbanos, el cual se encuentra dividido en dos métodos diferente. El primero cuenta con 18 camiones recolectores (compactadores y volteo) y el segundo es por recolección manual.

El área abarcada del territorio de Orizaba consta de un total de 27.9 km², es dividida por un total de 13 rutas.

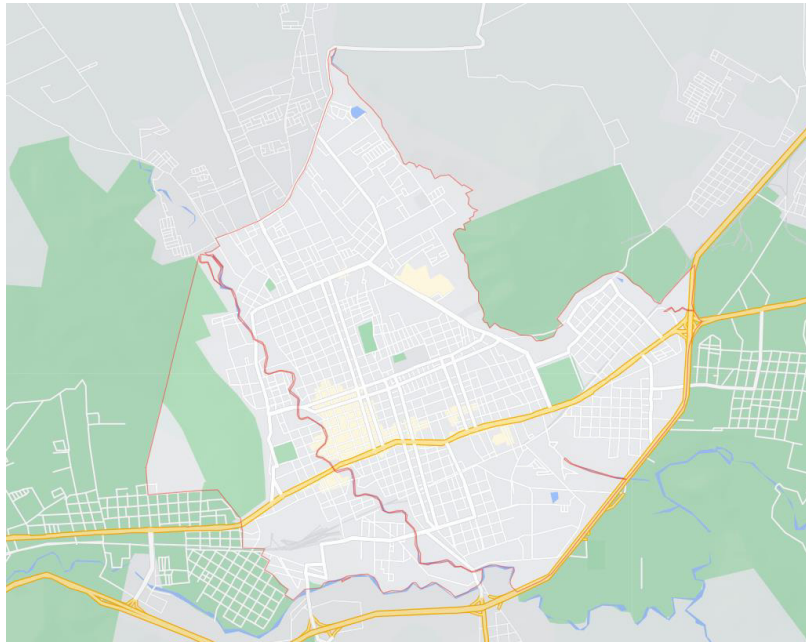


Figura 1.1 Vista Satelital de la Ciudad de Orizaba, Ver (Google Maps)

La ciudad colinda con los municipios de mariano Escobedo, Atzacan, Ixtaczoquitlán, Rafael Delgado y Rio Blanco (SIEGVER, 2021). La línea que se puede observar en medio del mapa mostrado en la Figura 1.1, es el Río Orizaba el cual cruza por toda la ciudad e incluso es un atractivo más en ésta.

La ruta con la cual se realizará el presente trabajo es la número 8, situada en el centro histórico de la ciudad, esta zona se encuentra delimitada por el Ecoparque Cerro del Borrego (Av. Cri Cri), La Calle Real u Oriente 6, Oriente 9 y la norte 10 como se puede observar en la Figura 1.2.

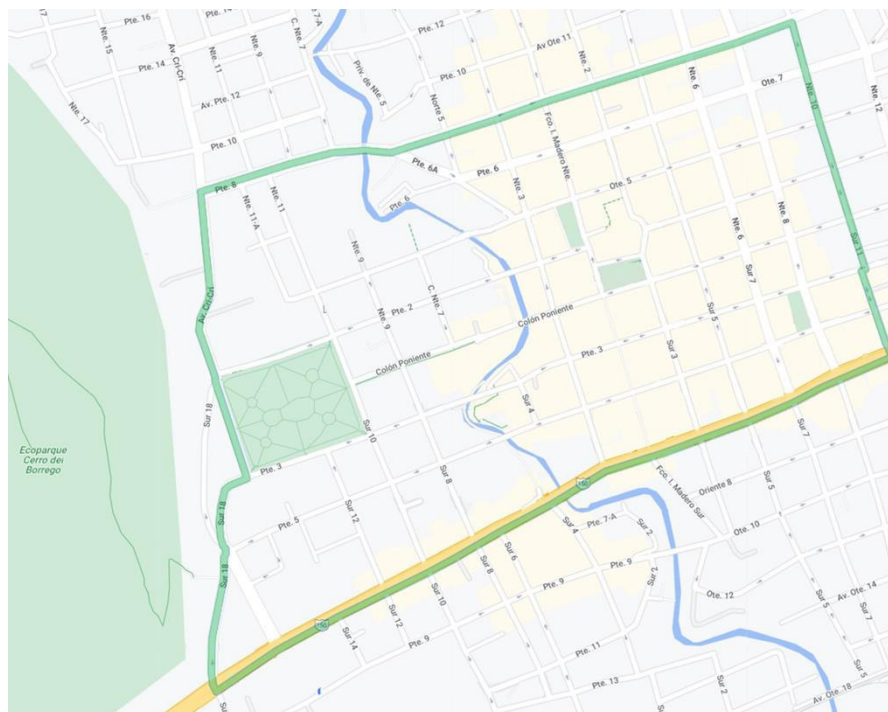


Figura 1.2 Vista Detallada de la Ruta 8

1.1.3 Estructura organizacional del área

La coordinación de Limpia Pública cuenta con un total de 238 trabajadores distribuidos a través de diferentes áreas, parque vehicular, gestor comercial, jefe de la planta Ecori y el jefe de personal del área de recolección, siendo éste último el que conforma la mayor parte.

El jefe encargado del área de recolección tiene a su disposición a cuadrillas que laboran conforma a su sección, en mayoría laboran en turno vespertino y matutino, con excepción a Rutas de Recolección que cuenta con turnos vespertino, matutino y nocturno, el personal de la coordinación de Limpia Pública se describe de la siguiente manera:

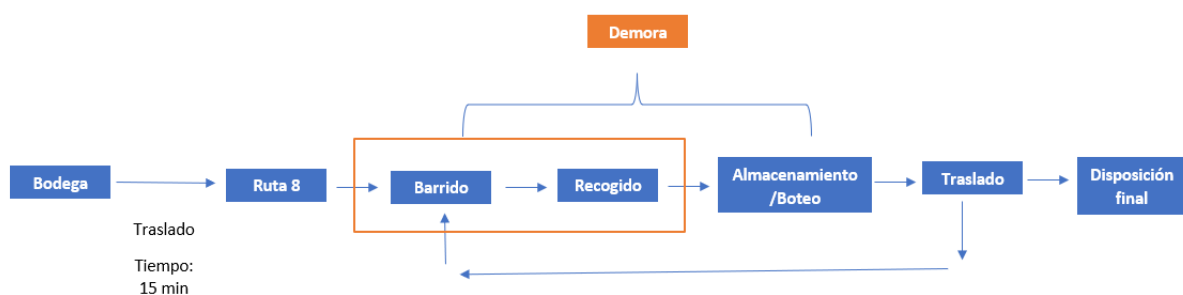
- Abejas (4)
- Hormigas (21)
- Barridos (79)
- Basura y predial (6)
- Descacharrización y voluminosos (2)
- Rutas de recolección (96)

Actualmente las cuadrillas que cuentan con mayor número de personal son la de rutas de recolección con 96 integrantes (40.33%), que tienen a su disposición 18 camiones recolectores, y la de barridos con un total de 79 (33.20%) integrantes encargados del aseo urbano y barrido fino.

1.1.4 Descripción del proceso

El proceso llevado a cabo para la recolección de residuos depositados en la calle inicia desde la salida de la bodega donde al trabajador se le proporciona el equipo necesario para iniciar su jornada laboral, posteriormente se le traslada a la ruta designada (ej. Ruta 8). El proceso de barrido fino se describe a continuación:

Figura 1.3 Diagrama base del barrido fino



- **Barrido:** El empleado barre toda la calle con una escoba hecha de hojas de palmera o restos de hierba a modo de simular un cepillo, procurando limpiar la mayor cantidad de polvo o basura que se encuentre a lo largo de la calle.
- **Recogido:** Acción que realiza el obrero al terminar de barrer el tramo de la calle de interés, donde almacena la basura recogida en una bolsa de plástico que porta en el cinturón a modo de simular una “cangurera”. Una vez la bolsa alcanza su límite se procede al siguiente paso.
- **Almacenamiento/Boteo:** El primero es la acción de descargar el contenido de la bolsa dentro del carro recolector, el segundo consiste en verificar el contenido de cada bote colocado en los postes de luz y que se encuentran distribuidos a lo largo de la ruta asignada, para posteriormente y bajo el criterio del trabajador decidir si vacía el contenido dentro del carro recolector.

- **Traslado:** Una vez terminado el aseo de la calle y la verificación de cada bote ubicado dentro de la cuadra, el trabajador desplaza el carro recolector hacia la siguiente cuadra. Esta acción se repetirá hasta el término o límite de la ruta asignada.
- **Demora:** Acción que impide la realización de cualquiera de las tres acciones descritas con anterioridad. Sucede de manera espontánea y afectan de manera directa o indirecta la realización de la tarea.

1.1.5 Planteamiento del problema

En la Ciudad de Orizaba, Veracruz se cuenta con un complejo sistema de barrido de calles avenidas y bulevares de toda la ciudad, el cual se conforma de 13 rutas diferentes las cuales son atendidas por 18 camiones recolectores de basura y un grupo de trabajadores destinados a la recolección hormiga. Para esto se ha seleccionado la ruta 8, la relevancia de ésta recae en su ubicación la cual es el centro histórico de la ciudad, provocando que las calles y avenidas sean una de las más transitadas por parte de los ciudadanos orizabeños y turistas que buscan llegar a diferentes puntos del centro de la ciudad. La problemática que presenta esta ruta seleccionada es conocer el origen de los posibles retrasos o causas que puedan afectar de manera directa o indirecta el barrido manual. Es importante mencionar que una de las posibles causas del origen de este tipo de problemas es la falta de planeación y la inadecuada logística para la asignación de tareas, la asignación de los trabajadores a la ruta además del tipo de recorrido que éstos realizan durante el recorrido para recolectar no solo la basura de la calle, sino también para recolectar la basura que los ciudadanos depositan en los botes o depósitos situados en los postes de alumbrado en diferentes puntos de la ciudad.

Mediante esta investigación se evaluará y analizará los datos obtenidos para realizar la construcción de un modelo de simulación en SIMIO y con una metodología establecida plantear diferentes escenarios, con el objetivo de optimizar la recolección de RSU mediante los datos obtenidos en el software.

1.1.6 Objetivos

1.1.6.1 Objetivo general

Realizar una evaluación de la eficiencia de recolección de basura del sistema de barrido manual de la ruta 8 de la Ciudad de Orizaba mediante un modelo de simulación en el software SIMIO,

analizando los indicadores que percatan una, la reducción de tiempos en la recolección para mejorar las técnicas empleadas por los barrenderos y dos proponer alternativas para una recolección efectiva de los contenedores ubicados en la ruta.

1.1.6.2 Objetivos específicos

1. Recolección y análisis de datos del sistema real.
2. Construir el modelo de simulación de barrido de la ruta 8.
3. Buscar y evaluar soluciones factibles a los retrasos de recolección de basura en el sistema de barrido planteado.
4. Mejorar la gestión de operaciones para el sistema de recolección de barrido manual de la ciudad con base en los resultados obtenidos mediante la simulación en SIMIO.

1.1.7 Justificación

Los RSU son aquellos que tienen origen en el hogar como consecuencia de la eliminación de los materiales utilizados en las tareas domésticas del día a día, el incremento de la producción de los RSU está directamente relacionado con el aumento de la población y el acelerado estilo de vida actual (Giusti, 2009). La tendencia de adquirir productos en línea mediante diferentes sitios web ha aumentado desde que la pandemia por el virus SARS-Cov-02 dio origen a un estilo de vida en el cual la tecnología juega un papel importante, representando un aumento de los RSU.

De acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, la clasificación es de acuerdo con sus características y orígenes, son divididas en tres grupos: Residuos Sólidos Urbanos (RSU), Residuos de Manejo especial y Residuos Peligrosos (SEMARNAT, 2020).

En México, se estima que, durante el año 2015, la generación de RSU alcanzó 53.1 millones de toneladas, lo cual representó un aumento del 61.2% con respecto al año 2003, lo que significa un promedio 1.2 kilogramos en promedio de basura generada por habitante. De acuerdo con SEDESOL en el año 2013 en el estado de Veracruz se generó un total de 2.3 millones de toneladas (SEMARNAT, 2020).

Esto se hace aún más presente en grandes ciudades, donde las autoridades correspondientes se enfrentan a mejorar el sistema de recolección y disposición de RSU, en este caso en la Ciudad de Orizaba, Veracruz se dispone de un sistema de recolección complejo que se encuentra

compuesto por 13 rutas de recolección y un sistema de barrido manual, que cuenta con dos turnos diferentes, a su vez es importante mencionar que la ciudad se encuentra dividida en 13 secciones, por lo cual se busca evaluar la ruta 8, perteneciente a las 13 rutas, ubicada en el centro histórico de la ciudad de Orizaba, Veracruz, con lo que se busca analizar los tiempos de recolección y los factores que influyen de manera directa e indirecta en su desempeño.

Con esta evaluación se buscará proponer un sistema más eficiente de las actividades dirigidas para el cumplimiento de labores de los trabajadores que cubren esta área, buscando disminuir los tiempos de recolección, para mejorar los recursos. Se utilizarán herramientas de modelación y simulación en este proyecto con las cuales se analizarán resultados en el software de simulación SIMIO.

Capítulo 2 Marco Teórico

2.1 Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

El consumo de bienes para el hogar, las compras en línea, la venta de alimentos, los desechos producidos en las escuelas desde nivel básico hasta el nivel superior, solo por mencionar unas cuantos, todo lo anterior producen Residuos Sólidos Urbanos, los cuales son producidos y desechados todos los días, estos productos o materiales que son desechados pueden encontrarse en estado sólido, semisólido, líquido o gaseoso.

Estos tienen un gran impacto en el medio ambiente, ya que sin el debido manejo pueden contaminar el aire, el suelo, el subsuelo y el agua, debido a las emisiones que producen, es por ello la importancia de darles un uso, manejo y disposición adecuada con la finalidad de reducir el impacto debido a los grandes volúmenes que son producidos.

De acuerdo con la SEMARNAT, en el año 2017 en México se estima que la generación de RSU alcanzó 44.6 millones de toneladas, esto implica que un habitante en promedio produce un 0.98 kilogramos diariamente en el mismo año, esto está relacionado de manera directa con el aumento de la población (crecimiento urbano), el desarrollo industrial acelerado, la producción de nuevas tecnologías y los cambios bruscos en los patrones de consumo en la población, esto último debido a las modas o tendencias que surgen en aplicaciones de ocio que incitan a la compra de productos extranjeros. De igual modo existe una relación directa entre el crecimiento de la generación de RSU y el PIB nacional, esta relación también se encuentra en las entidades federativas, aquellas que contribuyen con mayor medida al PIB tienden a generar una mayor cantidad de RSU.

Otro factor por considerar es el proceso de urbanización que se acompaña por el incremento adquisitivo de la población, por el lado de las comunidades rurales, los pobladores consumen productos menos manufacturados lo que implica una menor producción de residuos como etiquetas o envases (SEMARNAT, 2020).

Tomando como punto de partida el tamaño de población y las características de las comunidades las entidades que tiene una mayor producción de RSU en el año del 2017 son mencionados a continuación (DGEIA, 2017):

- Estado de México 6.98 millones de toneladas; 15.7% a nivel nacional.
 - CDMX 3.98 millones de toneladas, 9% nivel nacional.
-

- Jalisco 3.2 millones de toneladas, 7.1% nivel nacional.
- Veracruz 2.4 millones de toneladas, 5.3% nivel nacional.

Por último, la composición de los residuos ya sea orgánica o inorgánica se asocia a la condición económica, en los estados con menor ingreso domina la composición orgánica mientras que los que presentan un mayor ingreso domina la materia inorgánica.

2.1.1 Sistemas de Aseo Urbano

Un indicador positivo sobre un buen sistema de aseo urbano es cuando éste cumple la función de ser el nexo que lleva a cabo la recolección a una adecuada disposición final. En dado caso la recolección es el eje central de todos los demás servicios, es aquí donde entra en juego una organización racional del sistema de aseo de la localidad, especialmente cuando ésta cuenta con una población densa. El rendimiento y la eficacia de dicho sistema depende de una correcta armonía de una serie de factores que se entrelazan entre sí. En el caso de recolección manual de residuos y aseo urbano, se dispone de los siguientes factores: número de personal disponible, número de viajes por recolección, vehículos disponibles y número de viajes para la disposición final.

Para diseñar un sistema de recolección antes es necesario establecer si se encuentra total o parcialmente implementado. En el debido caso de que éste no se encuentre completamente implementado se deberá realizar un diagnóstico de las operaciones realizadas, esto implica la revisión del circuito o ruta implementada, el volumen de los residuos recolectados y los tiempos requeridos y/o implementados (Rondón, 2016).

2.1.2 Residuos Sólidos Domiciliarios no peligrosos depositados en vía pública

Desde una perspectiva general la recolección de residuos depositados en la vía pública, como se ha mencionado en párrafos anteriores, requiere de una serie de factores para un buen desempeño del sistema de recolección manual, los cuáles son mencionados a continuación:

- **Organización y funcionamiento:** En su mayor parte comprende los indicadores relacionados con el sistema de recolección, en forma particular comprende el retiro de los residuos generados en la vía pública y el manejo de las cargas generadas en el proceso. Utiliza la logística para dar cobertura a todas las fuentes generadoras y posteriormente llevar los residuos a su disposición final.

- **Ruteo:** Conformado por el establecimiento de horarios, las rutas y la frecuencia de barrido, el manejo de personal contemplando de igual modo la cantidad de personal y el equipo disponibles para desarrollar la tarea asignada.
- **Personal de cuadrilla:** Recorren la ruta a través de diversas calles, el personal recolecta la basura acumulada en los contenedores y vía pública.

2.1.3 Almacenamiento de la recolección de Residuos Sólidos depositados en vía pública y sus contenedores

La clasificación y separación de los RSU es importante para la disposición final, usualmente éstos son separados en orgánicos e inorgánicos, los primeros conformados por productos de origen vegetal y/o animal (restos de comida), por el contrario, el plástico, el cartón, vidrio, desechos sanitarios o productos de higiene personal, bolsas, componentes electrónicos entre otros corresponden al grupo de basura inorgánica.

Entre estos dos grupos se pueden encontrar diferentes materiales que pueden ser aptos para ser seleccionados y reciclados con el objetivo de disminuir su impacto ambiental y alargar su tiempo de vida útil, por ejemplo, los restos de comida pueden ser usados para crear composta o fertilizantes, el cartón y el papel que estén en buenas condiciones es seleccionado y procesado para crear un nuevo producto con papel de recicle, aunque el de mayor interés para reciclar son los plásticos, ya que se estima que se degradan de 100 a 1000 años impactando de manera negativa a el medio ambiente contaminando los mares, ríos e incluso animales (Jiménez Loya, 2012).

Es por estos motivos la relevancia de un correcto almacenamiento para su disposición final, denominados contenedores. Las nuevas tecnologías permiten realizar una recogida selectiva, de este modo, facilita al usuario la clasificación de los residuos; punto importante es el tipo de recolección: manual o automatizada. La recolección manual permite ser selectivo en contenedores de baja capacidad, son aquellos depositados en parques, vías públicas, escuelas e incluso hospitales. Los contenedores de recogida automatizada son aquellos que cuentan con los elementos suficientes para ser vaciados por camiones recolectores y cuentan con la gran ventaja de tener una capacidad muy por encima de los contenedores de recolección manual.

Debido a esto el tipo, color y tamaño son tomados en cuenta conforme a la necesidad, la localización del contenedor y el tipo de camión recolector, desde contenedores de tipo industrial

hasta contenedores que son colocados en instituciones educativas, ambos son compuestos de materiales y capacidades diferentes. Un contenedor de tipo industrial metálico tiene una capacidad de 1100 litros mientras que los botes colocados en una institución educativa pueden variar desde los 80 a 120 litros contando con la ventaja de poder separar los desechos (Figura 2.1).



Figura 2.1 Contenedores de plástico (izquierda) y contenedor industrial (derecha)

Otro tipo de contenedores que existen son los contenedores soterrados cuya característica es el estar enterrados de tal modo que solo quede una parte del contenedor expuesta en el asfalto dando una imagen más pulcra y limpia a la vía pública además de la reducción de malos olores, este tipo en particular entra dentro de la categoría de recogido manual de RSU (Rondón, 2016).

2.1.4 Disposición final de la recolección de residuos

La generación de residuos genera una gran cantidad de problemas, siendo el principal y más preocupante la contaminación hacia el medio ambiente, poniendo en riesgo mantos acuíferos, contaminación del suelo a raíz de los lixiviados y contaminación del aire por los gases que se pueden generar al ser almacenados en grandes cantidades. Los RSU se pueden generar tanto en el sector doméstico, industrial, comercios o instituciones y en los últimos años se ha observado un incremento potencial relacionado con el aumento acelerado de la población y urbanización, en específico son sustancias generadas por actividades rutinarias del ser humano (Carvajal Romero, 2022).

Un método para la disposición de residuos que es una alternativa viable desde un punto de vista económico y tecnológico para la mayoría de los países, es la opción de un “relleno sanitario” el cual es definido como “un método para la disposición de basuras en el suelo sin detrimento del medio ambiente con la finalidad de minimizar las molestias, peligros para la salud y seguridad

de la población, para confinar los residuos generados en un área lo más pequeña posible, a la vez que el volumen se vea reducido y cubriendo la basura con una capa de tierra diariamente”. Un método diferente a un relleno sanitario es un vertedero, el cual involucra la disposición indiscriminada de los RSU con escasas medidas de control en sus operaciones, sin control en las emanaciones de gases ni de las infiltraciones conocidas como lixiviados (Cubillo Betancourt, 2005).

2.1.5 Plantas recicladoras

De acuerdo con la secretaria de Desarrollo Social (Sedesol), en un lapso estimado de cuatro décadas la generación de RS municipales a incrementado nueve veces y su composición tuvo un cambio drástico aumentando la cantidad de elementos cuya degradación es lenta y tediosa, además de requerir procesos complementarios para poder facilitar el proceso.

En México el reciclaje supondría un panorama favorecedor para un gran negocio además de ser considerado una necesidad ambiental, sin embargo, el reciclaje no es un negocio factible debido a la falta de interés, una pepena subterránea y un nulo conocimiento en la materia. Solo las Pequeñas y Medianas empresas conocidas como PYMES se dedican al reciclaje de diferentes polímeros que provienen de los RSU (Aviles F., Melendez G, & Rivas R., 2012).

Para esto también es necesario una Gestión Integral de Residuos Sólidos, que es un conjunto de actividades que conforman un proceso de acción para el manejo de los RSU y permitiendo la integración de la comunidad en temática ambiental. Con base en esto se tienen diferentes tipos de plantas para los RSU: de recuperación y tratamiento.

A continuación, en la Tabla 2.1 se muestran los puntos clave de ambos tipos de plantas recicladoras (Scudelati, 2020):

Tabla 2.1 Diferencia de plantas recicladoras

	De recuperación	De recuperación y tratamiento
Objetivo	• Obtener la separación de componentes reciclables y de la materia orgánica. • Gestionar la comercialización de los componentes reciclables.	• Obtener la separación de componentes reciclables y de la materia orgánica. • Reciclar la materia orgánica como lombricomposta.
Ventajas	• Fácil operación. • Rápida implementación. • Recuperación de papel, vidrio, aluminio y plástico para su comercialización.	• Disminución del volumen de la materia orgánica en el relleno sanitario. • Creación de conciencia ambiental en la población ya que se promueve la separación de RSU.
Desventajas	• Solo se enfocan en Residuos Inorgánicos que pueden ser reciclados, por lo tanto: • Los costos elevados por el uso de rellenos sanitarios por la acumulación de materia orgánica. • No se promueve la participación de la comunidad en la separación de RSU.	• Lenta implementación. • Necesidad de inversión logística de recolección domiciliaria (camiones recolectores).

2.1.6 Métodos para estimar las cantidades de residuos

La obtención de datos que se pueden obtener mediante la estimación de cantidades de RSU pueden ser utilizados para desarrollar e implementar programas efectivos de gestión, por este motivo, se debe de poner especial atención para decidir exactamente lo que es preciso conocer. Una sugerencia para el uso de las medidas y unidades utilizadas para cuantificar las cantidades de RSU únicamente para los residuos domésticos y comerciales es: kg/hab/día. No obstante, para los residuos industriales se usarán unidades diferentes con base a alguna medida representativa de producción, como los kilogramos por automóvil para una planta de montaje de automóviles o kilogramos por paquete para una planta de empaquetamiento. Para la producción agrícola, se puede expresar en términos de alguna medida representativa de producción, tales como Kg de estiércol/peso de residuo/día.

Para la estimación de las cantidades de residuos existen dos métodos de estimación: directos e indirectos. Los cuales son descritos a continuación:

a) Métodos de estimación indirectos.

Permiten determinar la producción per cápita de residuos sólidos y su densidad, con base en datos globales y sin discriminaciones cualitativas.

Producción per cápita: Establece proporción entre la cantidad total de residuos que se recoge y la población total atendida.

$$PPC = \frac{\text{Cantidad total recolectada} \left(\frac{kg}{\text{día}} \right)}{\text{Población total atendida} \left(\frac{\text{habitantes}}{\text{día}} \right)}$$

Ecuación 2.1

Es probable que las producciones de este tipo no coincidan, en cuyo caso se deberá analizar la causa de dicha diferencia y determinar si ésta es aceptable a nivel ambiental.

Densidad: Estima la relación entre el peso y el volumen que ocupan los residuos en un determinado contenedor.

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Peso de los residuos sólidos (kg)}}{\text{Volumen que ocupan los residuos sólidos en el recipiente (m}^3\text{)}}$$

Ecuación 2.2

b) Métodos de estimación directos.

Permiten determinar características más específicas, por ejemplo, la composición. Para lo que es requerido seguir procedimientos más estrictos de recolección de datos que ayuden a distinguir características particulares. Los pasos son descritos a continuación:

- Recopilar información sobre el número de habitantes, obtener un mapa de situación de la zona de estudio, ubicar las fuentes no domésticas de producción de residuos sólidos, zonas e itinerarios de recolección y centros de disposición final.
- Seleccionar muestras representativas de 100 kg, además, se debe seleccionar muestras representativas por cada estación del año.
- Para el cálculo de la densidad, es necesario colocar los residuos en recipientes que permitan su manejo y faciliten su análisis, se deben pesar los residuos de origen y medir el volumen que ocupan y establecer la relación peso/volumen.
- Peso total y componentes: Se mide durante un periodo de siete días consecutivos, distinguiendo los componentes. La composición física por componente resulta de dividir el peso total promedio de los residuos por el peso del respectivo componente y suele expresarse en porcentaje (Rondón, 2016).

2.2 Regulación en México para la disposición de desechos urbanos

Existen diferentes tipos de normativas, en este apartado hablaremos de las normas orientadas a la regulación ambiental para el manejo de los residuos. Existen dos tipos de normas en México, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y las Normas Mexicanas (NMX), siendo las primeras las que tienen un mayor peso.

Las NOM son emitidas por diferentes entidades, como la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la Secretaría de Transporte (SCT) o la Secretaría del Trabajo y Protección Social (STPS), solo por mencionar algunas. A su vez cada NOM está enfocada a diferentes temas, por ejemplo, la NOM-017-STPS-2008, es específicamente para los equipos de protección personal (EPP).

Los residuos son regulados conforme a su clasificación:

- Residuos Sólidos Urbanos (RSU)
- Residuos Peligrosos (RP)
- Residuos de Manejo Especial (RME)

La importancia de establecer una regulación sobre el tipo de residuos se debe al impacto ambiental que éste puede tener, debido a que los residuos generados en un laboratorio clínico u hospital no pueden ser manejados de la misma manera que los Residuos Sólidos Urbanos, ya que su disposición y tratamiento es especial, a la cual le corresponde la NOM-038-SEMARNAT-2003.

En el país no solo existen las NOM para llevar a cabo la regulación de los RSU, también se cuentan con las siguientes regulaciones:

- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF, 2003) o la Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales (SEMARNAT, 2011).
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.
- Reglamento Interior de la secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Código Fiscal del Distrito Federal art 2 f-II.

Otra regulación vigente en México es la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos que entró en vigor en el año 2003, pero su última reforma fue publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) en el años 2021, está conformada por 125 artículos y 13 transitorios, tiene por objetivo principal el garantizar el derecho a toda persona al medio

ambiente adecuado y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, valoración y gestión integral de los residuos (Aviles F., Melendez G, & Rivas R., 2012).

2.3 Sistema de recolección de residuos en la Ciudad de Orizaba, Veracruz

Tener un adecuado personal para un sistema de recolección de RSU sin duda alguna es uno de los puntos más importantes, en el caso de la Ciudad de Orizaba, Veracruz se cuenta con un sistema complejo de recolección, dividiendo la ciudad en un total de 13 rutas de recolección. Existen dos tipos diferentes de recolección, el primero se hace mediante camiones recolectores de basura, los cuales tienen un horario de recolección nocturno, es importante mencionar que se cuenta con días específicos establecido para recoger los diferentes tipos de residuos que se clasifican en: Orgánicos, Inorgánicos y Sanitarios. Lo cual permite en gran medida llevar a cabo una disposición final adecuada.

El segundo tipo de recolección es el barrido manual, el cual está conformado por cuadrillas diferentes denominadas hormigas, barridos y abejas. Las abejas le son asignadas tareas específicas en ciertos puntos de la ciudad, las abejas están conformadas por un grupo de adultos mayores encargados de trabajos de jardinería y limpieza, y por último está la cuadrilla de barridos, a las cuales le son asignadas diferentes rutas, a los cuales se les asignan una ruta diferente y su función principal es como su nombre lo indica, el barrido. Además de esta tarea, también deben recolectar la basura que es depositada en los canastos de basura que se ubican dentro de su ruta asignada.

2.4 Pruebas de Bondad de Ajuste

Las pruebas de bondad de ajuste son pruebas estadísticas utilizadas para determinar si el conjunto de datos analizados se ajusta a una distribución de probabilidad teórica conocida. Están basadas en la concordancia que se tiene entre las frecuencias de ocurrencia de las observaciones de una muestra y las frecuencias que se obtienen a partir de una distribución hipotética. Entre las pruebas de bondad de ajuste más conocidas se encuentran: La prueba Chi-Cuadrada, la prueba de Kolmogorov-Smirnov y la prueba de Anderson-Darling (Walpole, Myers, & Myers, 2012).

2.4.1 La prueba Chi-Cuadrada

La hipótesis más sencilla respecto a las probabilidades de celda especifica un valor numérico para cada celda, se calculan fácilmente usando las probabilidades hipotéticas, $E_i = np_i$ y se usan para calcular el valor observado de la estadística de prueba X^2 .

La estadística ji cuadrada de Pearson utiliza las diferencias $(O_i - E_i)$ al elevar el cuadrado primeramente estas diferencias para eliminar las contribuciones negativas y luego forma un promedio ponderado de las diferencias cuadradas:

$$X^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

$O_i = \text{Frecuencia de los Valores observados}$

$E_i = \text{Frecuencia de los Valores Esperados}$

$K = \text{número de categorías o clases}$

Si las cuentas de la celda esperadas hipotéticas son correctas, las diferencias $(O_i - E_i)$ son pequeñas y X^2 es cercana a 0. Pero, si las probabilidades hipotéticas son incorrectas, grandes diferencias $(O_i - E_i)$ resultan en un valor grande de X^2 , por lo que debe usarse una prueba estadística de cola derecha y buscar un valor inusualmente grande del estadístico de prueba (Mendenhall, Beaver, & Beaver, 2010).

2.4.2 La prueba de Kolmogorov – Smirnov

Se presenta como una alternativa a la prueba de chi-cuadrada, siendo únicamente apropiada para distribuciones continuas, por lo consiguiente también se considera otra medida de la bondad de ajuste de una distribución teórica. Cuenta con varias ventajas sobre la prueba de la chi-cuadrada, debido a su facilidad puesto que no se requiere agrupar los datos.

Denótese por $X_{(1)}, X_{(2)} \dots, X_{(n)}$ a las observaciones de una muestra aleatoria de tamaño n y definir la función de distribución acumulada muestral $F_n(x)$ como la proporción del número de valores en la muestra que es menor o igual a x :

$$F_n(x) = \frac{(\text{Número de observaciones de la muestra} \leq x)}{n} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Siendo $F(x)$ la distribución teórica propuesta bajo la hipótesis nula. La prueba Kolmogorov – Smirnov (K-S) mide la distancia que separa una de la otra buscando que sea lo más pequeña posible para tener un buen ajuste y utiliza el siguiente estadístico de prueba (Moras, 2021):

$$D^+ = \max \left\{ \frac{i}{n} - F^*(Xi) \right\}$$

Ecuación 2.5

$$D^- = \max \left\{ F^*(Xi) - \frac{i-1}{n} \right\}$$

Ecuación 2.6

$$D = \max\{D^+, D^-\}$$

Ecuación 2.7

Donde:

$F^*(Xi)$: Es la función de distribución teórica hipotetizada.

2.4.3 La prueba de Anderson-Darling

El estadístico mide el área entre la línea ajustada que es basada en la distribución normal y la función de una distribución empírica. Puede ser utilizado para comprobar si los datos satisfacen el supuesto de normalidad para una prueba t, también se le puede definir como un estadístico no paramétrico utilizado para comprobar si un conjunto de datos que provienen de una población sigue una distribución de probabilidad específica, por lo general, una distribución normal.

Es una distancia elevada al cuadrado que tiene mayor ponderación en las colas de la distribución, por lo tanto, un valor pequeño de Anderson- Darling (A-D) indica que la distribución se ajusta mejor a los datos. El estadístico está dado por:

$$A^2 = -N - S$$

Ecuación 2.8

Donde:

N: número de casos

S: desviación estándar

Expresado también:

$$A_n^2 = - \sum_{i=1}^N \frac{(2i-1)}{n} [\ln F(Yi) + \ln(1 - F(Y_{n+1-i}))]$$

Ecuación 2.9

Donde:

n : número de datos.

$F(Y_i)$: Función de la distribución empírica.

La prueba se realiza en dos pasos, en el primero se crean dos distribuciones acumulativas (una distribución acumulativa de los datos crudos y una distribución acumulativa), segundo, se comparan ambas distribuciones para determinar la mayor diferencia numérica absoluta entre ambas. Si la diferencia es amplia, la hipótesis nula se rechaza por lo que los datos no siguen una distribución normal (Flores Tapia & Flores Cevallos, 2021).

2.5 Distribuciones de probabilidad

Existen diferentes tipos de distribuciones de probabilidad, las técnicas para su cálculo o la asignación de probabilidades aplicable es variable, sin embargo, brinda toda la gama de valores que pueden ocurrir con base en un experimento, y resulta similar a una distribución de frecuencias. Existen dos tipos de distribuciones dependiendo si son definidas por variables continuas o discretas (Camargo M., García C., & Flores A., 2020).

2.5.1 Distribuciones Continuas

Describe las probabilidades de los posibles valores de una variable aleatoria continua, definida como un conjunto de valores posibles que es infinito y no se puede contar. Las probabilidades de las variables aleatorias continuas (x) son definidas como el área por debajo de la curva de su PDF, por lo tanto, dichos valores pueden tener una probabilidad diferente de cero (Minitab, 2022).

- **Distribución normal:** La gráfica de esta distribución es denominada “curva normal”, la característica principal es su forma de campana (Figura 2.2), la cual describe de manera aproximada muchos fenómenos que ocurren en la naturaleza, la industria y la investigación. La ecuación matemática para la distribución de probabilidad de la variable normal depende de los parámetros μ y σ , su media y su desviación estándar (Walpole, Myers, & Myers, 2012).

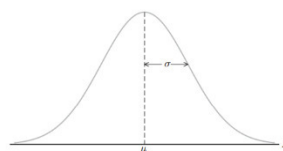


Figura 2.2 La curva normal

- **Distribución gamma y exponencial:** Desempeñan un papel importante en la teoría de colas y en problemas de confiabilidad. Los tiempos entre llegadas en instalaciones de servicio y los tiempos de operación antes de que partes de componentes empiecen a fallar. La relación entre ambas permite que la gamma se utilice en problemas similares (Walpole, Myers, & Myers, 2012).
- **Distribución Chi-cuadrada:** La distribución cuenta con un solo parámetro, v , denominado grados de libertad. La variable aleatoria continua X tiene una distribución chi cuadrada, con v grados de libertad, si su función de densidad es dada por:

$$f(x; v) = \begin{cases} \frac{1}{2^{\frac{v}{2}} \Gamma(\frac{v}{2})} x^{\frac{v}{2}-1} e^{-x/2}, & x > 0 \\ 0, & \text{en otro caso,} \end{cases} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Donde v es un entero positivo.

Los temas en los que se trata con distribuciones de muestreo, análisis de varianza y estadística no paramétrica implican el uso extenso de la distribución chi cuadrada (Walpole, Myers, & Myers, 2012).

- **Distribución logarítmica normal:** Es utilizada en una amplia variedad de aplicaciones, principalmente en casos donde una transformación logarítmica natural tiene como resultado una distribución normal (Walpole, Myers, & Myers, 2012).

La variable aleatoria continua X tiene una distribución logarítmica normal si la variable aleatoria $Y=\ln(X)$ tiene una distribución normal con media μ y desviación estándar σ .

La función de densidad de X que resulta es:

$$f(x; \mu, \sigma) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}[\ln(x)-\mu]^2}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0, \end{cases} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Las gráficas de las distribuciones logarítmicas normales se muestran a continuación:

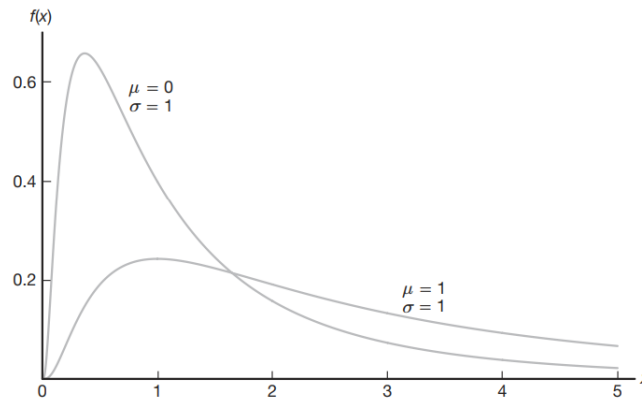


Figura 2.3 Distribuciones logarítmicas normales.

- **Distribución de Weibull:** Los ingenieros usando las nuevas tecnologías son capaces de crear sistemas complicados cuya operación y seguridad dependen de la confiabilidad de los diversos componentes que conforman los sistemas, una desventaja de esto es que componentes idénticos sujetos a condiciones ambientales fallaran en momentos diferentes e impredecibles, la distribución gamma y exponencial son usadas para resolver este tipo de problemáticas, sin embargo, también se tiene como alternativa la distribución de Weibull para tratar con tales problemas.

La variable aleatoria continua X tiene una distribución de Weibull, con parámetros α y β , si su función de densidad es dada por:

$$f(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} \alpha\beta x^{\beta-1}e^{-\alpha x^{\beta}}, & x > 0 \\ 0, & \text{en otro caso,} \end{cases} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Donde $\alpha > 0$ y $\beta > 0$

En la Figura 2.4 Se muestran las gráficas de la distribución de Weibull para $\alpha=1$ y diversos valores del parámetro β . Si permitimos que $\beta=1$, la distribución de Weibull se reduce a la distribución exponencial. Para los valores de $\beta > 1$ las curvas se adoptan ligeramente la forma de campana y se asemejan a las curvas normales (Walpole, Myers, & Myers, 2012).

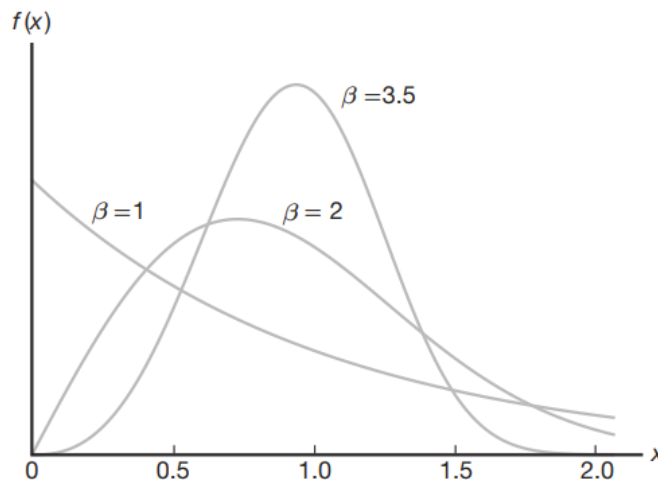


Figura 2.4 Distribuciones de Weibull ($\alpha=1$)

2.5.2 Distribuciones Discretas

Describe la probabilidad de ocurrencia de cada valor de una variable aleatoria discreta que tiene valores contables, tales como una lista de enteros no negativos. Con una distribución de probabilidad discreta, cada calor posible de la variable aleatoria puede estar asociado con una probabilidad distinta a cero, por lo tanto, suele representarse en forma tabular (Minitab, 2022).

- **Distribución binomial:** Con frecuencia un experimento consta de pruebas repetidas, cada una con dos resultados posibles que se denominan éxito o fracaso. La distribución binomial se relaciona con un experimento aleatorio conocido como Experimento de Bernoulli el cual ésta constituido por un número finito, n , de pruebas idénticas y la probabilidad de éxito de cada prueba aislada es constante para todas las pruebas y recibe la denominación de “ p ”.

La probabilidad de “ x ” éxitos en “ n ” intentos está dada por:

$$P(x) = {}_n C_x p^x q^{n-x}$$

Ecuación 2.13

El experimento binomial se convierte en un experimento multinomial si cada prueba tiene más de dos resultados posibles (Camargo M., García C., & Flores A., 2020).

- **Distribución hipergeométrica:** Contando con una similitud con la distribución binomial, la manera más sencilla de poder distinguir entre ambas consiste en observar la forma en que se realiza el muestro debido a que la distribución hipergeométrica no requiere independencia y se basa en el muestro que se realiza sin reemplazo.

La distribución de probabilidad de la variable aleatoria X , el número de éxitos en una muestra aleatoria de tamaño n que se selecciona de N artículos, es los que k se denomina éxito y $N-k$ fracaso es dada por:

$$h(x; N, n, K) = \frac{\binom{K}{x} \binom{N-K}{n-x}}{\binom{N}{n}}, \quad \max\{0, n - (N - K)\} \leq x \leq \min\{n, K\}$$

Ecuación 2.14

El rango de x puede determinarse mediante los tres coeficientes binomiales en la definición, donde x y $n - x$ no son más que K y $N - K$; respectivamente a su vez que ambos no pueden ser menores a 0 (Walpole, Myers, & Myers, 2012).

- **Distribución de Poisson:** Utilizada con muchos fines, la distribución de Poisson se puede emplear para determinar un número designado de éxitos cuando los eventos ocurren en un espectro continuo de tiempo y espacio, semejante al proceso de Bernoulli.

La fórmula para una distribución de Poisson es dada por:

$$P(x/\lambda) = \frac{\lambda^x * e^{-\lambda}}{x!}$$

Ecuación 2.15

Algunas de las propiedades del proceso de Poisson es que el número de resultados que ocurren en un intervalo o región específica es independiente del número que ocurre en cualquier otro intervalo, la probabilidad de que ocurra un solo resultado durante el intervalo de tiempo muy corto o en una región pequeña es proporcional a la longitud del intervalo o al tamaño de la región y no depende del número de resultados que ocurren fuera de este intervalo (Walpole, Myers, & Myers, 2012).

2.6 Simulación

De acuerdo con (Law M., 2013), simulación es el proceso de desarrollar un modelo computarizado de un sistema para conducir modelos dentro de éste, con el propósito de lograr

entender el comportamiento del sistema para evaluar las diferentes alternativas con las cuales se logrará mejorar el sistema.

Las aplicaciones para la simulación pueden llevarse a cabo en una diversa cantidad de áreas. Algunos de los tipos de problemas en las que la simulación puede ser usada como un arma poderosa son mencionados a continuación:

- Analizar cadenas de suministro.
- Evaluar los diseños de organizaciones como call centers, restaurantes de comida rápida, hospitales, solo por mencionar algunos.
- Realizar la reingeniería de los procesos.
- Diseñar y analizar sistemas de manufactura.

Se puede decir que la simulación es una de las técnicas más usadas en investigación de operaciones o la gestión de técnicas.

2.6.1 Clasificación de los modelos de simulación

Los modelos de simulación son clasificados de diferentes maneras, de las cuales se debe tomar en cuenta los objetivos y criterios, a continuación, se mencionan algunas de sus clasificaciones (Law M., 2013):

- **Modelo Discreto:** Las variables que se tienen dentro del modelo cambian en determinados puntos y pueden ser contados. Este tipo de simulación generalmente tiene como objetivo principal evaluar la secuencia cronológica de acontecimiento dentro del sistema.
- **Modelo Continuo:** En este tipo de modelo las variables cambian de manera constante con respecto al tiempo.
- **Modelo Dinámico:** Su característica radica en que las variables dentro del modelo cambian conforme al tiempo.
- **Modelo Probabilístico:** Contiene variables aleatorias que son definidas por una función de probabilidad.
- **Modelo Determinístico:** Es aquel que contiene variables matemáticas que se conocen con certeza.

2.6.2 Ventajas y desventajas de la simulación

La simulación se ha vuelto muy popular lo cual deriva al incremento de su uso para evaluar casos de estudio complejos. Otro factor importante que considerar es la evolución de los software y herramientas más aplicables que han surgido respecto al avance tecnológico. Aunado a esto la simulación puede presentar ventajas y desventajas en su uso (Law M., 2013):

Ventajas:

- La mayoría de los sistemas reales no pueden ser descritos por modelos matemáticos, por lo cual la simulación es el único medio de análisis para estos casos.
- La simulación nos brinda la capacidad de plantear una gran cantidad de escenarios entre los cuales podemos elegir el que mejor resultados nos brinde.
- Permite el estudio de las interacciones internas dentro de un sistema complejo.
- Se puede cambiar la información, organización o medios ambientales dentro del modelo con facilidad.

Desventajas:

- Se necesita una gran cantidad de tiempo para realizar el modelo de simulación dentro del software elegido.
- Se requiere de un equipo computacional y recursos humanos costosos para poder llevarla a cabo.
- Es posible que la alta administración de una organización no entienda las técnicas empleadas y esto les dificulte el entendimiento de los resultados.

2.6.3 Verificación y Validación del Modelo

Una representación adecuada del sistema que se está analizando es fundamental, por tal motivo es necesario validar y verificar el modelo, si éste no es válido, las conclusiones derivadas del modelo no serán de utilidad.

La verificación analiza la interpretación del modelo conceptual al programa de computadora sea adecuado y la validación consiste en corroborar que el programa arroje datos estadísticamente igual a los del sistema real, para este paso se utiliza la prueba *t-apareada* (Law M., 2013).

2.6.3.1 Procedimiento estadístico para comparar datos reales con datos simulados

Suponga que X_n son observaciones de un sistema del mundo real y que los datos Y_n son obtenidos del modelo de simulación, es necesario comparar los dos conjuntos de datos para

determinar si el modelo es una representación válida del sistema real y para realizar dicha comparación se utiliza la prueba de la t-apareada.

Suponga que se recolectan m datos dependientes del sistema y n conjuntos de datos del modelo. Sea X_j el promedio de las observaciones en el j -ésimo conjunto del sistema, y Y_j el promedio de las observaciones en el j -ésimo conjunto de datos del modelo.

Las X_j son variables aleatorias IID con media $\mu_x = E(X_j)$ y las Y_j son variables aleatorias IID con media $\mu_y = E(Y_j)$, por lo que se tratará de comparar el modelo con el sistema construyendo un intervalo de confianza para:

$$Z = \mu_x - \mu_y \quad \text{Ecuación 2.16}$$

Para esto se requiere que $m=n$

Las fórmulas utilizadas para la prueba de la t-apareada son mostradas a continuación:

$$Z_i = X_i - Y_i \quad \text{Ecuación 2.17}$$

$$\bar{Z}_{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n} \quad \text{Ecuación 2.18}$$

$$\hat{Var}[\bar{Z}_{(n)}] = \frac{\sum_{i=1}^n [Z_i - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n(n-1)} \quad \text{Ecuación 2.19}$$

El intervalo de confianza es $(100-(1-\alpha))$

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\hat{Var}(\bar{Z}_{(n)})} \quad \text{Ecuación 2.20}$$

Sea $l_{(\alpha)}$ y $u_{(\alpha)}$ el límite de confianza inferior y superior respectivamente. Si $0 \notin [l_{(\alpha)}, u_{(\alpha)}]$ entonces la diferencia observada entre μ_x y μ_y :

$$\bar{X}_{(n)} - \bar{Y}_{(n)} \quad \text{Ecuación 2.21}$$

Se dice que es estadísticamente significantes al nivel α . Esto es equivalente a rechazar la hipótesis nula:

$$H_0: \mu_x = \mu_y \quad \text{Ecuación 2.22}$$

En favor de la alternativa:

$$H_1: \mu_x \neq \mu_y \quad \text{Ecuación 2.23}$$

Si $0 \in [I_{(\alpha)}, u_{(\alpha)}]$, cualquier diferencia observada entre μ_x y μ_y no es estadísticamente significativa al nivel “ α ” y puede ser explicada por fluctuaciones aleatorias aceptando así que el modelo realizado es válido (Moras, 2021).

2.6.3.2 Procedimiento para la determinación de corridas óptimas del modelo

Un modelo de simulación no es solo para averiguar que tan bien opera un sistema en particular, sino para aumentar la visión de éste para poder implementar una mejora. El procedimiento se describe a continuación:

Para determinar el número de replicaciones requeridas para estimar la media $\mu = E(x)$ con un error específico, se tiene que si el estimador $\bar{X}$ es tal que $|\bar{X} - \mu| = \beta$, se dice que $\bar{X}$ tiene un error absoluto β . Esto si se realizan replicaciones de una simulación hasta que la mitad del intervalo de confianza dado por:

$$\bar{X}_n \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{s^2(n)}{n}}$$

Ecuación 2.24

Es menor o igual que β (donde $\beta > 0$, y β es el error absoluto el cual es elegido junto con el experto del sistema) entonces:

$$\begin{aligned} 1 - \alpha &\approx p(\bar{X} - mitad \leq \mu \leq \bar{X} + mitad) \\ &= p(|\bar{X} - \mu| \leq mitad) \leq p(\bar{X} - \mu \leq \beta) \end{aligned}$$

Por lo que $\bar{X}$ tiene un error absoluto de a lo más β con una probabilidad de aproximadamente $1 - \alpha$. En pocas palabras, si se construyen 100 intervalos de confianza independientes al 90%, es de esperarse que $\bar{X}$ tenga un error absoluto de a lo más β en 90 de los casos; alrededor de 10 intervalos el error absoluto sería mayor a β .

Suponga que se ha construido un intervalo de confianza para μ basado en un número fijo de replicaciones n . Si se asume que el estimador de la varianza poblacional no cambia apreciablemente a medida que el número de replicaciones se incremente, una expresión aproximada para el número total de replicaciones $n * (\beta)$ requerido para obtener un error absoluto de β es dado por:

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

Ecuación 2.25

Es posible determinar $n * (\beta)$ incrementando i en uno hasta que un valor de i se obtiene para el cual:

$$t_{i-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{s^2(n)}{i}} \leq \beta$$

Ecuación 2.26

2.7 SIMIO

SIMIO por sus siglas en inglés Simulation Modelling Based on Intelligent Objects es un software de simulación basado en objetos inteligentes, que permite crear modelos a través de su biblioteca, la cual contiene una gran variedad de entidades con las cuales se pueden construir grandes modelos de simulación (Law M., 2013).

Debido a su concepción moderna, es posible que el programa pueda aprenderse sin dificultad además de que no se requiere tener conocimiento de lenguajes de programación de alto nivel. Además de que los objetos y elementos en SIMIO son variados, el software permite importar objetos desde una biblioteca en línea, la única condición que éste debe cumplir es que el objeto a importar cuente con el mismo formato con el cual SIMIO trabaja.

La biblioteca estándar contiene alrededor de 15 objetos definidos que pueden ser modificados y extendidos usando procesos de lógica, el modelo de lógica y animación son construidos en un simple paso, de manera habitual son representados en dos dimensiones para poder visualizar el modelo de manera rápida, pero una de las características que más resaltan es que se puede pasar a la perspectiva 3D desde un simple paso. Dicho esto, SIMIO es uno de los Software más completos para llevar a cabo la simulación, otro software que se pueden mencionar son ARENA o ExtendSim (Law M., 2013).

2.7.1 Elementos Básicos de SIMIO

Los softwares cuyo propósito es realizar una simulación cuentan con una biblioteca de objetos o elementos básicos con los cuales se pueden realizar una cantidad finita o infinita de modelos, dependiendo de la limitante en la licencia adquirida de manera legal. Por ejemplo, algunos softwares cuentan con una versión estudiante cuyo costo es menor, pero a su vez cuenta con una cantidad de elementos finitos dentro de la versión del programa adquirida y no pueden ser usados con fines de lucro.

SIMIO cuenta con una versión estudiantil que permite utilizar todos sus elementos básicos que contiene su biblioteca los cuales son descritos a continuación:

Tabla 2.2 Biblioteca SIMIO

Nombre	Símbolo	Descripción
Source		Un objeto “Source” puede ser usado para generar entidades de cualquier tipo.
Sink		La utilidad del objeto es destruir entidades que han terminado su proceso/uso dentro del modelo
Server		Las operaciones realizadas por este objeto pueden ser modeladas como un tiempo de un proceso o como una secuencia de tareas. Recursos secundarios o materiales requeridos pueden ser especificados de manera opcional
Combiner		Usado para agrupar múltiples entidades para crear un grupo principal.
Separator		Utilizado para separar miembros de un grupo de entidades, crear copias de una entidad o crear nuevas entidades una vez que el proceso se detiene y deja de usar copias de dicha entidad.
Resource		Es usado en el modelo para restringir con una capacidad que puede ser medida y liberarla por otro objeto.
Vehicle		Utilizado para transportar entidades entre nodos. Adicionalmente, “en demanda” la ruta del vehículo puede ser usada para mover recursos que son medidos y liberados desde punto nulo de transporte mediante la lógica del proceso.
Worker		Es un objeto movable que puede ser medido y liberado desde las tareas del proceso, adicionalmente, un trabajador puede ser usado para transportar entidades entre diferentes nodos.
BasicNode		Es usado por una entidad como medio para entrar o salir de un objeto, también es usado para definir puntos de intersección.
TransferNode		Este tipo de nodo también puede ser usado para definir un punto de intersección en una red. Opcionalmente puede ser seleccionado el destino de la entidad y proporcionar lógica de transporte.
Connector		Su uso principal es definir una dirección, con cero distancias de un nodo de locación a otro.
Path		Puede ser usado para definir una trayectoria entre dos nodos donde el tiempo de viajes es definidos por las medidas del path y la velocidad de la entidad.
TimePath		Es usado para definir el camino entre dos nodos donde el tiempo es especificado por el usuario.
Conveyor		Puede ser usado para mover entidades entre dos nodos usando una acumulación o ninguna en éste.

Capítulo 3 Metodología

La metodología escogida para el desarrollo del modelo de simulación es la planteada por Averill M. Law, que consta de 10 puntos los cuales son descritos a continuación (Law M., 2013).

3.1 Formulación del problema y plan de estudio

La problemática que se presenta en el área seleccionada es el conocer el origen de los posibles retrasos o situaciones en la recolección de RSU, que afectan de manera directa o indirecta al sistema. Entre las posibles causas están la falta de determinación de tiempo de recolección y la inadecuada logística para la asignación del personal, entre otras.

En primera instancia se selecciona la ruta de interés debido a que es una zona comercial de vital importancia para la ciudad, cuenta con un flujo moderado de transeúntes y turistas, además de ser un área gentrificada mayormente por los atractivos turísticos que se sitúan en ella.

Es necesario realizar un recorrido para reconocer el área donde se lleva a cabo la recolección de RSU, realizar la recolección de datos que se crean necesarias para poder desarrollar el modelo de simulación y someterlos a la metodología ya establecida con anterioridad.

El objetivo del estudio de simulación es realizar una evaluación de la eficiencia de la recolección de basura del sistema de barrido manual mediante un modelo de simulación, para tratar de mejorar su eficiencia. Las medidas de desempeño que se tomarán son el tiempo que se tarda el trabajador en realizar el recorrido por una de las calles de la ruta designada y la cantidad de trabajadores necesarias para realizar la ruta completa, así como la estimación aproximada de la cantidad de basura recolectada.

3.2 Recolección de datos y construcción del modelo conceptual

Los datos obtenidos se dividen en dos sectores: El centro de la ruta que se considera desde Oriente 9 hasta Poniente 5 y el límite inferior de la ruta que pertenece a Calle Real con Norte 10/Sur 11, éste último es considerado como de categoría especial debido al flujo de automóviles y camiones de transporte que transitan por la calle convirtiéndola en la calle principal de toda la ciudad, cabe aclarar que solo se toman en cuenta las cuadras correspondientes dentro del perímetro del ruteo seleccionado.

Tomando en cuenta lo anterior, los datos obtenidos se dividen en dos grupos: datos de recolección y puntos de recolección.

El primer grupo de datos fue proporcionado por parte de la Coordinación de Limpia Pública y han sido clasificados de acuerdo con las partes del proceso del modelo base (Figura 1.3) describiendo cada proceso a continuación:

- **Barrido:** El empleado barre toda la calle con una escoba hecha de hojas de palmera o restos de hierba a modo de simular un cepillo, procurando limpiar la mayor cantidad de polvo o basura que se encuentre a lo largo de la calle.
- **Recogido:** Acción que realiza el obrero al terminar de barrer el tramo de la calle de interés, donde almacena la basura recogida en una bolsa de plástico que porta en el cinturón a modo de simular una “cangurera”. Una vez la bolsa alcanza su límite se procede al siguiente paso.
- **Almacenamiento/Boteo:** El primero es la acción de descargar el contenido de la bolsa dentro del carro recolector, el segundo consiste en verificar el contenido de cada bote colocado en los postes de luz y que se encuentran distribuidos a lo largo de la ruta asignada, para posteriormente y bajo el criterio del trabajador decidir si vacía el contenido dentro del carro recolector.
- **Traslado:** Una vez terminado el aseo de la calle y la verificación de cada bote ubicado dentro de la cuadra, el trabajador desplaza el carro recolector hacia la siguiente cuadra. Esta acción se repetirá hasta el término o límite de la ruta asignada.
- **Demora:** Acción que impide la realización de cualquiera de las tres acciones descritas con anterioridad. Sucede de manera espontánea y afecta de manera directa o indirecta la realización de la tarea.

Para el segundo grupo, se utilizó la herramienta digital “Google Maps” para realizar un primer análisis y localización de los puntos de recolección de manera virtual, los cuales son botes de plástico colocados a lo largo y ancho de toda la ruta con la finalidad de que el peatón deposite la basura en un contenedor adecuado. El primer análisis de la ruta arrojó un total de 113 puntos de recolección, no obstante, se realizó la verificación de manera presencial.

Se realizó el recorrido del perímetro (Figura 3.1) y posteriormente el recorrido de cada calle, tomando como referencia de punto de partida de los trabajadores la zona sur, la cual colinda con el Ecoparque de la ciudad hasta el otro extremo de la ruta llegando al límite, contando de manera

manual y señalando la ubicación de los botes situados a lo largo del área en un mapa digital, haciendo uso de un smartphone y una aplicación que nos permite saber nuestra ubicación en todo momento, con la finalidad de facilitar la localización durante los recorridos.

Obteniendo los siguientes datos (Tabla 3.1):

Tabla 3.1 Datos obtenidos de la cantidad de botes ubicados en la ruta 8.

Calle	Botes
Oriente 6	14
Poniente 5	20
Poniente 3	26
Calle Colón	27
Poniente 2	14
Oriente 5	4
Oriente 7	2
Oriente 9	0
Total:	108

Los recorridos fueron distribuidos de manera individual y en conjunto, primero Calle Real y Oriente 9 de manera independiente a las demás calles debido a que forman parte del perímetro, siendo Calle Real la que cuenta con más puntos de recolección.

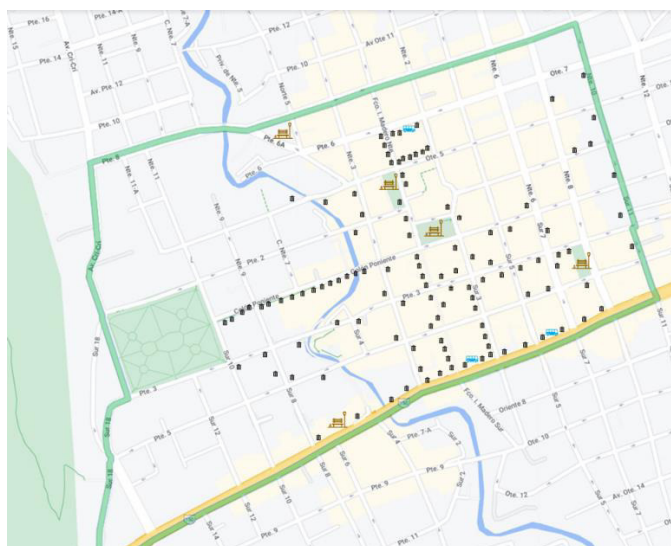


Figura 3.1 Puntos de recolección localizados.

En total se llevaron a cabo 5 recorridos en días diferentes, pero con condiciones climáticas similares, los cuales muestran los puntos de recolección concentrados en un solo mapa (Figura

3.1), en el término del recorrido se pudo constatar que el número real de puntos de recolección son un total de 108.

Al plasmar los puntos de recolección se facilita la construcción del modelo al contar con un apoyo visual, donde se permite ubicar fácilmente áreas de interés e incluso observar ciertos patrones dentro de los puntos de recolección, por ejemplo, se puede observar a simple vista que entre más se concentra la zona comercial se cuenta con un mayor número de botes disponibles, lo cual puede ser causado por el gran flujo de peatones que recorren dichas zonas lo que a su vez causa un incremento en la cantidad de basura producida en el área.

Retomando ambos sectores, los datos de recolección, son sometidos a pruebas de bondad de ajuste las cuales son utilizadas para determinar si el conjunto de datos de interés al ser analizados se ajusta a una distribución de probabilidad teórica conocida. Es necesario conocer esta información debido a que formará parte de los datos de entrada para alimentar el modelo de simulación.

Por ejemplo, al realizar las pruebas correspondientes para los datos de recogido para evaluar en que grado los datos siguen cada distribución, si ésta cuenta con un ajuste adecuado para los datos, los puntos deben estar ubicados cerca de la línea de la distribución para poder determinar un ajuste adecuado, de lo contrario será catalogado como un ajuste deficiente.

En la Figura 3.2 se puede observar que en la primera gráfica correspondiente a la distribución normal se tiene un ajuste deficiente, sin embargo, como se puede observar después de aplicar la transformación de Box-Cox se obtiene un mejor ajuste. En la tercera gráfica situada en la parte inferior izquierda tenemos el ajuste a la distribución exponencial deficiente y por último en la cuarta gráfica ubicada de la parte inferior derecha se tiene a la distribución Log normal, la cual brinda un ajuste eficiente para los datos de recogido.

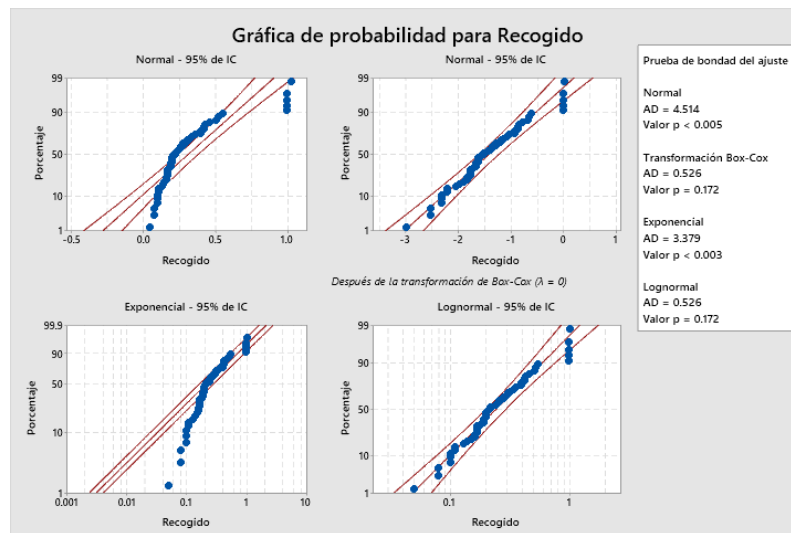


Figura 3.2. Gráfica de probabilidad para recogido

Al seleccionar la distribución adecuada para nuestros datos se debe de tomar en cuenta que ésta debe ser una distribución simple, que se ajuste de manera adecuada a los datos, así mismo se toma en cuenta que sea una distribución utilizada de manera común dentro del programa a utilizar. Al tener datos diferentes para el centro de la ruta, y el límite inferior de ésta que es La Calle Real, es decir, para los sectores del ruteo son realizadas pruebas de bondad de ajuste con sus correspondientes grupos de datos conservando las clasificaciones asignadas.

Una vez realizadas las pruebas de bondad de ajuste para los sectores de datos, son seleccionadas las siguientes distribuciones que serán utilizadas para alimentar el modelo de simulación del sector centro (Tabla 3.2):

Tabla 3.2.Distribuciones del modelo del sector centro de la ruta 8

Grupo	Distribuciones
Barrido	Random.Uniform(5,10)
Recogido	Random.Uniform(0.5, 1.03)
Almacenamiento/Boteo	Random.Uniform(1.8, 2.5)
Traslado	Random.Lognormal(0.1877,0.065)
Demora	Random.Triangular(0.13,0.178,0.22)
	Random.Exponencial(18)

Para el sector perteneciente a Calle Real, fueron seleccionadas las siguientes distribuciones:

Tabla 3.3. Distribuciones del modelo del sector Calle Real

Grupo	Distribuciones
Barrido	Random.Uniform(6,12)
Recogido	Random.Uniform(0.5, 1.30)
Almacenamiento/Boteo	Random.Uniform(2.0,3.5)
Traslado	Random.Lognormal(0.939,0.977)
Demora	Random.Triangular(0.14,1,5)
	Random.Exponencial(18)

3.3 Validación del modelo conceptual

Durante una reunión se consultó con el ingeniero encargado del área de barrido acerca del modelo conceptual que se planteó para llevarlo a cabo en la simulación ya que éste debe ser representativo del sistema real. Este modelo fue aprobado por esta persona y se muestra en la Figura 3.3:

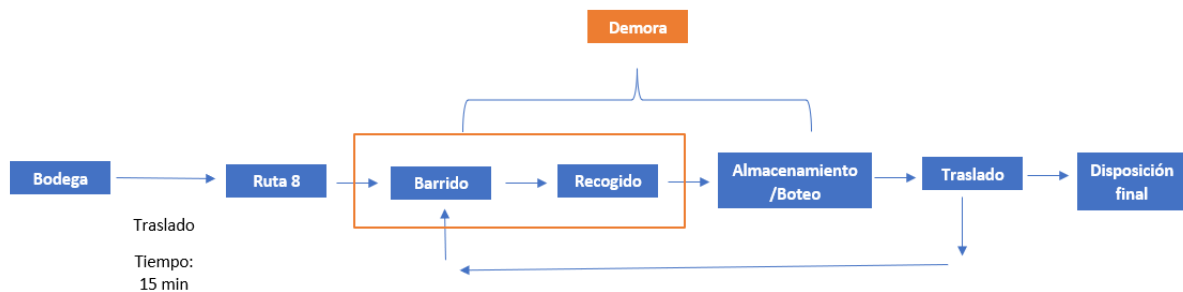


Figura 3.3 Modelo Conceptual

3.4 Construcción del programa

Mediante un software de simulación (SIMIO) se construye el modelo del sistema real, con el sumo cuidado de no entrar en detalles excesivos. A continuación, en la Tabla 3.4 se describen los objetos utilizados en SIMIO:

Tabla 3.4. Objetos de SIMIO utilizados en la construcción del modelo de simulación.

Objeto	Descripción	Cantidad de Objetos
Server	El server dentro del sistema representa las cuadras que conforma la ruta.	79
Time Path	Marca la ruta que el trabajador debe recorrer de manera representativa y contiene una distribución para el tiempo de recorrido.	86
Source	Indica el punto de partida del trabajador, es decir, donde inicia el recorrido de la ruta designada.	7
Sink	Objeto que cumple con la función de destruir las entidades que han finalizado su proceso en el modelo.	8
TransferNode	Permite que, llegado a un punto en específico del modelo, los trabajadores recorran calles diferentes.	1
Entidad	Representa al personal disponible para realizar la tarea designada.	8

Para la elaboración del modelo se busca emular mediante un conjunto de objetos (servers) la forma y estructura de cada calle dentro de la ruta de barrido manual (Figura 1.2).

Dando inicio desde la zona sur del perímetro hacia la zona norte en dirección horizontal, en un recorrido denominado “ala de avión”, el cual consta de un proceso conformado por todas las actividades descritas en párrafos anteriores, simulando un recorrido de manera lineal donde el trabajador desciende en cada esquina para barrer y recolectar la basura que se encuentra entre cada cuadra. De manera gráfica esto se muestra en la Figura 3.4

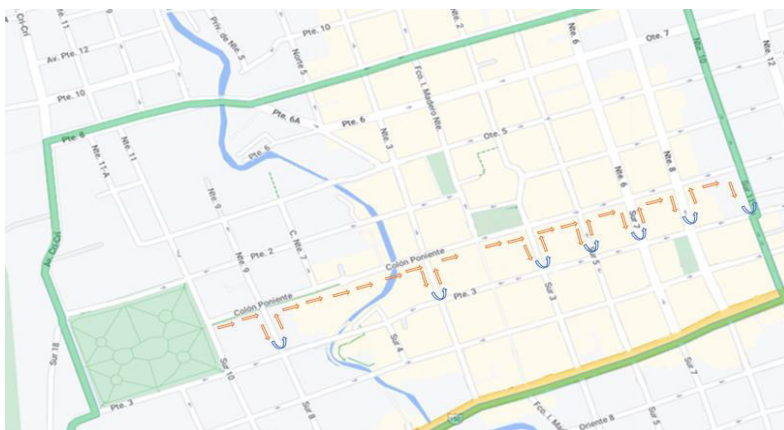


Figura 3.4. Recorrido “Ala de Avión”

La primera calle modelada es la Calle Colón la cual resulta un punto de referencia para la ubicación de cuadras y calles restantes, para poder diferenciar y evitar confusiones a cada Source se le ha designado el nombre de la calle a representar (Figura 3.5).

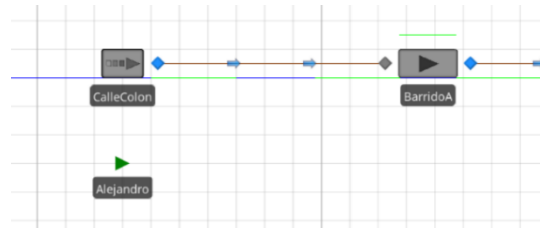


Figura 3.5. Componentes básicos de la Calle Colón

En conjunto a cada Server dentro de la línea respectiva le fue asignado una letra y número para facilitar la distinción de las cuadras, así mismo también se coloca la cantidad de cuadras que tiene cada una de las calles, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.5. Orden de las Calles en el modelo

Calle	Letra	Cantidad de cuadras
Calle Colón	A	8
Poniente 3	B	11
Poniente 5	C	10
Calle Real	D	11
Poniente 2	E	9
Oriente 5	F	10
Oriente 7	G	9
Oriente 9	H	11

A primera instancia se tiene que la estructura elegida para modelar las calles está conformada por objetos básicos de la librería de SIMIO. La parte inicial de la calle se conforma por un Source que cumple la función principal de generar las entidades que le sean indicadas, siguiendo de un Timepath que indica el tiempo que tarda en trasladarse la entidad del punto A al punto B, dicho de otro modo, el TimePath permite que nuestra entidad pase del Source hacia el Server.

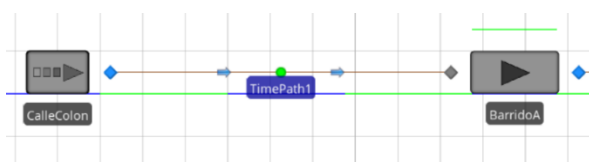


Figura 3.6. Timepath

De igual modo la parte intermedia de la calle está elaborada por una serie de TimePaths, cada uno de ellos contiene una distribución asignada relacionada de manera directa con el traslado del trabajador de un server hacia otro.

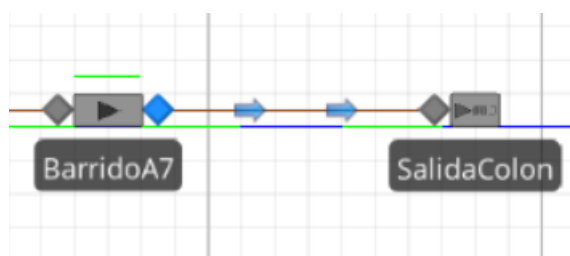


Figura 3.7. Ejemplo de la parte final del modelado de una calle

Desde el server inicial hasta el último de cada calle serán nombrados de manera alfanumérica, con la letra asignada para dicha calle y un número generado de manera automática que permitirá distinguir de mejor manera las cuadras dentro del modelo, asemejándose a un tablero de ajedrez. La numeración asignada por calle y por cuadra se puede observar en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Numeración asignada a las calles y cuadras

Colon	Poniente 3	Poniente 5	Calle Real	Poniente 2	Ote 5	Ote 7	Ote 9
A	B	C	D	E	F	GH	GH
A1	B1	C1	D1	E1	F1	G	H
A2	B2	C2	D2	E2	F2	G1	H1
A3	B3	C3	D3	E3	F3	G2	H2
A4	B4	C4	D4	E4	F4	G3	H3
A5	B5	C5	D5	E5	F5	G4	H4
A6	B6	C6	D6	E6	F6	G5	H5
A7	B7	C7	D7	E7	F7	G6	H6
	B8	C8	D8	E8	F8	G7	H7
	B9	C9	D9	E9	F9		
	B10		D10				

Se debe tomar en cuenta que cada cuadra cuenta con distribuciones diferentes conforme a los puntos de recolección o boteo que se sitúen en ésta. Para cerrar el recorrido de la identidad se debe colocar al final un Timepath que indica el tiempo que tarda el trabajador en ir al punto de

recolección para poder ser trasladado a otra labor, para esto se utilizará un Sink por cada calle (Figura 3.7).

Al definir la estructura final para la elaboración de cada una de las calles, se procede a realizar el modelo en dos partes (Figura 3.8). La primera parte es correspondiente a la parte inferior del ruteo (A) y la segunda a la superior (B), con el único objetivo de facilitar la tarea de construir calle por calle.

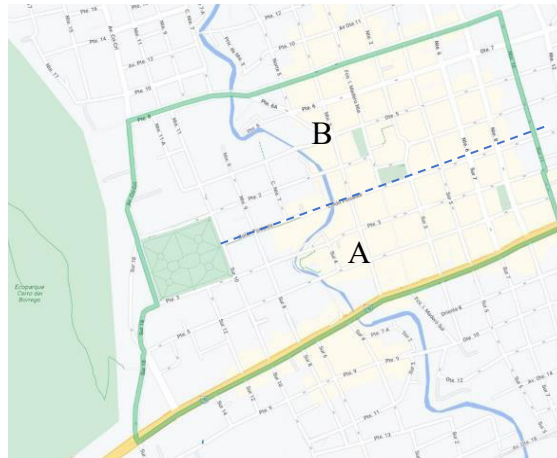


Figura 3.8. División de la ruta

Es importante que al término de la elaboración de una nueva calle se corra el programa para verificar que no ocurra un error. De encontrar un error, éste será más fácil de identificar puesto que se tendrá la certeza de que se encuentra en la última calle elaborada. También se debe tomar en cuenta que cada calle está compuesta por una cantidad diferente de cuadras (Figura 3.4 y Tabla 3.6. Numeración asignada a las calles y cuadras Tabla 3.6).

Una muestra representativa de la parte (A) se muestra a continuación:

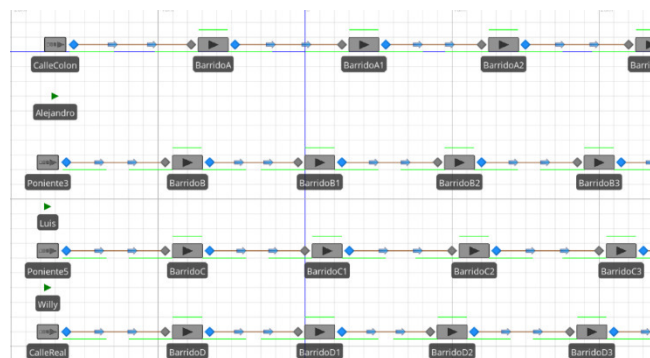


Figura 3.9. Fragmento de la Parte (A) de la ruta 8

Para proceder con la elaboración de la Parte (B), se toma en cuenta que se tiene una cuadra que duplica el tamaño de una normal y que al finalizar termina abriendo un camino simulando una “Y”, por lo tanto, implica el realizar el recorrido de una distinta haciendo que los dos trabajadores tomen un camino diferente, sea por la izquierda o derecha para realizar el barrido del perímetro (Tabla 3.11)

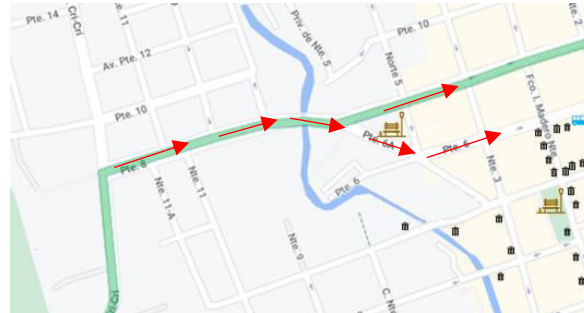


Figura 3.10. Parte en “Y”

Se decidió utilizar un objeto llamado “Transfer Node” cuyo propósito es asignar una calle a la entidad entrante, es este caso en particular, asignar una calle para los trabajadores salientes de la intersección. El TransferNode tiene asignado un proceso el cual permite que las entidades que ingresen tomen caminos separados (Figura 3.11).

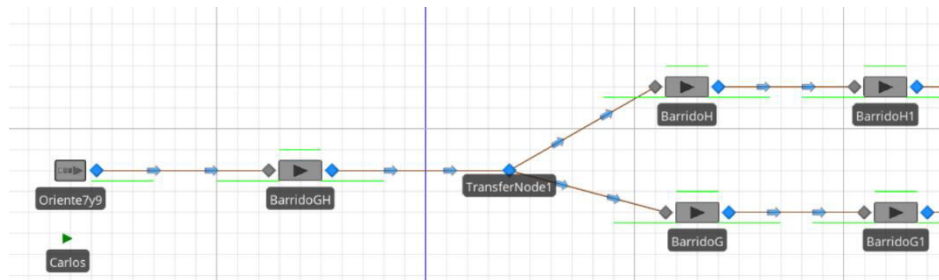


Figura 3.11 TransferNode ruta 8

Se selecciona “TransferNode” y nos ubicamos en la pestaña de RoutingLogic, seleccionamos Outbond Link Preference y lo habilitamos en “Available”, buscamos la opción “Add-On ProcessTriggers”, doble clic en Entered para crear un proceso con el cual abriremos el nodo para hacer que la entidad 1 pase hacia BarridoH y cerraremos para redirigir la segunda entidad ha Barrido G (Figura 3.12)

Donde:

Decide1

Condition Or Probability: Carlos.Population.FirstItem

Assign1

StateVariableName: TimePath16.CurrentTravelerCapacity

New Value: 1

Assign2

StateVariableName: TimePath17.CurrentTravelerCapacity

New Value: 0

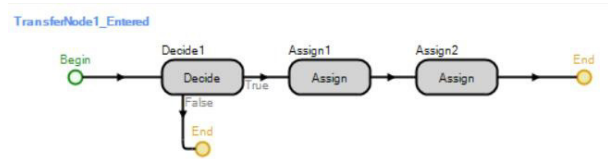


Figura 3.12. Primer proceso

Posteriormente nos situamos en cualquiera de los dos Timepath asignados a BarridoH y BarridoG, en este caso seleccionamos el TimePath16 (Figura 3.13).

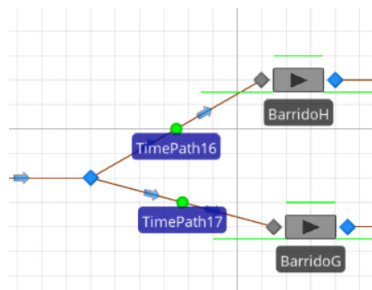


Figura 3.13. Intersección Ruta 8

Buscamos “Add-On ProcessTriggers”, doble clic sobre Trailing Edge Entered para crear un nuevo proceso, colocamos dos nuevos assign (Figura 3.14)

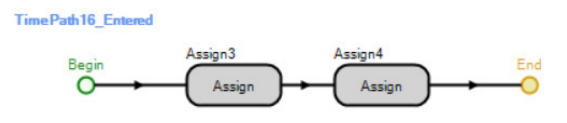


Figura 3.14. Proceso para Timepath

Assign3:

State Variable Name: TimePath16.CurrentTravelerCapacity

New Value:0

Assign4:

State Variable Name: TimePath17.CurrentTravelerCapacity

New Value:1

Programados los procesos necesarios para el recorrido de Barrido GH, BarridoH y BarridoG, se procede a correr el programa de nueva cuenta, así como se ha realizado con cada una de las calles elaboradas, para poder corroborar que los procesos programados no contengan fallas.

Una vez realizado este último paso, se obtiene la parte (B) del modelo de la ruta 8 (Figura 3.15)

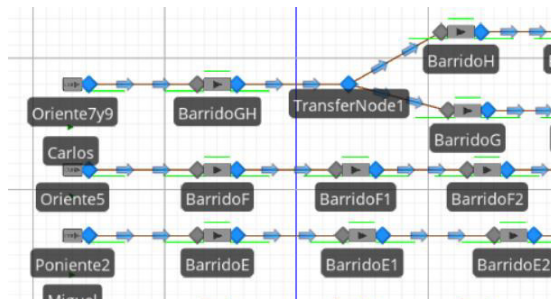


Figura 3.15. Fragmento de la parte (B) de la ruta 8

Al finalizar la parte A y B del modelo, se tiene un Server específico por calle, cada uno contiene una distribución por el barrido, recogido, almacenamiento y boteo, traslado y demora. De manera adicional a estas distribuciones, a cada server se añadió una variable para calcular una aproximación del total de basura recolectada, el proceso para añadir esta medida al modelo se describe a continuación.

En la barra de tareas de SIMIO debemos localizar “Definition” y dar clic sobre la pestaña, donde nos lleva a un nuevo panel de trabajo y herramientas en la barra de tareas (Figura 3.16).

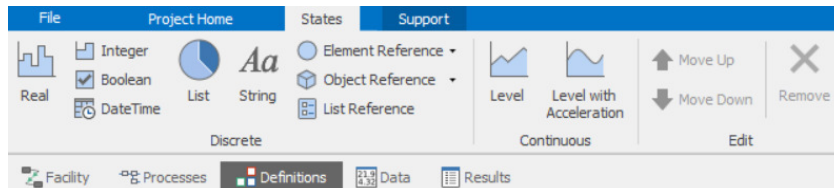


Figura 3.16 Barra de tareas “Definitions> State”

Para representar en el modelo la medida de desempeño que se estimará en galones, se añaden un total de 8 variables enteras utilizando una “integer state” por cada una de ellas nombrándolas de manera individual para poder identificar e integrar a los servers. Las “State Variables” asignadas son las siguientes:

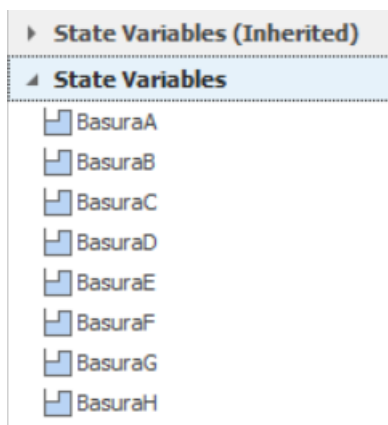


Figura 3.17 State Variables

Al terminar se regresa a la pestaña de “Facility” que permite visualizar el modelo en su totalidad. En orden alfabético se comienza a vincular las variables con su respectiva calle, ejemplo, BasuraA asignada al server BarridoA, BasuraB asignada al server BarridoB... Basura H asignado a BarridoH. Tomando en cuenta lo anterior el punto de partida es Calle Colón y se finaliza con Oriente 7 y 9.

Seleccionando al server de interés, ubicar la pestaña de State Assignments >> After processing, donde se despliega la siguiente ventana:

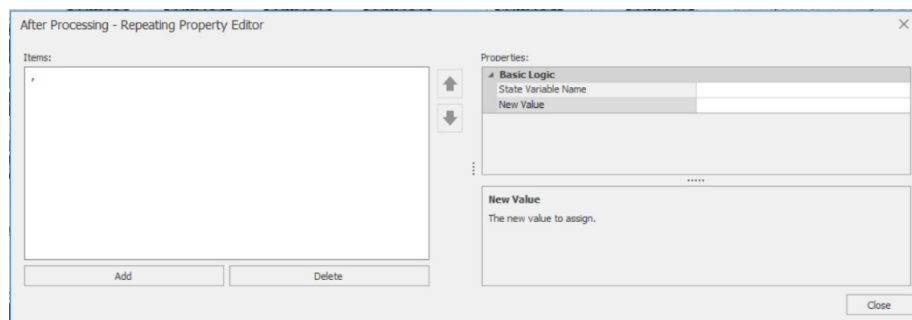


Figura 3.18 After Processing - Editor de propiedades

Doble click en **Basic Logic** colocando los siguientes datos:

State Variable Name: BasuraN

New Value: BasuraN + Math.Round(Random.Uniform(6.4,9.6) *n)

Donde *BasuraN* es la “state variable” que asignaremos y *n* es reemplazada de forma manual y representa el número de puntos de recolección que existen en cada cuadra.

Ejemplo:

State Variable Name: BasuraA

New Value: BasuraA + Math.Round(Random.Uniform(6.4,9.6) *4)

La función **Math.Round** permite obtener valores enteros al redondear el resultado que arroje de acuerdo con la distribución utilizada. Realizaremos este paso en cada uno de los servers que componen el modelo, no obstante, se debe corroborar cuadra por cuadra que no exista errores que puedan interferir con las demás funciones, el software indicará de manera casi inmediata el error encontrado, señalando las posibles causas.

Al terminar el modelo, se tiene la necesidad de visualizar los resultados sin la necesidad de ir a la ventana de resultados, para cubrir esta necesidad se utiliza la herramienta dentro de SIMIO denominada “Status Label”, la cual permite elaborar una tabla donde podemos ver de manera instantánea los resultados de las variables de interés: los tiempos de recolección en horas y la cantidad de basura recolectada en galones.

Para realizar esta acción colocamos los Status Label como se observa en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Tiempo recorrido en horas

Tiempo de Recorrido (Horas)	
Oriente 9	0
Oriente 7	0
Oriente_5	0
Poniente_2	0
Calle_Colon	0
Poniente_3	0
Poniente_5	0
Calle_Real	0

En el lado izquierdo se coloca el nombre de la calle en la cual se mide el tiempo y del lado derecho se coloca la misma cantidad de “Status Label”, en los cuales se modifican sus propiedades de la siguiente manera:

Clic derecho sobre el “Status Label”

Seleccionar en properties>> animation :

Para cada Status Label es necesario vincular el nombre del elemento interés (**Salida_Oriente9**) y la medida que deseamos conocer (tiempo), es por este motivo que se utiliza la expresión;

TimeInSystem.Average y la expresión queda de la siguiente forma:

(Salida_Oriente9.TimeInSystem. Average)

De este modo podemos obtener el tiempo dentro del sistema, pero se requiere que el Status Label reporte únicamente tres decimales por lo tanto se hace uso de la función **Math.Round** que puede ser utilizada dentro del lenguaje de SIMIO para obtener números enteros y también para obtener una n cantidad de decimales deseados. Por ende, se modifica la expresión de la siguiente manera:

Math.Round(Salida_Oriente9.TimeInSystem. Average, 3)

Este proceso se repite de manera consecutiva con los siguientes elementos.

Para el volumen recolectado de basura en galones, se realiza el mismo procedimiento de agregar “Status Label”, cambiando únicamente la expresión que brinda los datos de nuestra medida de interés, en este caso en particular solo se utiliza el nombre asignado a cada “State Variable”.

Clic derecho sobre el “Status Label”

Seleccionar en properties>> animation >> Expression: **BasuraA**

Al finalizar se obtienen dos tablas como se muestra a continuación:

Tiempo de Recorrido (Horas)	
Oriente 9	0
Oriente 7	0
Oriente_5	0
Poniente_2	0
Calle_Colon	0
Poniente_3	0
Poniente_5	0
Calle_Real	0

Volumen recolectado de Basura (Galones)	
Oriente 9	0
Oriente 7	0
Oriente_5	0
Poniente_2	0
Calle_Colon	0
Poniente_3	0
Poniente_5	0
Calle_Real	0

Figura 3.19 Resultado final de la elaboración de tablas dentro de SIMIO.

Con este último paso se ha concluido con la elaboración del modelo del sistema real.

3.5 Verificación del modelo de simulación

Una vez elaborado el modelo de simulación es necesario realizar pruebas piloto para probar el modelo y evitar posibles errores. En el caso particular del modelo elaborado es necesario comprender la composición de una ruta, la cual es conformada por 8 calles, donde el mínimo número de cuadras es 9 y máximo 11, lo que implica variabilidad en los datos finales recolectados.

Por este motivo se realizó la comprobación cuadra por cuadra durante la elaboración del modelo usando la herramienta de SIMIO denominada “Breakpoint” (Figura 3.20) lo que permite evaluar los tiempos finales por cuadra permitiendo encontrar errores casi de manera inmediata en el proceso. Una vez culminado el modelo se eliminan los “Breakpoint” para poder realizar corridas pilotos con el modelo completado en su totalidad, dando como resultado, un excelente desempeño del modelo reduciendo de manera significativa las fallas arrojadas en el sistema de calles y cuadras.

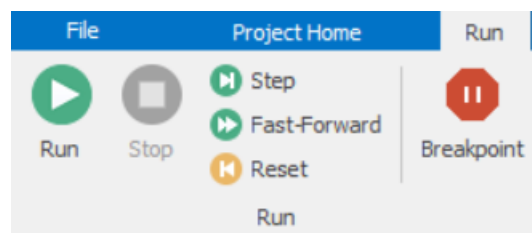


Figura 3.20. Barra de tareas. Breakpoint

La medida de desempeño de importancia es el tiempo total del recorrido de las calles, al tener 8 calles con un número variable de cuadras, se seleccionaron calles con 9, 10 y 11 cuadras para capturar los datos de interés. Con un total de 10 corridas piloto realizadas se obtuvieron los siguientes datos (Tabla 3.8):

Tabla 3.8 Tiempo total del recorrido en horas

Ruta 8		
Calle Real	Oriente 9	Calle Colón
3.504	2.96	3.191
3.663	2.63	3.319
3.456	2.51	3.349
3.343	2.85	3.255
3.417	2.74	3.372
3.332	2.80	3.239
3.514	2.80	3.299
3.534	2.90	3.279
3.326	2.86	3.237
3.470	2.90	3.369

Los cuales son usados para realizar la prueba t-apareada con la finalidad de comprobar que el modelo brinde datos estadísticamente iguales a los que daría el sistema real.

Se comienzan las pruebas con la calle con mayor número de cuadras, Calle Real, donde se implementa las fórmulas adecuadas para dicha prueba, obteniendo de este modo la Tabla 3.9:

X: Tiempo total de recorrido de la Calle Real en el sistema actual.

Y: Tiempo total de recorrido de la Calle Real en el modelo.

Los resultados de las 10 corridas piloto para Calle Real se muestran a continuación:

Tabla 3.9 Datos para prueba t-pareada de Calle Real

Corridas	X_j	Y_j	$Z_j = X_j - Y_j$	$(Z_j - \bar{Z}_{10})^2$
1	3.504	3.365	0.1392	0.0436392
2	3.663	3.415	0.2484	0.1011876
3	3.456	3.315	0.1411	0.0444366
4	3.343	3.523	-0.1801	0.0121882
5	3.417	3.483	-0.0661	0.0000130
6	3.332	3.643	-0.3111	0.0582740
7	3.514	3.503	0.0109	0.0064964
8	3.534	4.113	-0.5791	0.2594884
9	3.326	3.293	0.0329	0.0105268
10	3.470	3.603	-0.1331	0.0040196
Suma				0.5402
Promedio	3.456	3.252	-0.069	

Tomando un intervalo de confianza del 90% para Z, en donde $Z_j = X_j - Y_j$,

$$\bar{Z}_{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^{10} Z_i}{n} = -0.069$$

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

Sustituyendo en la fórmula, tenemos que:

$$\frac{0.5402}{(10)(9)} = 0.0060$$

El intervalo de confianza es $(100-(1-\alpha))$

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\hat{Var}(\bar{Z}_{(n)})}$$

$$-0.069 \pm t_{9, 0.05} \sqrt{0.006}$$

$$-0.069 \pm 1.833 \sqrt{0.006}$$

$$-0.069 \pm 0.1420$$

$$(-0.2117, 0.0722)$$

Una vez verificada la validez de Calle Real que contiene un total de 11 cuadras, se continua con las demás calles. La siguiente es Oriente 9 con un total de 9 cuadras, los resultados de las pruebas piloto se muestran en Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Datos para prueba t-pareada de Oriente 9

Corridas	X_j	Y_j	$Z_j = X_j - Y_j$	$(Z_j - \bar{Z}_{10})^2$
1	2.960	3.154	-0.1937	0.0357
2	2.630	2.762	-0.1322	0.0162
3	2.510	2.872	-0.3622	0.1277
4	2.850	2.716	0.1338	0.0192
5	2.743	2.739	0.0033	0.0001
6	2.810	2.752	0.0573	0.0039
7	2.804	2.988	-0.1838	0.0320
8	2.900	2.612	0.2878	0.0856
9	2.865	2.638	0.2272	0.0538
10	2.906	2.792	0.1142	0.0142
Suma	-	-	-	0.3884
Promedio	2.7978	2.8026	-0.0048	-

Tomando un intervalo de confianza del 90% para Z , en donde $Z_j = X_j - Y_j$,

$$\bar{Z}_{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^{10} Z_i}{n} = -0.0048$$

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

Sustituyendo en la fórmula, tenemos que:

$$\frac{0.3884}{(10)(9)} = 0.0043$$

El intervalo de confianza es $(100-(1-\alpha))$

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\hat{var}(\bar{Z}_{(n)})}$$

$$-0.0048 \pm t_{9, 0.05} \sqrt{0.0043}$$

$$-0.0048 \pm 1.833 \sqrt{0.0043}$$

$$-0.0048 \pm 0.1204$$

$$(-0.1252, 0.1156)$$

Por último, se realiza la prueba t-pareada en la Calle Colón tomando como medida de desempeño la calle conformada por 8 cuadras (Tabla 3.11).

Tabla 3.11 Datos para la prueba de t- pareada Calle Colón

Corridas	X_j	Y_j	$Z_j = X_j - Y_j$	$(Z_j - \bar{Z}_{10})^2$
1	3.191	3.141	0.0503	0.0037
2	3.320	3.191	0.1285	0.0193
3	3.350	3.091	0.2582	0.0723
4	3.250	3.299	-0.0440	0.0011
5	3.372	3.259	0.1130	0.0153
6	3.239	3.419	-0.1800	0.0287
7	3.230	3.279	0.0200	0.0009
8	3.280	3.889	-0.6100	0.3593
9	3.237	3.069	0.1680	0.0319
10	3.370	3.379	-0.0100	0.0000
Suma	-	-	-	0.5325
Promedio	3.2911	3.3017	-0.0106	-

Tomando un intervalo de confianza del 90% para Z , en donde $Z_j = X_j - Y_j$,

$$\bar{Z}_{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^{10} Z_i}{n} = -0.0106$$

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

Sustituyendo en la fórmula, tenemos que:

$$\frac{0.5325}{(10)(9)} = 0.0059$$

El intervalo de confianza es $(100-(1-\alpha))$

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\hat{var}(\bar{Z}_{(n)})}$$

$$-0.0106 \pm t_{9, 0.05} \sqrt{0.0059}$$

$$-0.0106 \pm 1.833 \sqrt{0.0059}$$

$$-0.0106 \pm 0.1409$$

$$(-0.1515, 0.1304)$$

En resumen, se obtuvieron los siguientes intervalos de confianza:

Tabla 3.12 Intervalos de Confianza

	Intervalo
Calle Real	$(-0.2117, 0.0722)$
Oriente 9	$(-0.1252, 0.1156)$
Calle Colón	$(-0.1515, 0.1304)$

Como se puede observar en la Tabla 3.12 Intervalos de Confianza, los intervalos de confianza incluyen al 0, por lo tanto, no se duda de la validez del modelo y la diferencia $z = \mu_x - \mu_y$ no es estadísticamente significativa.

3.5.1 Estimación de basura recolectada

Para la estimación del total de basura recolectada se toma en cuenta la cantidad de botes totales dentro de la ruta (puntos de recolección) y su capacidad individual, los carritos recolectores que utilizan los trabajadores y la cantidad de basura promedio que genera una persona por día.

Los carros recolectores que utilizan los trabajadores son dos contenedores de plástico con una capacidad de 50 galones por cada uno, cada bote tiene una capacidad aproximada de 13 galones. Ambos contenedores no almacenan su capacidad total, esto se debe a la variabilidad del volumen de los RSU depositados, por ejemplo, una botella de plástico de 600 ml no tendrá el mismo volumen de una lata de refresco de 355 ml, un plato desechable, bolsas de frituras etc., lo que significa que se tendrá un “espacio muerto” dentro del contenedor. Tomando en cuenta lo anterior se toma la mitad de la capacidad total con $\pm 20\%$ para crear un rango que nos permita calcular una cantidad aproximada del volumen.

Cálculo del volumen del bote situado en los puntos de recolección:

Fórmula para calcular el volumen de un cilindro:

$$\pi * r^2 * h$$

Datos:

Alto: 65 cm

Diámetro: 35 cm

Radio: 17.5 cm

Sustitución:

$$\pi * 17.5^2 * 65 = 62,537.475 \text{ cm}^3$$

El volumen de la basura es medido en m^3 , por lo tanto, se necesita la conversión de cm^3 a m^3 :

$$1 \text{ m}^3 = 100 \text{ cm}^3$$

$$x = 62,537.475 \text{ cm}^3$$

$$x = 0.0625 \text{ m}^3 = 62.5 \text{ litros}$$

Por último, realizamos la conversión de litros a galones:

$$1 \text{ galón} = 3.78 \text{ litros}$$

$$62.5 \text{ litros} = x \text{ galones}$$

$$x = 16.5 \text{ galones}$$

Cálculo para el volumen aproximado de los puntos de recolección:

$$8.25 \text{ galones} * 20\% = 1.6 \text{ galones}$$

$$8 \text{ galones} \pm 1.6 \text{ galones}$$

$$(6.4, 9.6) \text{ galones}$$

Por lo tanto, el volumen será manejado con una distribución uniforme dentro del modelo de simulación utilizando “Random.Uniform(6.4,9.6)”

3.6 Determinación del número óptimo de corridas

Para realizar este cálculo, se han obtenido los datos correspondientes a 10 corridas de la simulación con la finalidad de tener números aleatorios para la generación de diversos resultados.

El error absoluto de B que se ha tomado para iniciar el cálculo para el número óptimo de corridas es de 0.05 horas para el tiempo de recorrido en la ruta y estableciendo un nivel de confianza del 0.95. Se tomaron en cuenta tres calles diferentes para determinar el número de corridas óptimo del modelo, Calle Real, Oriente 9 y Calle Colón. Realizando los siguientes cálculos:

- **Calle Real**

$$\bar{X}_n = 3.456$$

$$\beta = 0.05$$

$$S^2_n = 0.011$$

$$\alpha = 0.05$$

$$i=10$$

$$: 2.262 \sqrt{\frac{0.011}{10}} = 0.075 \geq 0.05$$

$$i = 15$$

$$: 2.144 \sqrt{\frac{0.011}{15}} = 0.058 \geq 0.05$$

$$i = 20$$

$$: 2.093 \sqrt{\frac{0.011}{20}} = 0.0496 \leq 0.05$$

- **Oriente 9**

$$\bar{X}n = 2.797$$

$$\beta = 0.05$$

$$S^2n = 0.018$$

$$\alpha = 0.05$$

i=10

$$: 2.262 \sqrt{\frac{0.0188}{10}} = 0.098 \geq 0.05$$

i = 20

$$: 2.093 \sqrt{\frac{0.0188}{20}} = 0.064 \geq 0.05$$

i = 30

$$: 2.045 \sqrt{\frac{0.0188}{30}} = 0.0513 \leq 0.05$$

i = 31

$$: 2.039 \sqrt{\frac{0.0188}{30}} = 0.049 \leq 0.05$$

- **Calle Colón**

$$\bar{X}n = 3.2910$$

$$\beta = 0.05$$

$$S^2n = 0.0037$$

$$\alpha = 0.05$$

i=5

$$: 2.776 \sqrt{\frac{0.0037}{5}} = 0.076 \geq 0.05$$

i = 7

$$: 2.446 \sqrt{\frac{0.0037}{7}} = 0.0568 \geq 0.05$$

i = 8

$$: 2.364 \sqrt{\frac{0.0037}{8}} = 0.0513 \leq 0.05$$

i = 9

$$: 2.306 \sqrt{\frac{0.0037}{9}} = 0.0472 \leq 0.05$$

En la Tabla 3.13 se puede observar el número de corridas obtenidos por cada calle que fue seleccionado, se toma en cuenta el resultado arrojado más grande de las tres pruebas realizadas, por lo tanto, el modelo de simulación correrá un total de 31 veces.

Tabla 3.13 Corridas óptimas obtenidas para el modelo

	Corridas óptimas
Calle Real	20
Oriente 9	31
Calle Colón	9

3.7 Análisis de los resultados obtenidos

Los datos presentados en la Figura 3.21 son un ejemplo de los datos obtenidos mediante las 10 pruebas piloto realizadas, donde se observa a mayor detalle el comportamiento de los tiempos de recorrido por cada calle al validar el modelo mediante la prueba de t-pareada y verificar los

Tiempo de Recorrido (Horas)	
Oriente 9	2.697
Oriente 7	2.702
Oriente_5	2.458
Poniente_2	2.277
Calle_Colon	3.259
Poniente_3	3.178
Poniente_5	2.702
Calle_Real	3.276

Figura 3.21 Ejemplo de Tiempo de Recorrido

resultados se puede decir que no se duda de la validez del modelo, es decir, es representativo del sistema real.

La obtención del número de corridas óptimas se realizó con la obtención de datos brindados por las corridas piloto, realizando los cálculos pertinentes se determinó que el número adecuado de corridas óptimas son un total de 31.

Mediante SIMIO se realiza un experimento que permita realizar el total de corridas óptimas para poder evaluar las medidas de interés: tiempo de recorrido y el total de basura recolectada.

Scenario		Replications		Responses						
☒	Name	Status	Required	Completed	CalleReal (Hours)	Oriente9 (Hours)	CalleColon (Hours)	BasuraCalleReal	BasuraCalleColon	BasuraOte9
▶ ☒	Sistema Actual	Idle	31	31 of 31	3.21049	2.79069	2.99969	135.968	223.677	8

Figura 3.22 Resultado Sistema Actual

En la Figura 3.22 se muestra que por cada calle seleccionada se añaden dos “Responses”, una corresponde al tiempo de recorrido en horas y otra a la estimación de basura recolectada en galones. Tomando en cuenta lo anterior se tiene un total de 6 Responses agregadas siendo un total de 3 calles de interés: Calle Real, Oriente 9 y Calle Colón (Avenida Colón).

Las replicaciones corresponden al número óptimo de corridas y los resultados obtenidos permiten realizar la evaluación de las alternativas de solución a la problemática planteada.

Respecto a la estimación de la cantidad de basura durante un día de ruteo, se debe tomar en cuenta que realizar un cálculo exacto es una labor complicada debido a que las cantidades varían de acuerdo con los desechos depositados en los contenedores o puntos de recolección, por lo tanto, los datos arrojados son solo una aproximación a la cantidad recolectada. Ésta se calcula tomando en cuenta el número de puntos de recolección que existen dentro de la ruta de interés, el volumen de almacenamiento de éstos y el volumen de los carros recolectores que utilizan los trabajadores.

Realizando los cálculos pertinentes conjugados con la correcta gestión de herramientas de SIMIO, se logra plantear una tabla del volumen recolectado de basura (Figura 3.23), donde la unidad de medida son galones.

Volumen recolectado de Basura (Galones)	
Oriente 9	7
Oriente 7	49
Oriente_5	77
Poniente_2	62
Calle_Colon	213
Poniente_3	178
Poniente_5	126
Calle_Real	129

Figura 3.23 Basura Recolectada

El resumen de los datos de RSU recolectados y tiempos de recorrido son los siguientes:

Tabla 3.14 Resultados del Sistema Actual

	Tiempo de recorrido (Horas)	RSU Recolectados (Galones)
Calle Real	3.210	135.968
Oriente 9	2.790	223.677
Calle Colón	2.999	8

Puede notarse que el tiempo mínimo de recorrido es de 2.790 y el máximo de 3.21 en horas por calle, y la cantidad mínima de basura recolectada por calle es de 8 y la máxima de 223.67 galones, realizando la conversión a m^3 se tiene un mínimo de $0.002 m^3$ y un máximo de $0.60 m^3$.

Capítulo 4 Análisis de las alternativas

Para poder resolver la problemática planteada en este trabajo se han planteado tres alternativas descritas a continuación.

Alternativa 1. Reubicación y disminución de los puntos de recolección.

La primera alternativa para la resolución de la problemática es la reubicación y disminución en un 10% de los puntos de recolección dentro de la ruta. Se tiene un total de 108 puntos de recolección, cada uno con una capacidad máxima de 9.6 galones y una mínima de 6.4. La simulación arroja una recolección total aproximada de 0.230 m^3 de basura en la ruta mientras que por calle se tiene un rango de mínimo de 0.002 m^3 y máximo de 0.60 m^3 , un tiempo promedio de recolección para una calle conformada por 8 cuadras (Oriente 9) de 2.79 horas, para una calle con 9 cuadras (Calle Colón) de 2.99 horas y de 11 cuadras (Calle Real) de 3.21 horas.

El mapa de los puntos de recolección actual es el mostrado en la Figura 4.1 y la cantidad de puntos de recolección se muestra en la Tabla 4.1.

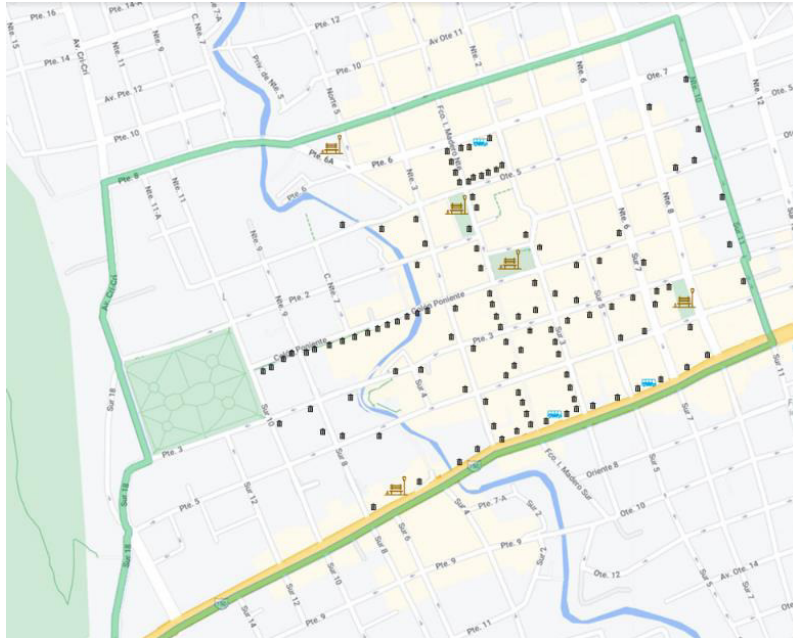


Figura 4.1 Distribución actual de los puntos de recolección

Note que en cada calle presentada en la Tabla 4.1, se cuenta con dos columnas, la primera corresponde a un código alfanumérico asignado a cada cuadra y la segunda muestra la cantidad de puntos de recolección o botes que contiene cada una, ejemplo, en la columna de Calle Real en la cuadra D3 se tiene registrados 4 botes, mientras que en la columna de Ote. 7 en la cuadra G se tiene 4 botes, de este modo se facilita el manejo del modelo ya que éste cuenta con un total de 79 servers, y si se identifica una deficiencia se sabrá con exactitud en que calle y cuadra se encuentra, otra perspectiva que se puede tener con este método de numeración es la de un tablero de ajedrez.

Tabla 4.1 Puntos de recolección por calle del sistema actual

Calle Colón		Pte. 3		Pte. 5		Calle Real		Pte. 2		Ote. 5		Ote. 7		Ote. 9	
A	4	B	-	C	-	D	-	E	-	F	-	GH	-	GH	-
A1	13	B1	-	C1	-	D1	-	E1	-	F1	-	G	4	H	-
A2	5	B2	3	C2	-	D2	-	E2	2	F2	4	G1	-	H1	-
A3	2	B3	3	C3	5	D3	4	E3	2	F3	3	G2	-	H2	-
A4	1	B4	1	C4	5	D4	2	E4	-	F4	-	G3	-	H3	-
A5	1	B5	4	C5	3	D5	3	E5	1	F5	-	G4	-	H4	-
A6	1	B6	4	C6	-	D6	2	E6	1	F6	-	G5	-	H5	-
A7	1	B7	2	C7	2	D7	2	E7	-	F7	-	G6	2	H6	-
-	-	B8	2	C8	1	D8	2	E8	1	F8	-	G7	-	H7	-
-	-	B9	3	C9	-	D9	2	E9	1	F9	3	-	-	-	-
-	-	B10	1	-	-	D10	-	-	-	-	-	-	-	-	-

De manera resumida en la Tabla 4.2 se muestra la cantidad de puntos de recolección por calle.

Tabla 4.2 Resumen de puntos de recolección

Calle	Total
Calle Colón	28
Pte. 3	23
Pte. 5	16
Calle Real	17
Pte. 2	8
Ote. 5	10
Ote. 7	6
Ote. 9	-

Los cambios realizados se encuentran en 6 de las 8 calles que conforman el sistema, siendo éstas Calle Colón, Pte. 3, Pte. 5, Ote. 5, Ote. 7 y Ote. 9. Los botes modificados fueron los de las siguientes cuadras y se describen de esta manera:

- Calle Colón: cuadra A1 (-5 botes).
- Pte. 3 cuadra B9 (-1 bote).
- Pte. 5 cuadra C2 (+2 botes), cuadra C3 (-3 botes), cuadra C4 (-3 botes) y C5 (-1 bote)
- Ote. 5 cuadra F2 (-1 bote), cuadra F3 (-1 bote), Cuadra F9 (-1 bote)
- Ote. 7 cuadra G (-4 botes), cuadra G1(+1 bote), cuadra G2 (+1 bote), Cuadra G7 (+1 bote)
- Ote. 9 cuadra H1 (+1 bote), cuadra H4 (+1 bote)

Los nuevos puntos de recolección fueron colocados en dos calles donde la existencia de botes es nula (Tabla 4.3), pero cuenta con un flujo considerable de personas transitando debido a que se localizan puntos importantes como paradas de autobús, instituciones de gobierno y negocios, realizando la reducción del 10% de 108, quedando un total de 97 puntos de recolección.

Tabla 4.3 Modificaciones Alternativa 1

Calle Colon	Pte. 3	Pte. 5	Calle Real	Pte. 2	Ote. 5	Ote. 7	Ote. 9
A 4	B 0	C 0	D 0	E 0	F 0	GH 0	GH 0
A1 8	B1 0	C1 2	D1 0	E1 0	F1 0	G 0	H 0
A2 4	B2 3	C2 2	D2 2	E2 2	F2 3	G1 1	H1 1
A3 2	B3 3	C3 2	D3 2	E3 2	F3 2	G2 1	H2 0
A4 2	B4 1	C4 2	D4 3	E4 0	F4 0	G3 0	H3 0
A5 2	B5 4	C5 2	D5 2	E5 1	F5 0	G4 0	H4 1
A6 2	B6 4	C6 0	D6 2	E6 1	F6 0	G5 0	H5 0
A7 1	B7 2	C7 2	D7 2	E7 0	F7 0	G6 0	H6 0
- -	B8 2	C8 1	D8 2	E8 1	F8 0	G7 1	H7 0
- -	B9 2	C9 0	D9 2	E9 1	F9 2	- -	- -
- -	B10 1	- -	D10 0	- -	- -	- -	- -

En la Tabla 4.4 se muestra la nueva distribución y la cantidad de botes o puntos de recolección por cada una de las calles:

Tabla 4.4 Cantidad de puntos de recolección de acuerdo con la Alternativa 1

Calle	Total
Calle Colón	25
Pte. 3	22
Pte. 5	13
Calle Real	17
Pte. 2	8
Ote. 5	7
Ote. 7	3
Ote. 9	2
Total	97

De igual modo, se realizaron 31 corridas para obtener las medidas de desempeño de interés que se muestran en la Figura 4.2 y en la Tabla 4.5.

Scenario			Replications		Responses					
☒	Name	Status	Required	Completed	CalleReal (Hours)	Oriente9 (Hours)	CalleColon (Hours)	BasuraCalleReal	BasuraCalleColon	BasuraOte9
☒	Alternativa 1	Comple...	31	31 of 31	3.24172	2.88325	2.909	136.387	198.806	15.9677

Figura 4.2 Resultados de la Alternativa 1

Tabla 4.5 Resultados del tiempo de recorrido por calle en horas (Alternativa 1)

	Sistema Actual	Alternativa 1	%
Calle Real	3.21 hr	3.24 hr	+ 0.97%
Oriente 9	2.79 hr	2.88 hr	+ 3.33%
Calle Colón	2.99 hr	2.90 hr	- 3.0%

De acuerdo con la primera alternativa planteada se puede observar que solo la medida de desempeño que pertenece a Calle Colón se ve disminuida; sin embargo, las otras dos pertenecientes a Calle Real y Oriente 9 se ven afectadas teniendo un incremento del 0.97% y 3.33% respectivamente, mientras que Calle Colón tiene una disminución del 3% en su tiempo de recolección final, como se muestra en la Figura 4.3.



Figura 4.3 Tiempo de recorrido en horas (Sistema Real vs Alternativa 1)

Con relación a la estimación aproximada de la recolección de residuos sólidos urbano, se observa un aumento proporcional al número de botes aumentados en Oriente 9, debido a que se duplica la cantidad, mientras que en Calle Real no se ve afectada debido a que no se modificó la cantidad total de botes de toda la calle, mientras que Calle Colón con una disminución de 3 botes redujo la cantidad total de basura recolectada en un 11% (Figura 4.4)

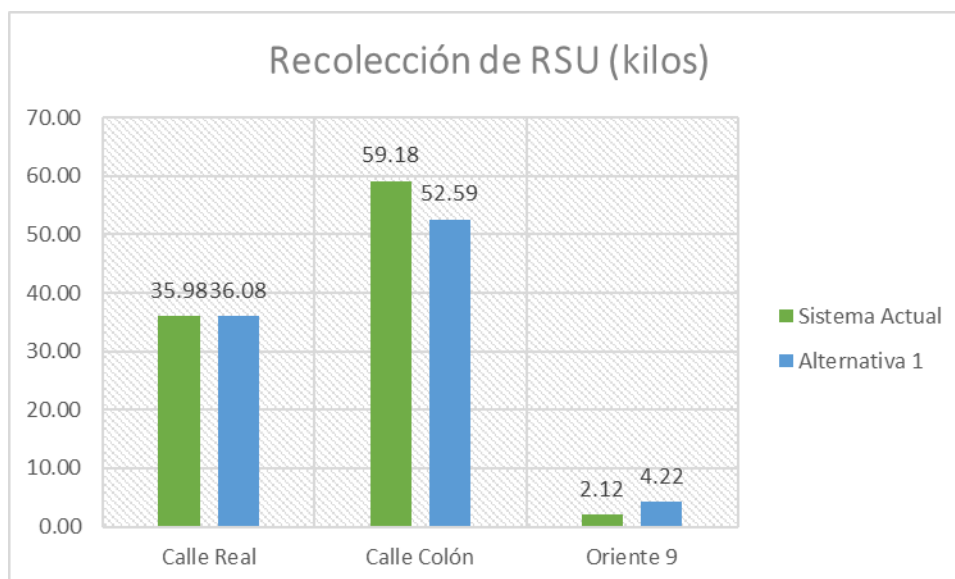


Figura 4.4 Recolección de RSU (Sistema Real vs Alternativa 1)

Alternativa 2. Reubicación y aumento de los puntos de recolección.

En esta ocasión, se realiza un aumento de puntos de recolección del 10%, teniendo un aumento de 108 botes a 119, como se muestra en la Tabla 4.6, donde las modificaciones realizadas fueron un total de 5 de 8 calles como se realizó en la alternativa 1.

Los botes agregados en esta alternativa son descritos a continuación:

- Calle Colón Cuadra A7 (+1 bote)
- Pte. 5 Cuadra C9 (+1 bote)
- Calle Real cuadra D10 (+2 botes)
- Ote. 7 cuadra G2 (+2 botes), cuadra G4 (+2 botes)
- Ote. 9 cuadra H1 (+1 bote), cuadra H3 (+1 bote), cuadra H5 (+1 bote)

Tabla 4.6 Modificaciones Alternativa 2

Calle Colón	Pte. 3	Pte. 5	Calle Real	Pte. 2	Ote. 5	Ote. 7	Ote. 9
A 4	B 0	C 0	D 0	E 0	F 0	GH 0	GH 0
A1 13	B1 0	C1 0	D1 0	E1 0	F1 0	G 4	H 0
A2 5	B2 3	C2 0	D2 0	E2 2	F2 4	G1 0	H1 1
A3 2	B3 3	C3 5	D3 4	E3 2	F3 3	G2 2	H2 0
A4 1	B4 1	C4 5	D4 2	E4 0	F4 0	G3 0	H3 1
A5 1	B5 4	C5 3	D5 3	E5 1	F5 0	G4 2	H4 0
A6 1	B6 4	C6 0	D6 2	E6 1	F6 0	G5 0	H5 1
A7 2	B7 2	C7 2	D7 2	E7 0	F7 0	G6 2	H6 0
- -	B8 2	C8 1	D8 2	E8 1	F8 0	- -	H7 0
- -	B9 3	C9 1	D9 2	E9 1	F9 3	- -	- -
- -	B10 1	- -	D10 2	- -	- -	- -	- -

En la Tabla 4.7 se muestra la nueva distribución y la cantidad de botes o puntos de recolección por cada una de las calles:

Tabla 4.7 Cantidad de puntos de recolección de acuerdo con la Alternativa 2

Calle	Total
Calle Colón	29
Pte. 3	23
Pte. 5	17
Calle Real	19
Pte. 2	8
Ote. 5	10
Ote. 7	10
Ote. 9	3
Total	119

Después de modificar las calles agregando los puntos de recolección, se realizaron 31 corridas del programa (Figura 4.5).

Scenario			Replications		Responses					
☒	Name	Status	Required	Completed	CalleReal ...	Oriente9 ...	CalleColon ...	BasuraCalleReal	BasuraOriente9	BasuraColon
☒	Alternativa 2	Comple	31	31 of 31	3.32734	2.92769	3.05292	150.903	32.0645	233.581

Figura 4.5 Resultados Alternativa 2.

Los resultados son mostrados en Tabla 4.8:

Tabla 4.8 Resultados del tiempo de recorrido por calle en horas (Alternativa 2)

	Sistema Real	Alternativa 2	%
Calle Real	3.210 hr	3.327 hr	+ 3.63%
Oriente 9	2.790 hr	2.927 hr	+ 4.89%
Calle Colón	2.999 hr	3.05 hr	+ 2.05 %

Los tiempos de recolección obtenidos al realizar las 31 corridas son 3.327 para Calle Real, 2.927 para Oriente 9 y 3.05 en Calle Colón horas (Figura 4.6).

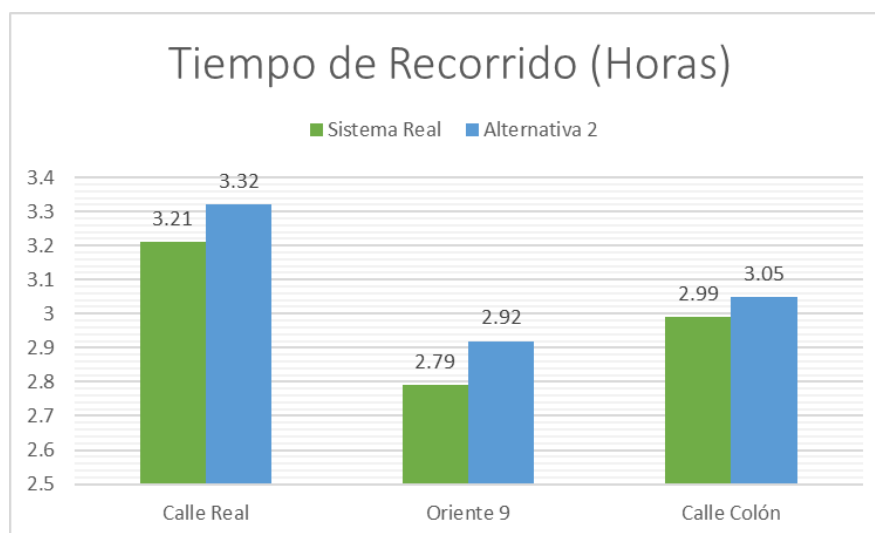


Figura 4.6 Tiempo de recorrido en horas (Sistema Real vs Alternativa 2)

Respecto a la estimación de la recolección de RSU se tiene un total de 39.92 kilos en Calle Real, 8.48 kilos en Oriente 9 y 61.79 kilos en Calle Colón (Figura 4.7)

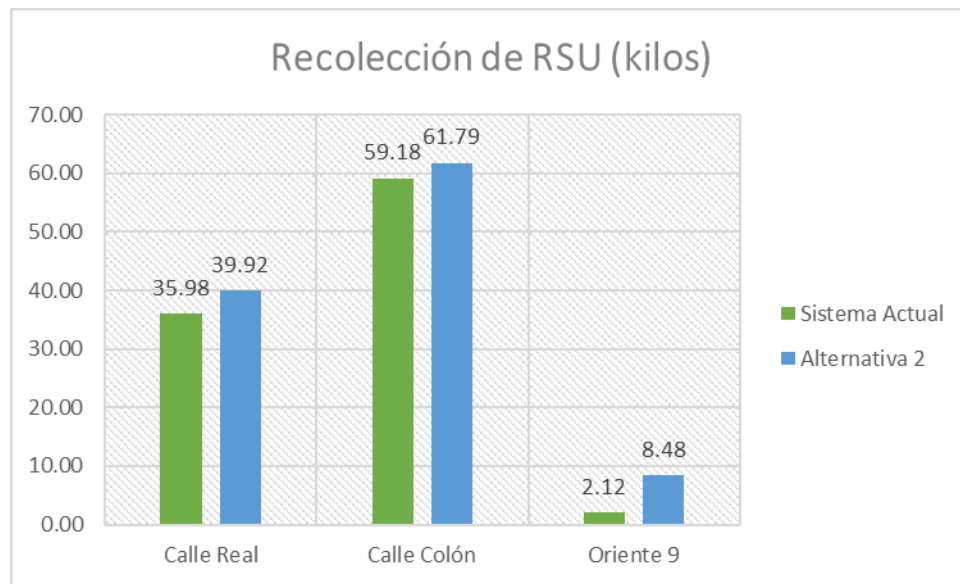


Figura 4.7 Recolección de RSU (Sistema Real vs Alternativa 2)

En esta segunda alternativa se observa un incremento en los tiempos de recorrido del 3.63% en Calle Real, 4.89 % en Oriente 9 y 2.01 % en Calle Colón, así como un aumento de la recolección de RSU del 11%, en Calle Real y 4% en Calle Colón, mientras que en Oriente 9 se observa que el valor se triplica.

Alternativa 3. Reducción de personal para el recorrido de la ruta 8.

Este proceso amplió el recorrido del trabajador haciendo que, al llegar al otro extremo de la ruta 8 y retorne hacia la calle continua para regresar al punto de partida emulando el mismo proceso de “ala de avión”. Las calles cuyo recorrido ha sido modificado son: Pte. 3, Pte. 5, Pte. 2, Ote. 5, Ote. 7 y Ote. 9, utilizando únicamente 5 trabajadores en lugar de 8 que son los que inicialmente realizan el recorrido de las 8 calles que conforman la ruta 8, combinando las calles de la siguiente manera:

- Pte. 3 con Pte. 5
- Pte. 2 con Ote. 5
- Ote. 7 con Ote. 9

Esto se hace respetando el orden en el que está conformado el modelo, lo cual se muestra de forma gráfica en la Figura 4.8 , en rojo son las calles que están combinadas y las que no, son calles que tengan una cuadra de diferencia de tal modo que son combinadas con la calle inferior o superior, en Ote. 7 y Ote. 9 solo queda un solo espacio debido a que después de dos cuadras la calle tiene una bifurcación, dejando únicamente Calle Colón, Calle Real y Pte. 2 operando de forma individual marcadas en verde.



Figura 4.8 Alternativa 3 mostrada de forma gráfica.

Dicho lo anterior, las medidas de desempeño que son tomadas en esta alternativa ahora pertenecen a los Sink de salida asignados a cada una de las calles agrupadas, por lo tanto, en el modelo original se toma en cuenta sus similares. Esto no afecta en gran medida debido a que durante el desarrollo de la metodología se ha realizado la validación del modelo en el cual se afirma que con un 90% de confianza el modelo representa al sistema real.

Por lo tanto, al correr 31 veces el modelo de la alternativa 3 se obtienen los resultados de los tiempos recorridos (Figura 4.9).

Capítulo 4. Análisis de las alternativas

Scenario			Replications		Responses					
☒	Name	Status	Required	Completed	Pte3y5 (Hours)	Ote9y7 (Hours)	Ote5yPte2 (Hours)	BasuraPte3y5	BasuraOte5yPte2	BasuraOte7y9
☒	Alternativa3	Comple	31	31 of 31	5.26578	4.08378	4.33169	311.935	143.613	55.1935
☐										

Figura 4.9 Resultados de la Alternativa 3

Para realizar una comparativa adecuada con el sistema real, se suman los valores de las calles que están siendo combinadas para el tiempo de recorrido del trabajador arrojado en el modelo del sistema actual como se describe a continuación:

$$Pte. 3 (2.86) + Pte. 5 (2.97) = 5.83 \text{ horas}$$

$$Ote. 7 (2.58) + Ote. 9 (2.91) = 5.49 \text{ horas}$$

$$Pte. 2 (2.36) + Ote. 5 (2.48) = 4.84 \text{ horas}$$

Una vez realizado lo anterior, se procede a sumar los datos de los RSU recolectados del sistema actual, teniendo que:

$$Pte. 3 (199) + Pte. 5 (129) = 328 \text{ galones}$$

$$Ote. 7 (43) + Ote. 9 (9) = 52 \text{ galones}$$

$$Pte. 2 (66) + Ote. 5 (75) = 141 \text{ galones}$$

Los resultados de estas sumatorias son mostrados en la Tabla 4.9, y pertenecen al sistema real, donde se convierte la cantidad de RSU recolectados a kilogramos.

Tabla 4.9 Resultados de las sumas del Sistema Real

	Tiempo de recorrido (Horas)	RSU Recolectados (Galones)	RSU Recolectados (Kilos)
Pte. 3 y 5	5.83 hr	328	86.77
Ote. 7 y 9	5.49 hr	52	13.76
Pte. 2 y Ote. 5	4.84 hr	141	37.30

Después de realizar las 31 corridas del modelo para la alternativa 3, se obtienen los resultados que serán utilizados para la comparativa (Tabla 4.10).

Tabla 4.10 Resumen de resultados de la Alternativa 3

	Tiempo de recorrido (Horas)	RSU Recolectados (Kilos)
Pte. 3 y 5	5.26 hr	85.52 kg
Ote. 7 y 9	4.08 hr	14.60 kg
Pte. 2 y Ote. 5	4.33 hr	37.99 kg

En la Tabla 4.11, en la cual se comparan los tiempos de recorrido del sistema real contra los datos de la alternativa 3, se observa que se tiene una disminución en los tiempos del 9.8 % en Pte. 3 y 5, 25.7% en Ote 7 y 9, y por último 10.6% en Pte. 2 y Ote. 5 (Figura 4.10).

Tabla 4.11 Comparación de los tiempos de recorridos en horas

	Sistema Real	Alternativa 3	%
Pte. 3 y 5	5.83 hr	5.26 hr	- 9.8%
Ote. 7 y 9	5.493 hr	4.08 hr	- 25.7%
Pte. 2 y Ote. 5	4.844 hr	4.33 hr	- 10.6%

En la Figura 4.10 se puede observar con mejor detalle los tiempos de disminución en cada una de las opciones brindadas en esta alternativa.

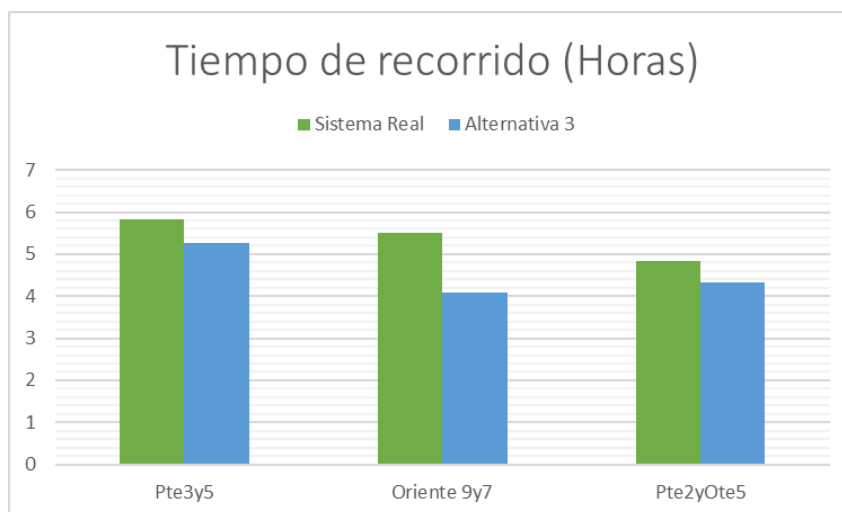


Figura 4.10 Tiempo de Recorrido (Sistema Real vs Alternativa 3)

Referente a la recolección de RSU, se nota en la Tabla 4.12 que se ha presentado una disminución de 4.9 % para Pte. 3 y 5, en el caso de Ote. 7 y 9 muestra un aumento del 6.2%, del mismo modo en Pte. 2 y Ote. 5 aumenta un 1.9 % en la recolección (Figura 4.11).

Tabla 4.12 Resultados de la Alternativa 3 (Kilos)

	Sistema Actual	Alternativa 3	%
Pte. 3 y 5	86.77 kg	85.52 kg	- 4.9 %
Ote. 7 y 9	13.76 kg	14.60 kg	+ 6.2 %
Pte. 2 y Ote. 5	37.30 kg	37.99 kg	+ 1.9 %

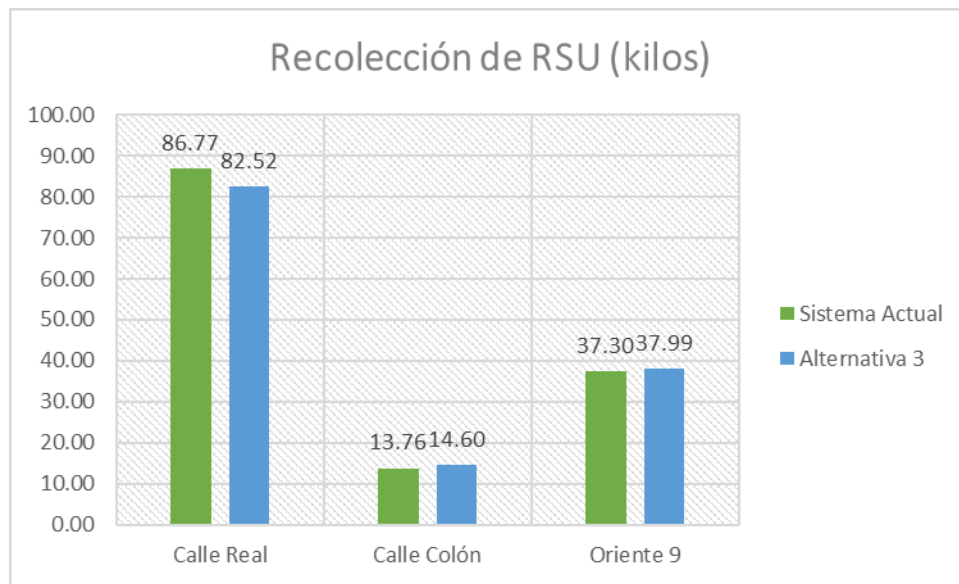


Figura 4.11 Recolección de RSU (Sistema Actual vs Alternativa 3)

Dentro de este capítulo se han planteado 3 alternativas diferentes para evaluar el comportamiento de las medidas de desempeño seleccionadas: el tiempo de recorrido de los trabajadores y la estimación aproximada de RSU recolectados por calle. Se puede observar una relación directa respecto a un aumento o disminución entre los tiempos de recolección con los puntos de recolección en cada una de las calles, por ende, también se ve afectada la cantidad de RSU recolectados y podemos llegar a las siguientes conclusiones:

- En la alternativa 1, al disminuir de 108 a 97 botes, representando una disminución del 10% de los botes, lo cual no afecta de manera significativa al sistema en los tiempos de recolección, por lo tanto. También se muestra una mejora en los RSU recolectados, por lo tanto, puede ser una opción viable para implementar.
- En la alternativa 2, el aumento de 108 botes a 119 botes, representando un aumento del 10% de los puntos de recolección sí afecta de manera significativa al sistema

real, aumentando los tiempos de recolección de manera negativa, dado que se busca una disminución de tiempos de recolección y no un aumento.

- Se ha comprobado mediante la simulación que la alternativa 3, la cual consta de la disminución de trabajadores de 8 a 5 y la reubicación de los botes, es una alternativa viable, debido a que no sólo presenta una disminución de los tiempos de recolección, si no que, al reubicar los botes o puntos de recolección, se obtiene un impacto positivo dentro del sistema porque aumenta la cantidad de RSU recolectados dentro de la ruta, además de disminuir los costos por los sueldos de los trabajadores.

Conclusiones

En el presente proyecto se buscó plantear una serie de alternativas para la problemática de la ruta 8 donde se requiere conocer el origen de los posibles retrasos o causas que pueden afectar de manera directa o indirecta el proceso del barrido manual implementado, para esto mediante la metodología que fue seleccionada, permite llevar un estricto orden para la simulación desde el análisis de datos hasta la selección de las distribuciones que alimentan al modelo. Los datos brindados fueron obtenidos directamente del proceso de barrido que llevan a cabo los trabajadores durante el ruteo designado, otro punto importante es el contar con Software adecuado y completo para poder llevar a cabo la simulación del modelo del sistema real. En este caso SIMIO ha jugado un papel importante debido a que en su biblioteca cuenta con las herramientas suficientes para poder generar resultados de manera eficaz, tanto para el modelo del sistema real como para las tres alternativas planteadas.

Las medidas de desempeño seleccionadas para el modelo fueron dos: el tiempo de recorrido en horas y la estimación aproximada de la cantidad de RSU recolectados, respecto a estas medidas de desempeño fue importante tomar en cuenta diferentes factores. En la primera, por ejemplo, es importante tomar en cuenta la cantidad de cuadras que conforman una calle dentro de la ruta seleccionada y en la segunda lo es la cantidad de puntos de recolección o botes colocados dentro de la calle teniendo sumo cuidado de saber su cantidad exacta, ésta última con la finalidad de que el modelo simulado brinde resultados confiables.

En la simulación del sistema real se ha obtenido un tiempo de recorrido mínimo de 2.79 horas y un máximo de 3.21 horas en la ruta 8, mientras que en la estimación de basura se calcula un total de 0.230 m^3 de basura recolectada lo que es equivalente a 230 kilos por día, también se debe estar consciente de la densidad de la basura lo cual es la relación del volumen ocupado dentro de determinada área entre su peso, lo cual puede aparentar que 230 kilos ocupen mucho o poco volumen en un área determinada debido a que la composición de los RSU va desde cartón y botellas que tienen a ocupar mucho espacio hasta botellas con líquido en su interior, latas de metal, etc. El intervalo de basura recolectada por calle es un mínimo de 0.002 m^3 y un máximo de 0.60 m^3 donde se evidencia la relación directa entre la cantidad de basura recolectada y la cantidad de botes colocados por calle.

Para la alternativa 1, se planteó la posibilidad de disminuir la cantidad de puntos de recolección en un 10% de un total de 108, como resultado se obtuvo un total de 97 botes, adicionalmente se

reubicaron en nuevos puntos dentro de la ruta 8 donde la existencia era nula pero el flujo de peatones es abundante; sin embargo, al realizar las 31 corridas necesarias se obtuvo solamente la disminución de los tiempos de recorrido en una sola calle en un 3%, lo cual no es un porcentaje muy alto esperado. No obstante, en Calle Colón con una reducción de 3 botes se disminuye la cantidad de RSU recolectados en un 11% y Oriente 9 duplicó la cantidad de RSU recolectados, medida de desempeño que fue capturada en galones, pero se convirtieron a m^3 ya que es una unidad de medida más común y fácil de utilizar. Dicho de otro modo, pese a no disminuir los tiempos de recolección, se obtuvo una mejoría en relación con la cantidad de RSU recolectados. En la alternativa 2 se aumentó la cantidad de puntos de recolección pasando de 108 botes a un total de 119 botes, lo cual reflejó un aumento de un mínimo de 2% y un máximo del 5% en los tiempos de recorrido, mientras que los RSU recolectados se registraron aumentos mínimos del 4% y máximo del 11%.

Con ambas alternativas se puede relacionar de manera directa que la cantidad de puntos de recolección dentro de la ruta 8, afecta de manera directa a los tiempos de recolección y la cantidad de RSU recolectados, aunque también se ha comprobado que es conveniente realizar una disminución de los puntos de recolección en un 10% y plantear una reubicación de los botes. En la Alternativa 3, los cambios realizados en el sistema fueron dos: el primero fue reducir la cantidad de trabajadores donde al inicio se tenían un total de 8 se ha disminuido a 5, haciendo que éstos al llegar al borde de la ruta 8 retomen el recorrido de la calle contigua, el segundo fue la reubicación de los puntos de recolección o boteo. Mediante la simulación de la alternativa realizando comparaciones con los tiempos obtenidos en el sistema real se obtuvo una reducción de entre 9.8% y un 25.7% en los tiempos de recorrido, y en la recolección de RSU se obtuvo un aumento de entre 4.9% y 6.2% por calle.

Tomando en cuenta las tres alternativas planteadas para la solución de la problemática, se puede decir que la variable que afecta el sistema real de manera directa para los tiempos de recorrido es la ubicación de los puntos de recolección, la cantidad de RSU también se muestra afectada debido a que presenta un aumento proporcional a la cantidad de botes colocados dentro de la alternativa 2, así como se observó un aumento en los tiempos de recorrido de los trabajadores. Sin embargo, en la alternativa 1 se plantea una disminución de los puntos de recolección (de 108 a 97) así como la reubicación de algunos de estos en calle donde se presenta un alto afluente de peatones, dando como resultado un impacto positivo de acuerdo con la cantidad de RSU

recolectados, pero solo una de tres calles mostró una disminución de los tiempos. Esto quiere decir que la alternativa 1 es viable y favorece el sistema, no obstante, no es la mejor.

En la alternativa 3, la disminución del personal requerido para llevar a cabo el recorrido de la ruta fue de 8 trabajadores a solo 5, observándose una disminución de los tiempos de recolección en conjunto con un impacto positivo al reubicar éstos en las calles donde su existencia era nula.

En resumen, la alternativa 3, presenta un aumento de la cantidad de RSU recolectados con un mínimo de 4.9%, una disminución de los tiempos de recolección por calle de al menos 9.8% y una disminución de 3 trabajadores que cubren la ruta, teniendo la posibilidad de que los trabajadores que ya no son requeridos dentro de la ruta 8 puedan desempeñar otra labor o asignarlos de apoyo a otras rutas de la ciudad.

Tomando en cuenta todos los factores dentro del sistema se considera que la mejor alternativa es la 3 dado que al reducir el número de trabajadores de 8 a 5, existe un ahorro en sueldos además de que se muestra un aumento de la recolección de RSU.

Finalmente, SIMIO permitió construir un sistema real adecuado mediante la amplia cantidad de herramientas con las que éste cuenta abriendo paso a crear un modelo del sistema real representativo de la ruta 8, que fue de gran utilidad, ya que al realizar la simulación de las calles se tuvo una amplia visión de la forma en que se puede mejorar el sistema de barrido y recolección dentro de la ruta.

Capítulo 5 Referencias

- Aviles F., M. G., Melendez G, H. A., & Rivas R., E. (Agosto de 2012). Empresas Recicladoras en México. CMDX: Instituto Politecnico Nacional (IPN).
- Camargo M., A., García C., J., & Flores A., E. (2020). *Matemáticas IV (Estadística Descriptiva e Inferencial)*. México: SUAyED.
- Carvajal Romero, H. T. (2022). Análisis de la gestión de los residuos sólidos urbanos en Europa. *Revista Universidad y Sociedad*, 402-415.
- Cubillo Betancourt, P. E. (Febrero de 2005). Ubicación del nuevo relleno sanitario en abse a criterios ambientales, socioeconomicos y técnicos, y propuesta de plan de reciclaje en la ciudad de Quero provincia de Tungurahua. Madrid: Facultad de Ingeniería Geográfica y del Medio Amambiente.
- DGEIA. (2017). Genreción de RSU por entidad federativa. Mexico: Dirección General de Estadística e Información Ambiental.
- Flores Tapia, C. E., & Flores Cevallos, C. L. (2021). Pruebas para comprobar la normalidad de datos en proceos productivos. (U. d. Pnamá, Ed.) *SOCIETAS*.
- Giusti, L. A. (2009). A review of waste management practices and their impact on human health. *Waste MAnagement* 29, 2227-2239.
- Jiménez Loya, M. I. (Diciembre de 2012). Diseño de botes-separadores de residuos sólidos para viviendas de interes social de la zona conurbada Veracruz - Boca del Rio - Medellín, México. Veracruz, México: Universidad Veracruzana.
- Law M., A. (2013). *Simulation modeling and analysis*. New York: McGraw Hill.
- Mendenhall, W., Beaver, T. J., & Beaver, B. M. (2010). *Introducción a la probabilidad y estadística* . CDMX: Cengage Learning Editores.
- Minitab. (2022). *Soporte de Minitab 21*. Obtenido de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/probability-distributions-random-data-and-resampling-analyses/supporting-topics/basics/continuous-and-discrete-probability-distributions/#:~:text=Con%20una%20distribuci%C3%B3n%20discreta%2C%20a>,
- Moras, C. (2021). *Simulación* . México.
- Rondón, e. a. (2016). *Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios*. Santiago, Chile: Publicación de las Naciones Unidas.
-

- Scudelati. (2020). *Scudelati y asociados*. Obtenido de <http://www.scudelati.com.ar/>
- SEMARNAT. (2020). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*. México.
- SIEGVER, S. d. (2021). *Cuadernillos Municipales*. Orizaba: Subsecretaría de Planeación.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., & Myers, S. L. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (9 ed.). México: PEARSON EDUCACIÓN.