

PROPUESTA DE UNA RUTA DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS
APROVECHABLES: CASO DE ESTUDIO EN EL MUNICIPIO DE MIRANDA,
CAUCA

DANIELA CASTAÑO ORTIZ
ERIKA MICHELLE JIMÉNEZ LOAIZA

UNIVERSIDAD DEL VALLE
SECCIONAL BUGA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
GUADALAJARA DE BUGA

2025

PROPUESTA DE UNA RUTA DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS
APROVECHABLES: CASO DE ESTUDIO EN EL MUNICIPIO DE MIRANDA,
CAUCA

DANIELA CASTAÑO ORTIZ
ERIKA MICHELLE JIMÉNEZ LOAIZA

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO INDUSTRIAL

DIRECTOR
ING. MAG. ÁLVARO JOSÉ TORRES PENAGOS

UNIVERSIDAD DEL VALLE
SECCIONAL BUGA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
GUADALAJARA DE BUGA

2025

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por brindarnos la salud, y la perseverancia necesaria para culminar esta etapa. A nuestros padres y familias, por su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y su confianza en nuestro proceso formativo que fue fundamental para alcanzar esta meta.

Expresamos nuestra gratitud al ingeniero Álvaro José Torres Penagos, director de este trabajo de grado, por su orientación académica.

A la Universidad del Valle y a cada uno de los docentes, por los conocimientos transmitidos y el acompañamiento a lo largo de nuestra formación profesional.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
3. OBJETIVOS.....	11
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
4. MARCO REFERENCIAL	11
5. CARACTERIZACIÓN DE LA RECOLECCIÓN ACTUAL	14
4.1. RESULTADOS PRINCIPALES	15
4.2. UBICACIÓN DE CLIENTES	18
4.3. GENERACIÓN DE RESIDUOS APROVECHABLES	19
4.4. UBICACIÓN DEL CENTRO DE ACOPIO.....	21
4.5. NÚMERO DE VEHÍCULOS Y CAPACIDAD.....	21
6. CLUSTERIZACIÓN	22
7. CREACIÓN DE RUTAS	23
6.1. ENTRADAS Y SALIDAS DE LOS CLÚSTERES.....	23
6.2. SELECCIÓN DEL MODELO DE RUTEO	24
6.3. RESULTADOS OBTENIDOS.....	27
8. ANÁLISIS DE ESCENARIOS.....	33
7.1. INGRESO SEGÚN COMPORTAMIENTO DE LA GENERACIÓN	34
7.2. AUMENTO DE LA GENERACIÓN DE RESIDUOS.....	35
7.3. EXTENSIÓN DE NUEVA ZONA POBLACIONAL	36
7.4. VARIACIÓN DEL NÚMERO DE RECICLADORES	38
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39
10. ANEXOS.....	45
ANEXO A. RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS.....	45
ANEXO B. FORMATO ENCUESTA DE CARACTERIZACIÓN REALIZADA A LOS RECUPERADORES.	47
ANEXO C. RESPUESTAS OBTENIDAS DE LA ENCUESTA DIRIGIDA A LOS RECUPERADORES.....	47
ANEXO D. CÓDIGO PARA LA CLUSTERIZACIÓN CON EL ALGORITMO K – MEANS	57
ANEXO E. CÓDIGOS IMPLEMENTADOS Y CÓDIGO BASE.	57
ANEXO F. RESULTADO DE LAS RUTAS.....	58
ANEXO G. GRAFOS DE LAS RUTAS.....	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Costos adicionales asociados a la disposición de los residuos mensualmente.....	8
Tabla 2. Generación de residuos por zona.	20
Tabla 3. Cuadro comparativo de problemas de ruteo.....	25
Tabla 4. Comparación número de calles por recuperador.	27
Tabla 5. Rutas de entradas y salidas del clúster 0.	29
Tabla 6. Rutas de entradas y salidas del clúster 1.	30
Tabla 7. Resultados principales de las rutas.....	31
Tabla 8. Ingreso según comportamiento de la generación.	34
Tabla 9. Aumento de la generación de residuos 0.....	35
Tabla 10. Tabla aumento de la generación de residuos 1.	35
Tabla 11. Generación por zonas.....	37
Tabla 12. Número de recicladores necesarios.....	37
Tabla 13. Variación de número de recicladores.	38

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ruta de recolección de residuos sólidos del lunes.....	15
Ilustración 2. Matriz FODA del proceso de recolección actual.....	18
Ilustración 3. Zonas para diferenciación de cantidad de generación.	20
Ilustración 4. División del municipio en 2 clústeres.	28
Ilustración 5. Ruta 0 del clúster 0.	33
Ilustración 6. Ruta 0 del clúster 1.	33

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es proponer una ruta de recolección de residuos aprovechables para el municipio de Miranda – Cauca, que contribuya a mejorar el proceso de acopio realizado actualmente por recicladores de oficio. Para ello, se estructuró una metodología en tres etapas: caracterización del proceso actual, diseño de rutas mediante algoritmos y modelo de ruteo y por último un análisis de escenarios.

En la primera fase se realizó un diagnóstico territorial y operativo mediante recorridos en campo junto a los recicladores, con el fin de identificar las zonas atendidas y la generación promedio por calle. Posteriormente, se georreferenciaron 676 puntos del municipio mediante ArcGIS Online, lo que permitió conformar una base de datos como las coordenadas de los nodos y calles para insumo del ruteo.

En la segunda fase se aplicó el algoritmo K-means para agrupar las calles en clústeres equilibrados, considerando la capacidad operativa de los recicladores y buscando distribuir equitativamente la carga de trabajo. Una vez definidos los clústeres, se seleccionaron los nodos representativos para aplicar el algoritmo de Dijkstra, permitiendo encontrar trayectos mínimos entre los subclústeres y el centro de acopio, considerando el sentido real de la vía principal del municipio.

La tercera fase correspondió al diseño de las rutas internas dentro de cada clúster, empleando el modelo del Cartero Chino (CPP), el cual permitió obtener un recorrido mínimo que garantizara la cobertura total de las calles asignadas. El proceso fue programado y ejecutado en Python, para definir las micro rutas por reciclador.

Finalmente, se desarrollaron diversos escenarios simulados que permitieron analizar la viabilidad del modelo ante variaciones en la generación de residuos, inclusión de nuevas zonas poblacionales y disminución del número de recicladores. Los resultados muestran que la propuesta permite una disminución del 39.6% del recorrido y, además; organizar el sistema de recolección, equilibrar el esfuerzo entre los recicladores, y mejorar las condiciones logísticas de acopio, al garantizar entregas directas al centro sin necesidad de almacenamiento domiciliario.

Palabras clave: *residuos aprovechables, rutas de recolección, K-means, Dijkstra, Cartero Chino, recicladores.*

1. INTRODUCCIÓN

La gestión adecuada de los residuos sólidos representa uno de los principales retos ambientales y logísticos, especialmente en aquellos lugares con estructuras organizativas informales en su sistema de recolección (Abarca-Guerrero et al., 2015). Este es el caso del municipio de Miranda – Cauca, donde la recolección de residuos aprovechables es realizada por recicladores de oficio que, aunque cumplen un rol fundamental en la recolección de material aprovechable, lo hacen sin rutas establecidas ni herramientas que orienten su labor de forma organizada.

La importancia de estructurar procesos adecuados para la gestión de residuos aprovechables radica no solo en los beneficios ambientales, como la reducción de materiales enviados a relleno sanitario lo que genera incremento en los costos de disposición final, sino también en el impacto social y económico que tiene para los recicladores; un sistema bien diseñado puede mejorar las condiciones laborales de este grupo, aumentar su productividad, disminuir su esfuerzo físico y contribuir a su formalización, alineándose con los planes locales de gestión de residuos.

Por ello, el presente trabajo tiene como propósito realizar una propuesta de rutas de recolección de residuos aprovechables para el municipio, dividida en diferentes fases y utilizando herramientas como la clusterización por K-means, el algoritmo de Dijkstra para la creación de trayectos más cortos y el modelo del Cartero Chino para la definición de rutas. Este enfoque permitirá estructurar un sistema más organizado y equitativo, adaptado a las condiciones reales del territorio y de los recicladores, sentando las bases para su formalización.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

EMMIR es la Empresa Municipal de Servicios Públicos Domiciliarios Industrial y Comercial de Miranda – Cauca, entre sus actividades principales se encuentra la gestión de residuos sólidos, para la cual realiza actividades de recolección y transporte. Según datos del plan de Gestión Integral de residuos sólidos (PGIRS), atiende a un total de 7.722 usuarios, se recolecta aproximadamente 312,62 Ton/mes de los cuales 264,77 Ton/mes son recolectados en la cabecera municipal y 47,85 Ton/mes son recolectados en la Zona plana; la disposición final de los residuos se realiza en Rozo Valle.

Asimismo, menciona que, de los residuos generados en el área urbana del municipio, un 34.3% son materiales que pueden reciclarse o reutilizarse como papel, vidrio, plástico y cartón; este porcentaje indica que una gran cantidad de residuos aprovechables se están destinando a la disposición final junto con los no aprovechables, lo que resulta en un aumento de los costos de disposición totales, ya que se aplican cargos por tonelada de residuos depositados en el relleno sanitario (ver tabla 1).

Tabla 1. Costos adicionales asociados a la disposición de los residuos mensualmente.

Descripción	Medida	Tarifa	Cantidad	Valor Total
		Unitaria		
Disposición final	Ton	\$ 29.122,79	114,41	\$ 3.331.938
Incentivo REG R. S	Ton	\$ 8.004,00	114,41	\$ 915.738
Estación de transferencia	Ton	\$ 62.372,00	114,41	\$ 7.135.981
Incentivo REG ET	Ton	\$ 266,79	114,41	\$ 30.523
Tratamiento lixiviado	Ton	\$ 5.095,54	114,41	\$ 582.981
Estación de peaje (CIAT)	Viaje	\$ 13.400,00	20	\$ 268.000
Total				\$ 12.265.161

Fuente: Elaboración propia con base en información suministrada por la empresa EMMIR.

Según la información suministrada por la empresa la disposición final de residuos aprovechables genera costos significativos, no obstante, en la actualidad se cuenta con la

recolección de residuos por parte de recicladores, con lo cual se busca mitigar esta situación de subutilización de residuos aprovechables. En este contexto, la actividad de recolección de residuos aprovechables lo realizan 13 recicladores particulares no formalizados, que venden estos materiales en cualquiera de los 6 centros de acopio existentes en el municipio, donde también son revendidos posteriormente. El medio de transporte más utilizado por los recicladores según los resultados de la encuesta realizada por la empresa es el triciclo con un 42%, lo cual es común en municipios pequeños, como se observa en ciudades más grandes como Cali, Bogotá, Buenaventura, entre otras, donde estos vehículos también se utilizan para recorrer áreas específicas como comunas o localidades; por ende, resulta apropiado adaptar dicha modalidad.

Para el proceso de recolección no existe una organización por parte de los involucrados, lo que ocasiona diferentes problemas como el no aprovechamiento de la totalidad producida de desechos de este tipo, mayor esfuerzo físico, uso ineficiente del tiempo y conflictos internos evidenciados por la definición de zonas y diferencias entre los tiempos de recorridos de los recicladores. Además, representa una pérdida del beneficio económico adicional que podría implicarles en vista de que sólo recolectan un 2,3%.

Además, la falta de una ruta selectiva limita la capacidad de los recicladores de oficio para formalizar su actividad y mejorar sus condiciones laborales e ingresos, tal como lo establece el Decreto 596 de 2016. Esta situación no solo afecta a los recicladores, sino que también representa una oportunidad desaprovechada para impulsar la economía circular y la sostenibilidad ambiental en el municipio. Según Stahel (1994), el reciclaje emerge como un componente esencial en la transición de una economía lineal a una economía circular, que a su vez es fundamental para lograr la sostenibilidad.

En el marco del PGIRS elaborado por la empresa en el año 2023, se propuso la implementación de la ruta selectiva de residuos aprovechables, este proyecto fue aprobado y respaldado por la administración municipal; por lo que, la realización de dicha ruta no solo es una necesidad identificada a partir de los datos y el análisis de los costos asociados a la disposición final de los residuos, sino que también es una acción necesaria y respaldada por el PGIRS.

En este contexto, se evidencia la necesidad de proponer una ruta selectiva de recolección de residuos aprovechables en el municipio de Miranda – Cauca. Esta iniciativa permitirá aprovechar de manera más eficiente los materiales reciclables, reducir los costos de disposición final para EMMIR, mejorar las condiciones laborales de los recicladores de oficio y promover una cultura ambiental responsable entre los habitantes del municipio.

La necesidad de proponer una ruta de recolección de residuos aprovechables ha sido evidente en diversos municipios del país. Un estudio realizado por Estefanía Cabrera y Juan Camilo Guerra (2010), la implementación de una ruta de recolección selectiva de residuos aprovechables en los barrios El Nogal y Jardín del Norte en Chiquinquirá mostró resultados notables debido a que se logró una mayor recolección y aprovechamiento de materiales como plástico, vidrio, cartón y papel. Además, se mejoró la eficiencia en la recolección y el transporte de estos residuos, se incrementó la participación comunitaria en la separación en la fuente y se integró a los recicladores informales, mejorando sus condiciones laborales e ingresos.

Los análisis realizados han revelado una disminución significativa en los costos totales al implementar una ruta selectiva para la recolección de residuos reciclables, como lo demuestra un estudio reciente realizado por Santana et al. (2020). Este estudio documenta una reducción del 44.5% en los costos totales, considerando aspectos como los costos operativos por kilómetro, los gastos asociados al destino final de los residuos por kilogramo, los costos laborales por hora y la duración total de las rutas.

De acuerdo con lo anterior, surge la siguiente pregunta:

¿Cuál debe ser la configuración de la ruta selectiva de recolección de residuos aprovechables en el municipio de Miranda – Cauca que mejore el proceso de acopio?

3. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Proponer una ruta selectiva de recolección de residuos aprovechables en el municipio de Miranda – Cauca que mejore el proceso de acopio.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el estado actual de la recolección de residuos aprovechables en el municipio de Miranda – Cauca.
- Formular un modelo que genere rutas de recolección de residuos aprovechables en el municipio.
- Analizar escenarios de la ruta considerando los datos del caso de estudio de Miranda.

4. MARCO REFERENCIAL

De acuerdo con el PGIRS de la ciudad de Cali (2004-2019), en Colombia solo al rededor del 13% de las 25.079 toneladas métricas diarias de residuos generadas se recuperan y reincorporan en el ciclo productivo, de este porcentaje aproximadamente el 7% ha sido recuperado por los recicladores de oficio, mientras que otro 6% se recupera mediante convenios directos con las industrias y/o comercio. Este proceso se lleva a cabo a través de las cadenas de reciclaje, que involucran a diversos actores, como los usuarios del servicio de aseo, los recicladores, la industria y el comercio, además de intermediarios con capacidad de almacenamiento y acondicionamiento de los materiales recuperados lo que refleja la complejidad de la gestión de residuos en Colombia y la importancia de considerar el papel de cada actor para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del proceso.

En un estudio realizado por Galindo & Sánchez (2021) denominado “Programa Periódico De Rutas De Recolección De Material Reciclable En Guadalajara de Buga, Para Una Empresa Recuperadora de Material Industrial” que se enfocó en diseñar un programa de rutas

periódicas para la recolección de material reciclable con el objetivo de reducir la distancia recorrida, abordando un problema de enrutamiento de vehículos. Se divide en tres fases: caracterización del proceso, simplificación del problema y desarrollo de una heurística en Python. La heurística aborda limitaciones de capacidad y periodicidad en la recolección, logrando una reducción de 5,65 km por semana en las distancias recorridas, es decir, un 6,66%. De manera que el diseño de las rutas podría disminuir las distancias actuales recorridas por los recicladores

En el trabajo de grado abordado por Roger (2014) se hizo uso de la dinámica de sistemas para optimizar la ruta de recolección de residuos sólidos en Tarapoto, Perú; la cual permitió conceptualizar, formular y evaluar de manera integral las rutas de recolección de residuos, facilitando un análisis detallado de las variables y las interacciones que influyen en la eficiencia de las operaciones.

De igual manera, en el estudio realizado por Barrera e Ibarra (2018), donde se plantea el diseño de rutas de recolección diferenciadas para distintos tipos de residuos, como las llantas usadas, mediante el uso de dinámica de sistemas, con el fin de facilitar la gestión y el manejo de estos desechos de acuerdo con normativas ambientales específicas.

Además, en el trabajo de grado elaborado por Guzmán & Arana (2015), se desarrolló un modelo de ruteo de vehículos para mejorar la recolección de residuos sólidos en Zarzal, Valle del Cauca, aplicando el algoritmo del cartero chino para minimizar la distancia total recorrida, se caracterizó el sistema vial, se analizaron las rutas actuales, y se programaron nuevas rutas utilizando el método de barrido y el modelo de pétalos para las macro rutas, y el Problema del Cartero Chino para las micro rutas, lo que dio como resultado la reducción significativa de la distancia recorrida y una mejora en el sistema de recolección.

En la investigación realizada en el municipio de Samacá, Boyacá, Colombia, donde se enfrenta un problema de mala planificación en las rutas de recolección de residuos sólidos, lo que provoca mayores distancias recorridas, altos costos y acumulación de residuos, para abordar este problema, se propuso un modelo logístico que utiliza programación lineal entera mixta basado en el problema del cartero chino, con el objetivo de optimizar las rutas de

recolección de residuos, obteniendo una reducción en la distancia total recorrida en un 23.45% en comparación con la situación actual y asegura que el vehículo recoja todos los residuos en los puntos de acopio asignados (Rodríguez & Ramírez, 2019).

En trabajo de grado desarrollado por Ramírez & Sinisterra (2023), se recopiló información sobre las estaciones de clasificación y acopio, se diseñó y programó un modelo de solución para el problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos (MDVRP), se estimó la demanda de residuos sólidos aprovechables, se generó una matriz de distancias utilizando el API de Google Maps y Python, y finalmente se obtuvieron rutas para la recolección semanal de residuos, con ello se logró mejorar la eficiencia del transporte de residuos sólidos en la ciudad, facilitando su gestión y contribuyendo a una mejor utilización de recursos y disminución de costos operativos.

Un estudio desarrollado por Pinto et al. (2018) en la ciudad de Río de Janeiro, Brasil, los autores abordan la implementación de la recolección selectiva de residuos en un contexto real. El estudio explora dos estrategias: primero, evaluar 15 escenarios con coberturas crecientes de recolección selectiva; segundo, analizar el impacto económico y operacional de dicha expansión. Entre los hallazgos más relevantes se destaca que, aunque algunas rutas generaron un mayor kilometraje total, el costo promedio por cliente disminuyó considerablemente, lo que refleja una mejora en la eficiencia del sistema.

En la literatura revisada se identifican similitudes en la estructura metodológica que siguen, ya que empiezan con una caracterización del sistema actual, seguida del diseño de las rutas optimizadas y finalizan con la evaluación de los beneficios operativos que miden a través de la reducción de distancia recorrida, tiempo de operación o costos asociados.

Sin embargo, no consideran la formalización ni la dimensión social y económica de los recicladores, lo cual representa una oportunidad de aporte diferencial en este trabajo.

Para el desarrollo de este proyecto, se tiene como base los siguientes conceptos y herramientas:

Residuos aprovechables

Un residuo aprovechable es cualquier material, objeto, sustancia o elemento sólido que ha sido descartado por la actividad que lo generó, pero que puede recuperar su valor a través del aprovechamiento (Decreto 1077, 2015).

Aprovechamiento de residuos sólidos

El aprovechamiento de estos recursos comprende desde la recolección de los residuos aprovechables que son separados, el transporte selectivo hasta la estación de clasificación o centros de acopio, así como la clasificación y posterior venta por parte de la persona prestadora (Decreto 1077, 2015).

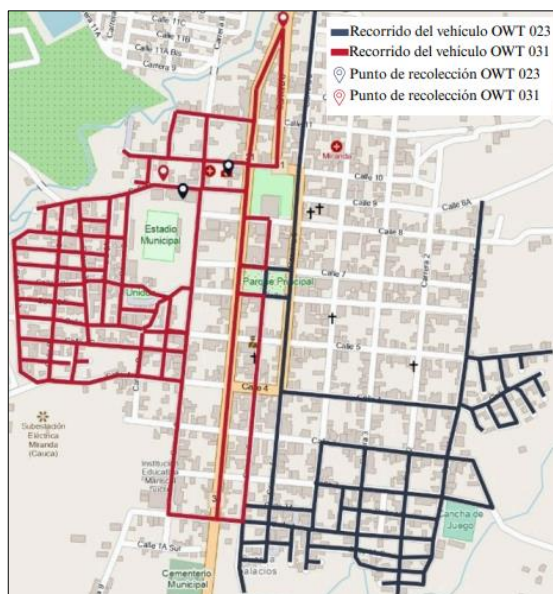
Modelos logísticos

La logística, como lo menciona Ballou en su libro la administración de la cadena de suministro planea y controla la información desde el origen hasta el punto de consumo, según los requerimientos de los clientes. Por su lado, los modelos logísticos buscan optimizar tiempos y/o distancias, con el objetivo de que las operaciones puedan ser efectivas (Ballou. 2004).

5. CARACTERIZACIÓN DE LA RECOLECCIÓN ACTUAL

El proceso de recolección de residuos en el municipio de Miranda se lleva a cabo actualmente mediante dos camiones que cubren todos los barrios en diferentes días de la semana. Con base en los datos proporcionados por la empresa EMMIR, se ha elaborado un gráfico de las rutas de recolección, la ilustración 1 muestra la ruta correspondiente a los lunes, mientras que las rutas de los demás días se encuentran en el **anexo A**.

Ilustración 1. Ruta de recolección de residuos sólidos del lunes.



Fuente: Elaboración propia basada en información suministrada por EMMIR.

Para comprender mejor el proceso que llevan a cabo los recicladores, se realizó un estudio de campo mediante encuestas (Ver **anexo B**) que arrojaron los siguientes resultados:

4.1. Resultados Principales

La encuesta aplicada a los recicladores permitió obtener información detallada sobre sus prácticas y las condiciones en las que operan, cabe resaltar que se obtuvo la respuesta de 7 de ellos (Ver **Anexo C**), lo que representa el 54% del total. A continuación, se exponen los principales hallazgos:

- *Frecuencia y días de recolección:* La mayoría de los recicladores realiza sus actividades de recolección entre lunes y sábado, cubriendo barrios específicos en diferentes días, se observó que el sábado es el día de mayor recolección con un 30%, seguido del lunes con un 20%, lo que indica que existe una mayor acumulación de residuos aprovechables en estos días.
- *Herramientas y/o equipos de recolección:* El 71% de los recicladores encuestados utilizan triciclos para transportar los residuos, mientras que otros usan carretillas o coches. El equipo de protección es limitado; la mayoría cuenta con guantes y

tapabocas, pero algunos indican que solo usan bolsas y costales sin protección adicional.

- Volúmenes de materiales recolectados: Recolectan entre 3 y 25 kg diarios de plástico, según su capacidad de transporte y las áreas cubiertas, de cartón recogen cantidades que varían entre 8 y 50 kg diarios; la recolección de vidrio está entre 3 y 8 kg, mientras que la de papel oscila entre 4 y 20 kg. Cabe resaltar, que estos datos serían el acumulado de la frecuencia de recolección semanal de la ruta que hace el camión 2 veces por semana en cada zona.
- Destinos y capacidad: Una vez finalizada la recolección, los recicladores retornan a sus hogares para acumular el material. Posteriormente, el 90% de ellos lo venden a un mismo centro de acopio del Municipio. La capacidad de carga de sus triciclos varía entre 100 y 300 kg.
- Condiciones del material y dificultades del proceso: Los recicladores indican que los materiales suelen estar sucios o contaminados, lo cual dificulta el proceso de recolección. Además, reportan problemas como la falta de separación de residuos en la fuente y conflictos con otros recicladores cuando coinciden en las mismas zonas, debido a la falta de organización y delimitación de áreas, generando competencia directa por los residuos disponibles.
- Percepción sobre la disponibilidad de material reciclable: El 86% de los encuestados considera que hay suficiente material reciclable en el municipio, también mencionan que el número actual de recicladores es insuficiente para cubrir todas las áreas de recolección de manera eficiente, algunos sugieren la necesidad de incorporar más recicladores para mejorar la cobertura y el aprovechamiento de los residuos disponibles.

Como parte del estudio, se realizó un seguimiento detallado a través de la observación directa de los recorridos de los recicladores, para comprender su modo de operación y las dificultades que enfrentan. Se evidenció que no siguen una ruta establecida, sino que ajustan su recorrido de acuerdo con las áreas donde el camión de residuos sólidos realizará su recolección ese día, pasando antes que este para seleccionar los aprovechables o recoger si las personas los han

separado; sin embargo, existen calles por donde suelen transitar con mayor frecuencia debido a la concentración de materiales aprovechables.

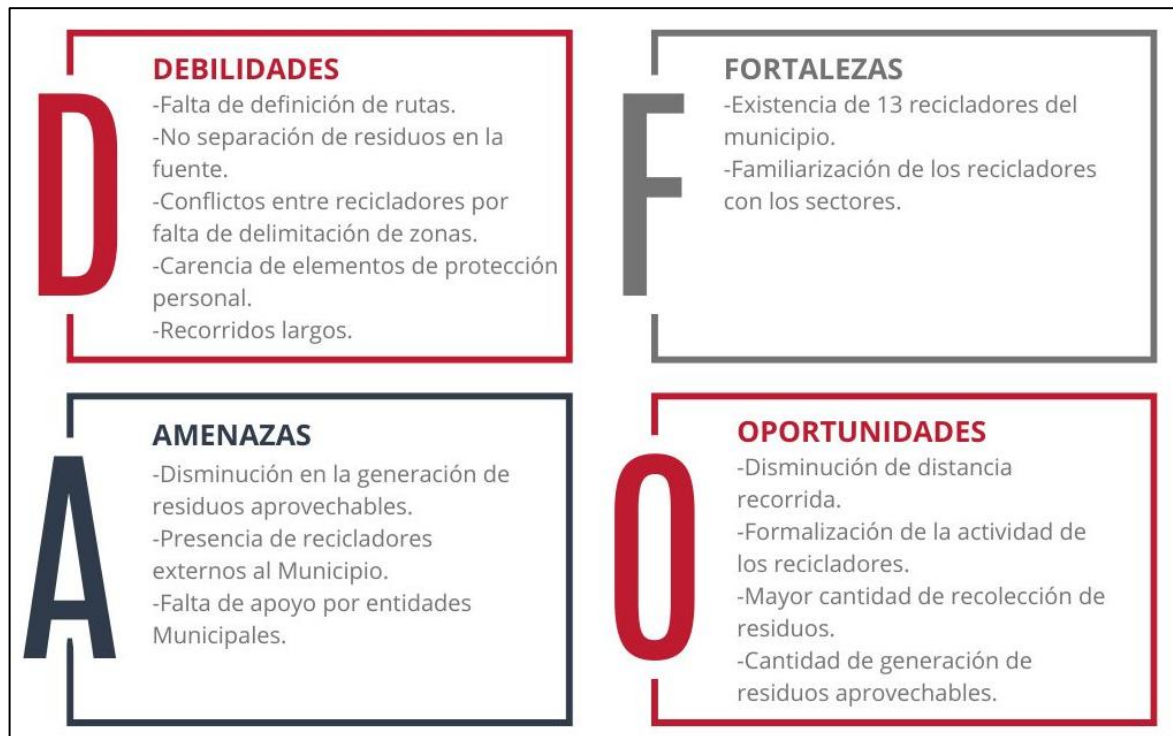
Esta falta de una ruta establecida genera problemas operativos, ya que en varias ocasiones un reciclador puede recorrer una calle donde otro ya ha pasado previamente, lo que ocasiona conflictos, desgaste físico innecesario y pérdida de tiempo. Además, se identificaron diversas dificultades en el recorrido, como calles de difícil acceso debido al mal estado de las vías, en algunas zonas, la congestión de espacios restringe el tránsito de triciclos y coches, afectando el proceso.

Otro aspecto relevante es la interacción con la comunidad, ya que se observó que la participación de los habitantes varía según el sector. En algunas áreas, las personas separan adecuadamente los residuos aprovechables, facilitando la labor de los recicladores; no obstante, en otras zonas no existe una cultura de separación, lo que dificulta la identificación y recuperación de materiales reciclables, aumentando la cantidad de residuos contaminados o inutilizables.

Cabe resaltar que actualmente los recicladores inician su jornada desde sus hogares y regresan con los materiales recolectados, acumulándolos hasta reunir una cantidad suficiente para su venta.

De acuerdo con lo anterior, se identificaron debilidades, fortalezas, amenazas y oportunidades utilizando como herramienta la matriz DOFA, teniendo en cuenta lo planteado por David Sánchez en su libro Análisis FODA O DAFO (ver ilustración 2).

Ilustración 2. Matriz FODA del proceso de recolección actual.



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se observó que los barrios el Espejuelo, la Arboleda, San Carlos y Piedra y Cielo no son visitados por los recuperadores con frecuencia, debido a su ubicación distante y baja densidad poblacional, lo que conlleva una menor generación de material recuperable. La inclusión de estas zonas representaría recorridos más extensos que no se justifican con la generación en las mismas y el esfuerzo requerido. Con esto, se priorizan las áreas con mayor concentración de residuos aprovechables.

Finalmente, para la ejecución de la metodología se recolectaron datos sobre ubicaciones, generaciones, entre otros que se plantean a continuación.

4.2. Ubicación de clientes

La ubicación de los clientes se estableció tomando como referencia el mapa del municipio de Miranda, mediante el uso del software ArcGIS Online, una herramienta de información

geográfica que permite acceder a datos espaciales, visualizar y crear mapas, así como realizar análisis de ubicación (Esri, s. f.), para este proceso se llevaron a cabo los siguientes pasos:

Primero, se identificaron y numeraron los nodos correspondientes a cada calle del municipio de Miranda, Cauca, directamente sobre el mapa digital, seguido de ello a cada nodo se le extrajeron las coordenadas geográficas (latitud y longitud) mediante el software mencionado, con el propósito de obtener la ubicación precisa que servirá de base para la realización de la ruta.

4.3. Generación de residuos aprovechables

Dado que no se contaba con datos ni registro sobre la generación por calle de residuos aprovechables en el municipio, fue necesario realizar el recorrido junto a algunos recicladores cubriendo distintas áreas del municipio. Para ello, se dividió el territorio en 4 zonas (ver **ilustración 3**):

- Zona 1: es la parte noreste del municipio, se caracteriza por ser en mayor parte zonas residenciales
- Zona 2: es el centro, caracterizado por tener diferentes tipos de comercios y el parque principal.
- Zona 3: La zona sur del municipio, mayormente zona residencial.
- Zona 4: Barrios en expansión

Ilustración 3. Zonas para diferenciación de cantidad de generación.



Fuente: Elaboración propia

Durante el recorrido con los recuperadores, se tomó el peso de la generación por calle, de manera que, para cada zona se obtuvo una generación promedio de materiales, que se encuentran en la tabla 2:

Tabla 2. Generación de residuos por zona.

ZONA	GENERACIÓN PROMEDIO kg/2día	# VÍAS	GEN ZONA
1	3,14	232	727,4
2	3,66	116	424,9
3	2,25	177	398,9
4	2,50	152	380,0
GEN TOT			1931,1

Fuente: Elaboración propia.

Es importante resaltar que estos datos están sujetos a variaciones temporales, influenciadas por factores como la frecuencia de recolección, los hábitos de disposición de residuos por parte de los habitantes, y cambios en la demanda dependiendo el día de la recolección, no obstante, esta naturaleza estocástica es propia de los estudios de campo fundamentados en la observación directa; sin embargo, para efectos de este estudio, se asume una baja variabilidad

permitiendo analizar tendencias representativas. Tal como lo menciona Hernández (2014), en investigaciones la información obtenida refleja una situación concreta en un momento determinado y aunque no se puede generalizar del todo, sí permite entender mejor el problema y tomar decisiones informadas basadas en esa observación.

4.4. Ubicación del centro de acopio

La definición del centro de acopio se llevó a cabo teniendo en cuenta lo especificado en el PGIRS, donde al realizar la ruta de recolección de residuos aprovechables se busca a su vez "implementar un centro de acopio con las condiciones necesarias para el cargue, descargue, pesaje, clasificación, limpieza o lavado, de los materiales reciclados, el cual permita su distribución para una posterior transformación". Adicionalmente, se consideró la información suministrada por la empresa EMMIR, la cual indicó que a través de un estudio previo, se seleccionó la ubicación del centro de acopio, cumpliendo con las especificaciones técnicas requeridas, como un área mayor a 150 m^2 y en cuanto a su localización, esta no genera afectaciones a la población circundante, en cumplimiento de lo establecido en la resolución 754 de 2014 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, que establece los lineamientos para la formulación de los (PGIRS).

4.5. Número de vehículos y capacidad

Tal como se ha mencionado, en el municipio de Miranda existen 13 recicladores informales, quienes en su mayoría se movilizan en triciclos. Sin embargo, no todos cuentan con este mismo medio de transporte, y algunos disponen de vehículos con capacidad limitada, en el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) se plantea que, al diseñar una ruta de recolección, lo ideal es dotar a todos los recicladores de triciclos especiales para la recolección de residuos aprovechables, lo que busca garantizar condiciones equitativas entre los recicladores y reducir el impacto ambiental asociado al uso de vehículos recolectores.

Con base en lo anterior, se asumió que los 13 recicladores disponen de triciclos con capacidad uniforme y para sustentar este supuesto, se llevó a cabo una revisión de vehículos comúnmente utilizados en procesos de recolección de residuos aprovechables y como

resultado de esta investigación, se estableció una capacidad de referencia de 100 kilogramos, valor que presentan triciclos diseñados específicamente para actividades de reciclaje.

6. CLUSTERIZACIÓN

Dado que el caso en estudio involucra una gran cantidad de nodos (676), los cuales corresponden a los cruces viales del municipio, y considerando tanto la capacidad limitada de los recicladores como la posible magnitud de los recorridos, se optó por aplicar una técnica de clusterización y para ello se utilizó el algoritmo de agrupamiento K-means, el cual busca dividir un conjunto de datos en k clústeres, donde cada punto pertenece al grupo cuyo centroide (centro del clúster) esté más cercano; el método funciona de manera iterativa, ajustando los centroides para minimizar la suma de las distancias cuadradas entre los puntos y su centro asignado (Müller & Guido, 2016). Este modelo, se formula matemáticamente de la siguiente manera:

Conjunto de puntos: x_j

Conjunto de puntos asignados al clúster i : S

Número de clústeres: k

Centroide: μ_i

Función objetivo:

$$\min_s E(\mu_i) = \min_s \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} \|x_j - \mu_i\|^2 \quad (1)$$

Restricción:

$$\frac{\partial E}{\partial \mu_i} = 0 \rightarrow \mu_i^{(t+1)} = \frac{1}{|S_i^{(t)}|} \sum_{x_j \in S_i^{(t)}} x_j \quad (2)$$

La fórmula (2) asegura la actualización del centroide.

Para la definición de los clústeres mediante el algoritmo K-means se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- Primero, se calcularon las coordenadas (latitud y longitud) correspondientes al punto medio de cada calle, determinado a partir de los nodos que se identificaron previamente durante la ubicación de los clientes y estas coordenadas son los puntos de referencia que alimenta el proceso de agrupamiento.
- Posteriormente, utilizando el lenguaje de programación Python en Google Colab, se importó la librería Sklearn.cluster la cual incluye diferentes algoritmos de clustering entre ellos K- means, según lo mencionado por Müller & Guido (2016) en su libro Introduction to machine learning with Python. El procedimiento del algoritmo K-Means puede consultarse en el **anexo D**.
- Finalmente, se realizó la agrupación ajustando el valor de k (número de clústeres) con base en dos criterios: la cantidad de calles asignadas a los recicladores y la frecuencia de recolección establecida, con el fin de garantizar que la planificación responda adecuadamente a la demanda del municipio.

7. CREACIÓN DE RUTAS

6.1. Entradas y salidas de los clústeres

Con el objetivo de reducir la distancia y asimismo el esfuerzo de los recicladores, se busca que la ruta que realicen desde el centro de acopio al clúster sea la mínima posible. Para esto, el algoritmo de Dijkstra fue clave para determinar las rutas de entrada y salida.

Dijkstra funciona encontrando el camino más corto desde un nodo inicial evaluando los posibles caminos y acumulando su costo (en este caso la distancia) hasta el nodo de destino (Cormen T. et al, 2009).

Con lo que se menciona en el párrafo anterior, lo que se debe tener en cuenta para aplicar el algoritmo de Dijkstra son los siguientes pasos, planteados por Alonso (2008):

- Paso 1: Inicialización, asigna a cada nodo una distancia provisional. El origen recibe distancia 0 y los demás reciben ∞ (o un valor muy grande).

- Paso 2: Cola de prioridad, se utiliza para seleccionar el nodo no procesado con la menor distancia provisional en cada iteración.
- Paso 3: Selección y marcado, se extrae el nodo con menor distancia de la cola y se marca como visitado.
- Paso 4: Relajamiento de aristas, para cada vecino del nodo actual, se calcula una distancia tentativa sumando la distancia conocida hasta el nodo actual con el costo del trayecto hacia el vecino. Si esta nueva distancia resulta ser menor que la que se tenía registrada para ese vecino, se actualiza con el nuevo valor. Luego, el vecino se agrega (o actualiza) en la cola de prioridad para ser evaluado más adelante.
- Paso 5: Repetición, el proceso se repite hasta que todos los nodos han sido procesados o se ha alcanzado el destino deseado

En este caso, se evaluaron las vías de acceso desde el C.A hasta cada uno de los clústeres, y se analizaron algunos de sus nodos para determinar cuál sería el mejor punto de inicio en términos de la distancia de llegada a él.

Para definir los nodos representativos de cada clúster, se evaluó la distancia de llegada a cada uno y se eligió aquel con la menor distancia y para los casos donde las distancias de entrada y salida de los nodos eran diferentes, se calculó un promedio entre ambas y se seleccionó el nodo con el valor más bajo. Para mayor detalle el algoritmo implementado del Dijkstra se encuentra en el **anexo E**.

6.2. Selección del modelo de ruteo

Con el objetivo de identificar el modelo matemático que se adapte a las características del problema, se llevó a cabo una revisión de literatura sobre los modelos comúnmente aplicados en la optimización de rutas y a partir de esta revisión, se construyó un cuadro comparativo con los más representativos, lo que permitió realizar un análisis más claro y justificado en cuanto a la elección del modelo.

Tabla 3. Cuadro comparativo de problemas de ruteo.

Modelo	Características Principales	Ventajas	Limitaciones
Vehicle Routing Problem (VRP)	El VRP es un problema clásico de optimización combinatoria que tiene como objetivo determinar el conjunto óptimo de rutas para una flota de vehículos que deben atender a un conjunto de clientes desde un centro de distribución, minimizando la distancia total recorrida o el costo asociado. Fue planteado por primera vez por Dantzig y Ramser en 1959, como una extensión del TSP (Traveling Salesman Problem) (Campos Aucejo, s.f.). Existen múltiples variantes del VRP que consideran restricciones adicionales como ventanas de tiempo, múltiples depósitos, capacidades de	Permite minimizar la distancia recorrida, mejora los tiempos de servicio y se puede adaptar a casos reales utilizando sus variantes.	Pertenece al grupo de problemas considerados NP-HARD, debido a que a medida que el problema crece en tamaño, el tiempo para encontrar una solución óptima, es mayor y las soluciones exactas son inviables (Claudia Arcetti et al., 2011).
Traveling Salesman Problem (TSP)	El TSP consiste en encontrar la ruta más corta posible que permite a un vendedor visitar una vez cada uno de los clientes (nodos) y regresar al punto de inicio, minimizando la distancia o el costo total del recorrido, es uno de los problemas fundamentales en la teoría de grafos y la optimización combinatoria (Campos Aucejo, s.f.). Además, es considerado la base sobre la cual se construyen modelos más complejos como el VRP.	Su formulación matemática es clara, permitiendo abordar el problema con modelos exactos siempre y cuando sean instancias pequeñas. Es útil para comprender la estructura de problemas de ruteo más complejos y se usa ampliamente como punto de partida para validar algoritmos heurísticos y metaheurísticos.	Al igual que el VRP, el TSP es considerado un problema NP-HARD y aunque es útil para rutas individuales, no contempla restricciones como la capacidad del vehículo ni múltiples vehículos, tampoco es aplicable directamente a problemas logísticos reales que requieren atención simultánea a múltiples clientes y vehículos (Suárez Rincón et al., 2020).
Chinese Postman Problem (CPP)	El CPP formulado en 1962 es un modelo clásico de optimización que busca encontrar el recorrido de mínima distancia que recorra todas las aristas de una red al menos una vez, es utilizado cuando es necesario cubrir todas las calles o caminos, como en la recolección de residuos, entrega postal, o limpieza urbana (Pineda-Y., 2015).	Tiene como objetivo minimizar la distancia recorrida, garantizando la cobertura total de la red (calles), utilizado comúnmente para servicios de recolección y residuos. Además, si existe un circuito euleriano el CPP ofrece una solución óptima.	El modelo del Cartero Chino no contempla restricciones de capacidad de los vehículos, lo que lo hace poco adecuado para situaciones donde los recursos de transporte tienen límites definidos, no optimiza la asignación de rutas cuando se cuenta con múltiples vehículos, a menos que se combine con otros modelos complementarios.
Arc Routing Problem (ARP)	Es una variante del CPP en la que solo algunos arcos (calles) requieren ser atendidos, se utiliza cuando se debe cubrir una parte específica de la red, como barrido de calles específicas o recogida en ciertos sectores; su formulación fue desarrollada principalmente por Golden y Wong (1981).	Permite reducir el recorrido al centrarse únicamente en calles con demanda, lo que lo hace más eficiente en ciertos contextos. Es más flexible que el CPP.	Su implementación requiere conocer con precisión cuáles aristas deben ser atendidas, asimismo tiene mayor complejidad en la solución y diseño de rutas óptimas (Pineda-Y., 2015).

Fuente: Elaboración propia con fuentes de investigación.

Para la realización de las rutas de recolección de residuos aprovechables, se requería un modelo que garantizara el recorrido completo de todas las calles asignadas a cada clúster, ya que el objetivo del servicio es cubrir la totalidad de la red vial en cada zona. En este sentido, el Problema del Cartero Chino (CPP) resulta ser el más adecuado, dado que su propósito es encontrar la ruta de mínima distancia que recorra todas las aristas (calles) al menos una vez (Pineda-Y., 2015), debido a que a diferencia de modelos como el Traveling Salesman Problem (TSP), que se enfoca en visitar nodos sin garantizar cobertura total de aristas, o el Vehicle Routing Problem (VRP), centrado en optimizar la atención a clientes desde un depósito, el CPP responde mejor a las características del problema de recolección.

En cuanto a las restricciones de capacidad, si bien el CPP no las contempla, estas ya habían sido consideradas en la etapa de clusterización mediante el algoritmo K-Means, debido a que se garantizó que la asignación de nodos a cada clúster respetara la capacidad de carga de los triciclos, asegurando así que la demanda pudiera ser cubierta sin excederla; por ende, no se hace necesario utilizar modelos más complejos que incluyan restricciones de capacidad.

Formulación Matemática Para el CPP tomada de Sökmen et al. (2019).

Variables y parámetros:

n = número total de nodos

V = el conjunto de nodos i, j

E = el conjunto de arcos o calles

x_{ij} = Variable de decisión, si se recorre el arco desde el nodo i hasta el nodo j

0 si no, 1 si sí

x_{ji} = Variable de decisión, si se recorre el arco desde el nodo j hasta el nodo i

C_{ij} = Distancia transversal desde el nodo i hasta el j

Función objetivo:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeta a las restricciones:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1}^n x_{ji} = 0 \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \forall i \in V \quad (2)$$

$$x_{ij} + x_{ji} \geq 1 \quad \forall (i, j) \in E \quad (3)$$

$$x_{ij}, x_{ji} \geq 0 \text{ and integer} \quad (4)$$

La función objetivo (1) busca minimizar la distancia recorrida la suma total de todas las calles que se recorrerán, la restricción (2) es de conservación de flujo, asegura que si entra también salga, la (3) que el total de calles sea recorrido al menos una vez en cualquiera de los dos sentidos, ya que con esto se cumpliría el propósito sin necesidad de que vuelva por la misma calle. Finalmente, la ecuación (4) busca que las variables tengan sentido.

Para la implementación de este modelo se utilizó como herramienta Python a través del entorno de desarrollo VS Code, con un código (Ver **anexo E**) enfocado en la transformación del grafo a grado par duplicando aristas y emparejando los nodos con ruta de menor costo con ayuda de Dijkstra. Después, se aplica el algoritmo de Fleury para calcular tours

eulerianos, ya que para el CPP esto es equivalente a hallar un circuito de costo mínimo (Pérez, 2014).

6.3. Resultados obtenidos

Respecto a la clusterización, para definir el k se realizó un análisis sobre el número de clústeres que se adaptara mejor al caso, este se encuentra en la **tabla 4** cuyos resultados se analizan a continuación.

En un primer momento, se evaluó con un valor de k igual a cinco, considerando la frecuencia de recolección diaria que actualmente llevan a cabo los recicladores, para así mantenerla sin modificaciones, asignando un clúster distinto a cada día. Sin embargo, el número de calles que tendría cada reciclador, de manera equitativa, no es significativa. Esto supondría que dependiendo de la zona del municipio podría recoger solamente 22 kilos en toda la ruta y esto generaría una ganancia muy por debajo del salario mínimo diario.

Lo anterior, también sucede con 4 y 3 clústeres, en el que aún con 17 calles en cada clúster la recolección podría no generar la ganancia que se espera.

Por esto, teniendo un $k=2$ se garantiza que la cantidad de residuos aprovechables que genere este conjunto de calles sea significativa, y que se mantenga un equilibrio entre que no tengan asignados recorridos muy largos, pero a su vez puedan recoger una cantidad de material adecuada, lo que finalmente les conlleve un ingreso económico digno.

Tabla 4. Comparación número de calles por recuperador.

	5 CLÚSTER	4 CLÚSTER	3 CLÚSTER	2 CLÚSTER
Nº	#calles/recup	#calles/recup	#calles/recup	#calles/recup
0	10	13	17	26
1	10	13	17	26
2	10	13	17	26
3	10	13	17	26
4	10	13	17	26

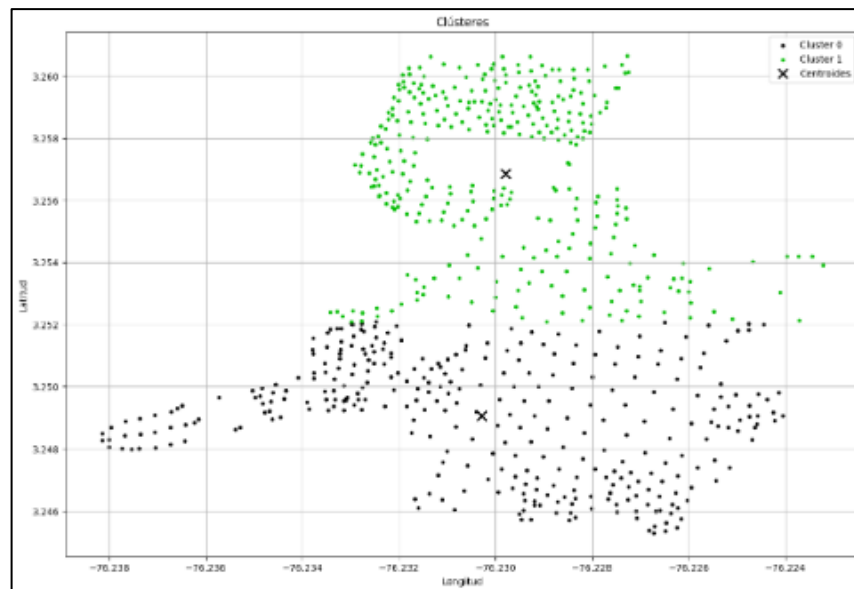
Fuente: Elaboración propia.

Cabe resaltar que el análisis anterior, se hizo teniendo en cuenta la capacidad de cada reciclador, de manera que debía recoger una cantidad significativa pero que no tuviera un recorrido muy largo y que no exceda la capacidad de cada uno.

Una vez definido el número de clústeres, se determina que la actividad de recolección se realizará 3 veces por semana en cada uno de ellos. Lo anterior porque la frecuencia permite que se atienda en su totalidad la generación de aprovechables estimada y respetando la capacidad de cada uno de los recolectores. Para la asignación de responsabilidades individuales, se subdividió cada clúster en 13 utilizando nuevamente el algoritmo K-means; estos subgrupos fueron conformados de manera equitativa, procurando que cada uno tuviera un número similar de calles, con el fin de garantizar una distribución justa del trabajo. Así, tanto para el clúster 0 como para el clúster 1 se generaron 13 subclústeres en cada uno, compuestos aproximadamente por 26 calles, siendo la base para la creación de las micro rutas.

Según lo anterior, se ejecutó el código obteniendo como resultado los siguientes conjuntos de calles (ver **ilustración 5**).

***Ilustración 4.** División del municipio en 2 clústeres.*



Fuente: Elaboración propia en Python con el algoritmo K-Means.

Tras la definición y segmentación de los clústeres mediante el algoritmo K-means, se procedió a evaluar los posibles nodos de entrada y salida al centro de acopio, con el objetivo de identificar el camino más corto y para ello, se implementó el algoritmo de Dijkstra. Antes de su ejecución, se tuvo en cuenta el sentido de las vías, especialmente en una de las calles principales del municipio, ya que a pesar de que, dentro de los clústeres la mayoría de las calles no presentan restricciones de dirección, esta consideración resulta clave al momento de ingresar o salir de ellos. Cabe resaltar que, con el objetivo garantizar que los recicladores partan y regresen al mismo punto, el nodo de entrada y de salida debe ser el mismo; por esta razón, en los casos en que el resultado del algoritmo de Dijkstra arrojaba un nodo de salida diferente al de entrada, se compararon las distancias totales de cada recorrido y se seleccionó la opción con menor longitud.

En la tabla 5 y 6, se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 5. Rutas de entradas y salidas del clúster 0.

CLÚSTER GRANDE 0		
Sub - Clúster	Ruta Entrada	Ruta Salida
0.0	278 , 279, 280, 281, 284, 285, 286, 258, 236, 203, 204, 205, 162, 148, 336, 92, 63, 53, 35, 34, 33, 325, 32, 31, 328, 30	30 , 328, 31, 32, 325, 42, 50, 60, 89, 151, 159, 208, 215, 230, 239, 238, 237, 236, 258, 286, 285, 284, 281, 280, 279, 278
0.1	278 , 279, 280, 281, 284, 285, 286, 258, 236, 203, 204, 205, 162, 148, 336, 92, 63, 53, 35	35 , 53, 63, 92, 336, 148, 162, 205, 204, 203, 236, 258, 286, 285, 284, 283, 282, 278
0.2	278 , 279, 280, 281, 284, 285, 286, 258, 236, 203, 204, 205, 162, 148, 336, 92	92 , 336, 148, 162, 205, 204, 203, 236, 258, 286, 285, 284, 281, 280, 279, 278
0.3	278 , 279, 280, 281, 284, 285, 286, 258, 236, 203, 204, 205, 162, 148, 336, 92, 63, 62, 61, 60	60 , 61, 62, 63, 92, 336, 148, 162, 205, 204, 203, 236, 258, 286, 285, 284, 281, 280, 279, 278
0.4	278 , 279, 280, 281, 284, 285, 286, 258, 236, 203, 204, 205, 162, 148, 336, 92, 91, 90, 89, 88, 87	87 , 153, 157, 210, 217, 228, 241, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 286, 285, 284, 281, 280, 279, 278
0.5	278 , 279, 280, 281, 284, 285, 286, 258, 236, 203, 204, 205, 162, 148, 336, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99	99 , 98, 97, 96, 95, 94, 93, 92, 336, 148, 162, 205, 204, 203, 236, 258, 286, 285, 284, 281, 280, 279, 278
0.6	278 , 279, 280, 281, 284, 285, 286, 258, 236, 203, 204, 205, 162, 148	148 , 162, 205, 204, 203, 236, 258, 286, 285, 284, 281, 280, 279, 278

0.7	278 , 282, 283, 284, 285, 286, 258, 236, 203, 204, 205, 162, 148, 336, 92, 93, 94, 95, 96, 97	97 , 96, 95, 94, 93, 92, 336, 148, 162, 205, 204, 203, 236, 258, 286, 285, 284, 283, 282, 278
0.8	278 , 279, 280, 281, 284, 285, 286, 258, 236, 203, 204, 205, 162, 148, 147	147 , 148, 162, 205, 204, 203, 236, 258, 286, 285, 284, 281, 280, 279, 278
0.9	278 , 279, 280, 281, 284, 285, 286, 258, 236, 203, 204, 213, 214, 215, 216	216 , 229, 240, 254, 255, 256, 257, 258, 286, 285, 284, 281, 280, 279, 278
0.10	278 , 285, 286, 258, 236	236 , 258, 286, 285, 278
0.11	278 , 279, 280, 281, 284, 285, 286, 258, 236, 203, 339, 198, 197, 192, 188, 186	278 , 279, 280, 281, 284, 285, 286, 258, 236, 203, 339, 198, 197, 192, 188, 186
0.12	278 , 279, 280, 281, 284, 285, 286, 258, 236, 203, 204	204 , 203, 236, 258, 286, 285, 284, 281, 280, 279, 278

Fuente: Elaboración propia en Python con el algoritmo Dijkstra.

Tabla 6. Rutas de entradas y salidas del clúster 1.

CLÚSTER GRANDE 1		
Sub - Clúster	Ruta Entrada	Ruta Salida
1.0	278 , 279, 280, 281, 284, 285, 286, 258, 257	257 , 258, 286, 285, 284, 281, 280, 279, 278
1.1	278 , 282, 283, 284, 285, 286	286 , 285, 284, 283, 282, 278
1.2	278 , 279, 280, 281, 284, 285, 286, 258, 257, 256, 255, 254, 253	253 , 254, 255, 256, 257, 258, 286, 285, 284, 281, 280, 279, 278
1.3	278 , 279, 280, 281, 284, 285, 286, 258, 257, 256, 263, 276, 345	345 , 264, 257, 258, 286, 285, 284, 281, 280, 279, 278
1.4	278 , 279	279 , 278
1.5	278	278
1.6	278 , 282, 293, 300, 299	299 , 300, 293, 282, 278
1.7	278 , 282, 293, 300, 312, 313, 318, 319	319 , 318, 313, 312, 300, 293, 282, 278
1.8	278 , 282, 293, 300, 316, 358, 357, 356, 355, 354	354 , 355, 356, 357, 358, 316, 300, 293, 282, 278
1.9	278 , 282, 293, 300, 316, 358, 357, 374, 376	376 , 374, 357, 358, 316, 300, 293, 282, 278
1.10	278 , 282, 293, 300, 316, 358, 357, 356, 355, 354, 353, 352, 386, 385, 402	402 , 385, 386, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 316, 300, 293, 282, 278
1.11	278 , 282, 293, 300, 312, 317, 359, 360, 368	368 , 360, 359, 317, 312, 300, 293, 282, 278
1.12	278 , 282, 293, 300, 316, 358, 357, 374, 372, 411	411 , 372, 374, 357, 358, 316, 300, 293, 282, 278

Fuente: Elaboración propia en Python con el algoritmo Dijkstra.

Los resultados obtenidos, además de considerar el sentido vial de una de las principales calles del municipio lo cual es fundamental para garantizar rutas viables y seguras, también al seleccionar el nodo con menor distancia al centro de acopio, se logra reducir el recorrido total, no solo disminuyendo el tiempo de desplazamiento, sino que también reduce el desgaste físico de los recicladores, al evitar trayectos innecesarios o más largos, favoreciendo así una mejor operación.

Con todo lo anterior ya definido, el siguiente y último paso consiste en resolver el modelo del Problema del Cartero Chino (CPP), con el fin de determinar las micro rutas definitivas para cada recolector, junto con sus respectivas distancias.

En las ilustraciones 6 y 7 se encuentran los resultados para los clústeres 0.0 y 1.0; y en el **anexo F** y el **anexo G** se pueden ver las demás rutas con el menor recorrido que generó el modelo. En la siguiente tabla se anexa un resumen de estos resultados:

Tabla 7. Resultados principales de las rutas.

RECORRIDOS TOTALES		
	Clúster Grande 0	Clúster Grande 1
0	1803,95	2707,47
1	1927,42	2242,86
2	3152,06	3412,06
3	2568,00	3143,35
4	2495,41	1907,42
5	3131,02	3540,91
6	3231,01	1648,60
7	2374,34	2052,36
8	1429,84	1760,10
9	2899,38	1421,56
10	2737,00	2388,55
11	1594,37	2000,45
12	3139,97	2126,50
Promedio	2498,75	2334,78
Días de Recorrido	Lunes, miércoles, viernes	Martes, jueves, sábado

Fuente: Elaboración propia

El diseño de las rutas permitió establecer una organización territorial clara y equitativa para la recolección de residuos aprovechables en el municipio, debido a que la segmentación por clústeres distribuye de manera balanceada las calles entre los recicladores, facilitando así la planificación operativa y aunque no existe una ruta formal previa para realizar comparaciones directas, durante los recorridos realizados con algunos recicladores se evidenció que actualmente los trayectos son largos, desordenados y con una alta posibilidad de que varios recicladores pasen por las mismas calles, lo que no asegura una cobertura completa ni eficiente. Con la propuesta de rutas fijas y diferenciadas, se evita la excesiva duplicación de recorridos, se reduce el desgaste físico de los recicladores, se evitan conflictos entre ellos por la no delimitación de las zonas y se mejora el servicio. Además, la frecuencia de tres jornadas semanales por clúster responde tanto a la generación estimada como a la capacidad operativa de los recicladores, previniendo acumulaciones y mejorando el proceso de acopio en términos de orden, cobertura y eficiencia.

En los recorridos actuales, los recuperadores pueden transitar hasta 4 kilómetros por ruta, incluyendo el trayecto desde sus casas, sin garantía de que en todas las calles del recorrido logran recolectar material aprovechable. Con la implementación de las rutas propuestas podrían circular una distancia promedio de 2.4 km, lo que disminuiría en un 39.6% lo actual y sería mucho más probable que recorran calles diferenciadas a los demás recuperadores.

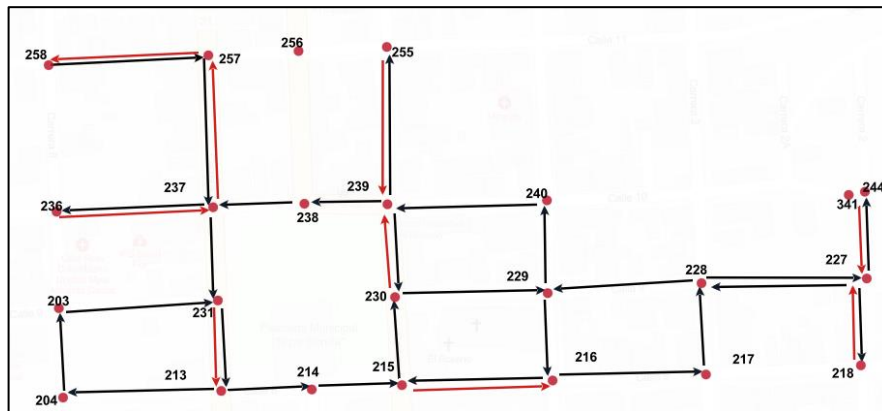
Respecto a los costos que le genera a la empresa de aseo la disposición de estos residuos, con esta propuesta podrían tener un ahorro de \$3.331.053 mensuales, debido a la disminución en los gastos por tonelada en el relleno sanitario, el tratamiento de los residuos, peajes, entre otros costos asociados.

Ilustración 5. Ruta 0 del clúster 0.



Fuente: Elaboración propia con ArcGis.

Ilustración 6. Ruta 0 del clúster 1.



Fuente: Elaboración propia con ArcGis.

8. ANÁLISIS DE ESCENARIOS

Con la propuesta de rutas realizada, se exploraron diferentes escenarios con el fin de evaluar su comportamiento en condiciones variables propias del contexto del Municipio, para ello, se simulaban situaciones como:

7.1. Ingreso según comportamiento de la generación

Para este primer escenario se realizó un análisis sobre la ganancia económica que tienen los recuperadores según la generación de material estimada, se tuvo como base el salario mínimo legal vigente para un día de trabajo y el precio de venta del papel, vidrio, cartón y plástico por kilo en el centro de acopio.

En la tabla 8 se encuentra la tabla que contiene los resultados, en esta se pudo observar que el clúster 0 grande es más sensible a cambios negativos de la demanda, ya que a partir de un decremento del 10% genera ingresos por debajo del SMLV; en contraste, el clúster 1 Grande es menos sensible y puede mantener por encima de esta cantidad hasta disminuciones de más del 20%.

Tabla 8. Ingreso según comportamiento de la generación.

Clústeres Pequeños													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
C0	\$47.677	\$47.677	\$47.677	\$47.677	\$47.677	\$53.408	\$47.677	\$52.891	\$52.891	\$62.581	\$53.351	\$52.891	\$60.057
C1	\$77.485	\$63.813	\$77.485	\$76.198	\$66.328	\$69.761	\$66.328	\$66.328	\$66.328	\$66.328	\$66.328	\$66.328	\$66.328
-10%													
C0	\$42.910	\$42.910	\$42.910	\$42.910	\$42.910	\$48.067	\$42.910	\$47.602	\$47.602	\$56.323	\$48.016	\$47.602	\$54.051
C1	\$69.737	\$57.432	\$69.737	\$68.578	\$59.695	\$62.785	\$59.695	\$59.695	\$59.695	\$59.695	\$59.695	\$59.695	\$59.695
-20%													
C0	\$38.142	\$38.142	\$38.142	\$38.142	\$38.142	\$42.726	\$38.142	\$42.313	\$42.313	\$50.065	\$42.681	\$42.313	\$48.046
C1	\$61.988	\$51.050	\$61.988	\$60.958	\$53.062	\$55.809	\$53.062	\$53.062	\$53.062	\$53.062	\$53.062	\$53.062	\$53.062
-30%													
C0	\$34.804	\$34.804	\$34.804	\$34.804	\$34.804	\$38.988	\$34.804	\$38.610	\$38.610	\$45.684	\$38.946	\$38.610	\$43.842
C1	\$56.564	\$46.583	\$56.564	\$55.624	\$48.419	\$50.925	\$48.419	\$48.419	\$48.419	\$48.419	\$48.419	\$48.419	\$48.419

Fuente: Elaboración propia.

Este análisis estudia la viabilidad económica del proyecto para los recicladores, ya que identificar la sensibilidad a las variaciones de generación puede ayudar a que los recuperadores mantengan ingresos justos y sostenible, lo cual es uno de los factores más importantes de esta actividad.

7.2. Aumento de la generación de residuos

En este escenario se simuló un aumento gradual en la cantidad de residuos aprovechables, partiendo desde un incremento del 10%, 20%,30% y así sucesivamente, con el objetivo de identificar hasta qué punto se superaba la capacidad de los triciclos, lo anterior para cada uno de los clústeres tal y como se puede observar en las tablas 9 y 10.

Tabla 9. Aumento de la generación de residuos 0.

Clúster P	Generación	CLÚSTER 0							
		+10%	+20%	+30%	+40%	+50%	+60%	+70%	+80%
0	58,59	64,45	70,31	76,17	82,030	87,889	93,749	99,608	105,467
1	58,59	64,45	70,31	76,17	82,030	87,889	93,749	99,608	105,467
2	58,59	64,45	70,31	76,17	82,030	87,889	93,749	99,608	105,467
3	58,59	64,45	70,31	76,17	82,030	87,889	93,749	99,608	105,467
4	58,59	64,45	70,31	76,17	82,030	87,889	93,749	99,608	105,467
5	65,63	72,19	78,76	85,33	91,889	98,453	105,016	111,580	118,143
6	58,59	64,45	70,31	76,17	82,030	87,889	93,749	99,608	105,467
7	65,00	71,50	78,00	84,500	91,000	97,500	104,000	110,500	117,000
8	65,00	71,50	78,00	84,500	91,000	97,500	104,000	110,500	117,000
9	76,90	84,60	92,29	99,982	107,673	115,363	123,054	130,745	138,436
10	65,56	72,12	78,68	85,235	91,792	98,348	104,905	111,461	118,018
11	65,00	71,50	78,00	84,500	91,000	97,500	104,000	110,500	117,000
12	73,80	81,18	88,57	95,949	103,330	110,711	118,091	125,472	132,853

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Tabla aumento de la generación de residuos 1.

Clúster P	Generación	CLÚSTER 0							
		+10%	+20%	+30%	+40%	+50%	+60%	+70%	+80%
0	58,593	64,45	70,311	76,171	82,030	87,889	93,749	99,608	105,467
1	58,593	64,45	70,311	76,171	82,030	87,889	93,749	99,608	105,467
2	58,593	64,45	70,311	76,171	82,030	87,889	93,749	99,608	105,467
3	58,593	64,45	70,311	76,171	82,030	87,889	93,749	99,608	105,467
4	58,593	64,45	70,311	76,171	82,030	87,889	93,749	99,608	105,467
5	65,635	72,19	78,762	85,326	91,889	98,453	105,016	111,580	118,143
6	58,593	64,45	70,311	76,171	82,030	87,889	93,749	99,608	105,467
7	65,000	71,50	78,000	84,500	91,000	97,500	104,000	110,500	117,000
8	65,000	71,50	78,000	84,500	91,000	97,500	104,000	110,500	117,000

9	76,909	84,60	92,291	99,982	107,673	115,363	123,054	130,745	138,436
10	65,565	72,12	78,679	85,235	91,792	98,348	104,905	111,461	118,018
11	65,000	71,50	78,000	84,500	91,000	97,500	104,000	110,500	117,000
12	73,807	81,18	88,569	95,949	103,330	110,711	118,091	125,472	132,853

Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados se evidencia un comportamiento diferencial frente al aumento progresivo en la generación, en el clúster 0, la capacidad total de los vehículos logra sostener incrementos de hasta un 30% sin sobrepasar el límite en ningún subclúster; no obstante, a partir del 40% comienzan a presentarse excesos puntuales, y no es sino hasta el 80% cuando se supera la capacidad en todo el clúster. En contraste, el clúster 1 muestra una menor tolerancia al crecimiento de la demanda; desde una variación del 10% ya se observan sectores con sobrecarga, condición que se generaliza al 20% y que, al alcanzar el 30%, afecta a la totalidad de las áreas asignadas.

Este escenario permite identificar de manera anticipada los límites operativos del sistema de recolección actual y proyectar con mayor precisión la capacidad de respuesta ante un posible aumento en la generación de residuos, ofreciendo información clave para la toma de decisiones en la planificación futura, como la necesidad de aumentar la cantidad de recicladores, incorporar vehículos con mayor capacidad o rediseñar las rutas; evaluar esto resulta fundamental no solo para evitar el colapso operativo, sino también para garantizar la sostenibilidad del sistema de rutas propuestas a mediano y largo plazo.

7.3. Extensión de nueva zona poblacional

A partir del recorrido realizado con los recicladores, se identificaron ciertos barrios que no eran atendidos en la propuesta inicial. Estos sectores, más retirados y con baja densidad poblacional, presentan actualmente una baja generación de residuos. Sin embargo, por su condición de expansión urbana, se consideró pertinente incluirlos como una nueva zona (Zona 5) en este escenario.

Se estimó una generación más baja en comparación con las otras zonas (Ver **tabla 11**) y se identificaron 98 calles en total dentro de estos barrios, esto implica la reorganización del

modelo propuesto, debido a que, inicialmente se trabajaba con dos clústeres, pero con la inclusión de esta nueva zona, se propuso la creación de un tercer clúster.

Tabla 11. Generación por zonas.

ZONA	Generación Promedio kg/2día	Node Vías	Generación Zona
1	3,14	234	733,62
2	3,66	117	428,51
3	2,25	176	396,63
4	2,50	152	380,00
5	1,90	98	186,20
GEN. TOTAL			2124,96

Fuente: Elaboración propia.

A partir del criterio observado en los clústeres anteriores, donde cada reciclador atiende aproximadamente 26 calles, se estimó a partir de la simulación que serían necesarios al menos 4 recicladores adicionales para atender la nueva zona de forma proporcional a las demás (Ver **tabla 12**).

Tabla 12. Número de recicladores necesarios.

No Recuperadores	Recolección (kg)	N. de Vías
1	186,20	98
2	93,10	49
3	62,07	33
4	46,55	25

Fuente: Elaboración propia.

Este análisis es importante como ejercicio de anticipación y planificación, aunque actualmente la zona añadida no forma parte del sistema de recolección, su análisis permite proyectar cómo podría integrarse en el futuro de manera equilibrada. Evaluar su impacto en la distribución de rutas y la carga de trabajo por reciclador permite tomar decisiones informadas cuando el crecimiento poblacional y la generación de residuos en estos barrios lo justifiquen.

7.4. Variación del número de recicladores

Por último, se evalúa un escenario enfocado en la reducción del número de recicladores con el fin de identificar si es posible disminuir la cantidad de operarios sin comprometer la capacidad de recolección estimada en la ruta propuesta, esto con el fin de determinar planes de contingencia, por ejemplo, en situaciones donde uno o varios recicladores no puedan asistir a su jornada (Ver **tabla 13**).

Tabla 13. Variación de número de recicladores.

	N. de Recicladores			
	12	11	10	9
Cuadras Recorridas	28	31	34	38
Clúster 0 (Generación 902,10 kg/2 día)	75,18	82,01	90,21	100,23
Clúster 1 (Generación 1033,00 kg/2 día)	86,08	93,91	103,30	114,78
Clúster 0 (+10%)	82,69	90,21	99,23	110,26
Clúster 1 (+10%)	94,69	103,30	113,63	126,26
Clúster 0 (+20%)	90,21	98,41	108,25	120,28
Clúster 1 (+20%)	103,30	112,69	123,96	137,73
Clúster 0 (+50%)	112,76	123,01	135,31	150,35
Clúster 1 (+50%)	129,13	140,86	154,95	172,17

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que:

En el clúster 0, la generación total es de 902,10 kg cada dos días y con 10 recicladores, cada uno recogería aproximadamente 90,2 kg, lo cual se mantiene dentro del límite de capacidad (100 kg por reciclador). Sin embargo, con solo 9 recicladores, la carga individual supera el límite (100,23 kg), comprometiendo la eficiencia operativa.

En el clúster 1, con una generación total de 1033,00 kg, el sistema empieza a superar los límites incluso con 10 recicladores, donde cada uno tendría que recoger 103,3 kg, superando la capacidad estimada y para 9 recicladores, la carga por persona asciende a 114,8 kg, lo cual es insostenible sin afectar el rendimiento y la salud ocupacional.

Además, se evaluó la variabilidad en fechas en las que se pueda presentar un incremento en la generación, comparándolo también con el cambio en el número de recicladores. Se aumentó la demanda en un 10%, 20% y 50% y se observó que en el clúster 0 el sistema funciona hasta los 10 recicladores y el clúster hasta con 12 para el primer aumento; si sigue creciendo la generación y se ausentan mas recicladores, habría que pensar en un plan de contingencia para mitigar esta situación.

Este escenario permite concluir que, ante una reducción del número de recicladores, es posible mantener la operación eficiente hasta cierto punto sin exceder la capacidad asignada por subclúster; sin embargo, al reducir demasiado el personal, comienzan a evidenciarse sobrecargas que comprometen la recolección; no obstante, los resultados muestran que es factible disminuir hasta dos recicladores por clúster sin que se vea afectada la capacidad total, siempre y cuando se realicen ajustes adecuados en la asignación y diseño de las rutas. Por ello, se propone implementar un sistema de rotación con recicladores de apoyo, acompañado de un monitoreo periódico de la generación por clúster, que permita ajustar la asignación de rutas en tiempo real y mantener la operación dentro de los límites de capacidad sin comprometer la cobertura ni la eficiencia del servicio.

Finalmente, estos escenarios analizados permiten evidenciar la adaptabilidad de la propuesta de rutas ante posibles variaciones contextuales, como cambios en la generación de residuos, expansión territorial o fluctuaciones en el número de recicladores disponibles. La estructura del modelo diseñado, basada en clústeres equilibrados y rutas flexibles, demuestra ser viable tanto operativa como económicamente, ofreciendo una base sólida para su implementación y ajuste progresivo según la evolución del sistema de recolección en el municipio.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La zonificación del Municipio mediante el algoritmo K-Means permitió distribuir de forma equitativa las zonas de recolección, garantizando un balance en la carga de trabajo de los recicladores y respetando la capacidad de los triciclos. También, la elección del modelo del Cartero Chino (CPP) permitió generar rutas con la cobertura total de las calles asignadas, lo

cual es fundamental para asegurar que no se omitan puntos de recolección y se aprovechen al máximo los residuos.

La fase de caracterización fue fundamental para identificar las problemáticas clave del proceso de recolección informal, tales como la inexistencia de rutas definidas, la falta de separación en la fuente, los conflictos entre recicladores por la delimitación de zonas y el uso ineficiente del tiempo y el esfuerzo físico debido a recorridos largos y duplicados, este diagnóstico proporcionó la información necesaria para el diseño de un sistema más organizado y equitativo.

El modelo formulado, que empleó el algoritmo K-Means para agrupar los 676 puntos georreferenciados del municipio y el Problema del Cartero Chino para generar circuitos mínimos dentro de cada clúster, demostró su efectividad en la creación de rutas de recolección organizadas y balanceadas, esto permite una cobertura total de las calles asignadas, resultando en una disminución estimada del 39.6% en comparación con las prácticas informales actuales.

El análisis de escenarios confirmó la adaptabilidad del modelo de rutas propuesto ante diversas variaciones contextuales, incluyendo cambios en la generación de residuos, la posible inclusión de nuevas áreas poblacionales y fluctuaciones en el número de recicladores disponibles. Esto es crucial para anticipar desafíos, lo que refuerza la viabilidad de la propuesta y evolución futura.

La implementación de rutas de material aprovechable podría disminuir significativamente los costos operativos de la empresa de aseo del municipio (EMMIR), al reducir el volumen total de los residuos que se disponen en el relleno sanitario. Esta reducción no sólo representa beneficio económico, sino que también tendría un impacto ambiental positivo al minimizar los residuos sólidos generados.

Además, el implementar rutas que se recorran en medios alternativos como bicicleta o incluso caminando en vez de depender solamente de camiones recolectores, y la reducción de viajes que tendría que hacer el vehículo al vertedero contribuye a ser un municipio más sostenible al reducir la huella de carbono asociada al transporte.

Asimismo, tener rutas establecidas, podría promover la separación en la fuente, puesto que las personas tendrían claro qué días pasan los recuperadores por dichos materiales y los horarios concretos. Para esto, se recomienda que por parte de la empresa de aseo se brinden bolsas que se diferencien de las dispuestas para los residuos ordinarios, teniendo en cuenta lo estipulado en la resolución 2184 de 2019; la cual establece el código de colores para la separación de residuos en la fuente. Además, la empresa también podría brindar a la comunidad diferentes incentivos.

Lo anterior, facilitaría la labor de los recuperadores, disminuyendo los riesgos sanitarios al recolectar material más limpio y separado de los residuos ordinarios.

La estructuración de las rutas hacia un punto común, como el centro de acopio, representa una mejora significativa, debido a que permite que los recicladores dejen de almacenar residuos en sus viviendas, reduciendo riesgos sanitarios, pérdida de materiales y se promueve el orden operativo, condiciones más dignas de trabajo y una mejor comercialización de los materiales recolectados.

Se recomienda brindar capacitaciones a los recicladores, para que comprendan las rutas, el esquema de delimitación y así fortalecer la apropiación del proceso propuesto y reducir la resistencia al cambio. Además, explorar la posibilidad de establecer incentivos económicos y dotación de EPP.

Por último, se recomienda realizar una rotación periódica entre los diferentes sub-clústeres para que se garantice la equidad en las oportunidades de recolección e ingresos, ya que algunas zonas tienen mayor generación de material aprovechable. Esto permitiría que todos los recuperadores tengan acceso a sectores diferentes, promoviendo un sistema balanceado en términos económicos y operativos.

Para futuras investigaciones, se sugiere profundizar el estudio de la generación por calle de estos materiales que permita tener una estimación más precisa considerando variaciones en diferentes periodos de tiempo.

Agregando a lo anterior, se podría también realizar un análisis de costos tales como inversión, operativos y administrativos, desde la perspectiva de las entidades responsables,

ya sea la empresa EMMIR o la administración municipal. Esto con el fin de efectuar un análisis más robusto con el que se pueda evaluar la viabilidad de implementar este proyecto.

REFERENCIAS

- Abarca-Guerrero, L., Maas, G. G., & Hogland, W. (2015). Desafíos en la gestión de residuos sólidos para las ciudades de países en desarrollo. *Revista Tecnología en Marcha*, 28(2), 141–168. <https://doi.org/10.18845/TM.V28I2.2340>
- Alonso Revenga, J. M. (2008). *Flujo en Redes y Gestión de Proyectos. Teoría y Ejercicios Resueltos*. España: Netbiblo.
- Ballou, R. H. (2004). *Logística Administración de la cadena de suministro*. PEARSON Educación.
- Decreto Único Reglamentario 1077 de 2015 Nivel Nacional. (s.f.).
- Ecotriciclos. (s.f.). Ref. Argom – Triciclo ecológico para recicladores.
- Edmonds, J., & Johnson, E. L. (s.f.). Matching, Euler tours and the Chinese postman. University of Michigan.
- Emec, S. (2019). An overview of Chinese Postman Problem. Researchgate.
- Esri. (s. F.). Arcgis Online. <https://www.arcgis.com>
- Evaluación y Ajuste del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos PGIRS. (2004-2019). Santiago de Cali.
- (2022-2033). Formulación del plan de gestión integral de residuos sólidos (pgirs) municipio de miranda-cauca. Miranda-cauca.
- Franca, L. S., Ribeiro, G. M., & Chaves, G. D. (2019). The planning of selective collection in a real-life vehicle routing problem: A case in Rio de Janeiro. ELSEVIER.
- Galindo, d., & sánchez gallego, j. C. (2021). Programa periódico de rutas de recolección de material reciclable en guadalajara de buga, para una empresa recuperadora de material industrial.
- Henao guzmán, b., & piedrahita arana, j. (2015). Diseño de un modelo de ruteo de vehículos para la recolección de residuos sólidos en el municipio de zarzal valle del cauca. Zarzal.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill.
- Ibarra Vega, D., & Barrera Valbuena, L. (2018). *METODOLOGÍA BASADA EN SIG Y MODELAMIENTO PARA LA RECOLECCIÓN DE LLANTAS USADAS EN BOGOTÁ*.
- Martínez Hernández, R., & Romero, K. (s.f.). *La Economía Circular: un camino para alcanzar el desarrollo sustentable*.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2014). Resolución 754 de 2014.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). Resolución 2184 de 2019.
- Müller, A. C., & Guido, S. (s.f.). *Introduction to machine learning with Python*. Pdfdrive.

- Osorio Cabrera, e., & Guerra Rubio, j. C. (2010). Diseño e implementación a escala piloto de la ruta de recolección selectiva de los residuos sólidos aprovechables en los barrios el nogal y jardín norte del municipio de chiquinquirá. Bogotá.
- Román Ramírez, K., & Sinisterra Buitrago, V. (2023). Diseño de rutas de recolección de residuos sólidos aprovechables hacia estaciones de clasificación y aprovechamiento (ECA) en la ciudad de Pereira, Colombia, usando técnicas de optimización.
- Santana Franca, L., Mattos Ribeiro, G., & Diniz Chaves, G. (2019). The planning of selective collection in a real-life vehicle routing problem: A case in Rio de Janeiro. ELSEVIER.
- Segundo, R. (s.f.). Uso de la Dinámica de Sistemas Para Optimizar las Rutas de Recojo de Residuos Sólidos en el Distrito de Tarapoto.
- Silva Rodríguez, J., & Ramírez Gil , E. (2019). Modelo de recolección de residuos sólidos basados en el Problema del Cartero Chino.
- Sökmen, Özlem & Emeç, Şeyma & Yilmaz, Mustafa & Akkaya, Gökay. (2019). An Overview of Chinese Postman Problem.
- Ramírez & , Universidad de Chile. (s.f.). Grafos: Fundamentos y algoritmos.

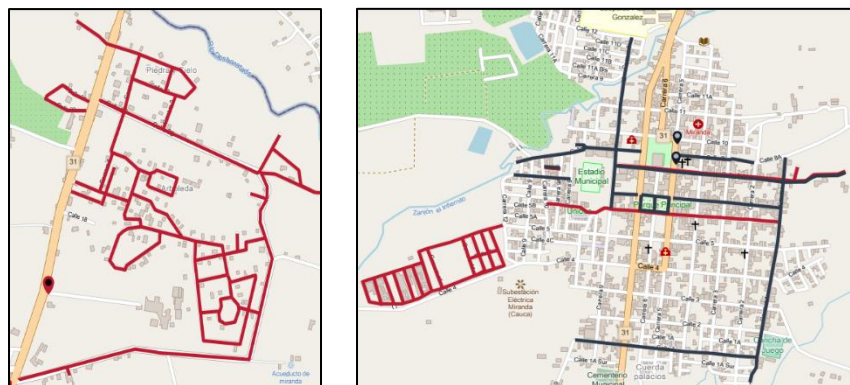
10. ANEXOS

Anexo A. Rutas de recolección de residuos sólidos.

Martes



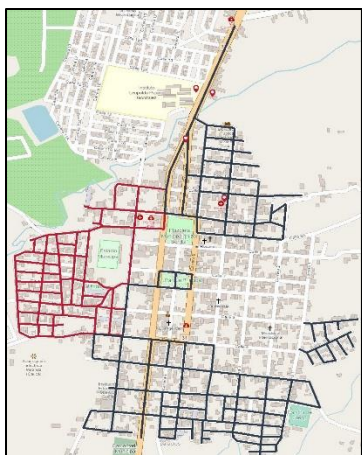
Miércoles



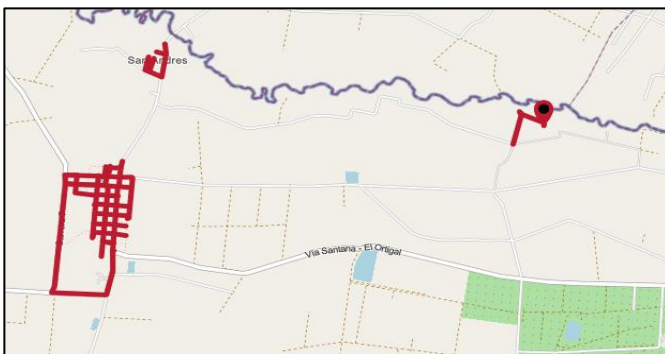
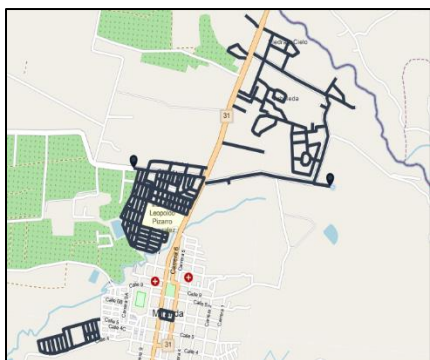
Jueves

El jueves no se lleva a cabo recolección de residuos en el Municipio debido a que se realiza mantenimiento a los vehículos.

Viernes



Sábado



Anexo B. Formato encuesta de caracterización realizada a los recuperadores.

ENCUESTA DE CARACTERIZACIÓN DE RECUPERADORES

Nombres y Apellidos: _____

Edad: ____

Género:

Femenino__

Masculino__

Otro. ¿Cuál? _____

Nivel Educativo:

Ninguno__

Primaria Incompleta__

Primaria Completa__

Secundaria Incompleta__

Secundaria Completa__

Superior Incompleta__

Superior Completa__

¿Cuánto tiempo dedica a la actividad? (Aproximadamente horas por día)

¿Cuáles son sus ingresos diarios por la actividad?

¿Cuáles son los gastos mensuales destinados para llevar a cabo la actividad?
(Mantenimiento, herramientas de protección, etc.)

¿En qué barrio reside?

Anexo C. Respuestas obtenidas de la encuesta dirigida a los recuperadores.

1.

Nombre y Apellido	Jader Toro
Edad	20
Genero	Masculino

Nivel Educativo	Superior
¿Cuánto tiempo dedica a la actividad? (Aproximadamente horas por día)	5
¿Cuáles son sus ingresos diarios por la actividad?	\$30.000
¿Cuáles son los gastos mensuales destinados para llevar a cabo la actividad? (Mantenimiento, herramientas de protección, etc.)	\$50.000
¿En qué barrio reside?	La cristiana
¿Qué herramientas o equipos utiliza para la recolección? (Puede seleccionar varios)	Triciclo, Guantes, Tapabocas, Bolsas
¿Qué días a la semana realiza la recolección?	Lunes, Martes, Miércoles, Viernes, Sábado
¿En qué días de la semana nota que se puede recolectar más material reciclable?	Lunes, Martes
¿Las personas suelen separar los residuos reciclables de los ordinarios?	Poco Frecuente
¿Qué cantidad de plástico recolecta diariamente? (en kilogramo)	9
¿Qué cantidad de cartón recolecta diariamente? (en kilogramo)	50
¿Qué cantidad de vidrio recolecta diariamente? (en kilogramo)	No aplica
¿Qué cantidad de papel recolecta diariamente? (en kilogramo)	20
¿Qué cantidad de metal recolecta diariamente? (en kilogramo)	5
¿Cuál es la capacidad de carga aproximada de su triciclo o carreta? (en kilogramos)	1000
¿Qué áreas o barrios cubre principalmente?	Todos
¿Cuáles son los puntos de destino de los residuos recolectados?	Centro de Acopio
¿En qué estado se encuentra generalmente el material que recolecta?	Sucio
¿Qué razones toma en cuenta para realizar el recorrido?	Hora de recolección de basura en el Municipio
¿Qué dificultades ha enfrentado realizando la recolección?	La no selección del material

¿Considera que hay suficiente material para reciclar en el Municipio?	Sí
Actualmente el Municipio cuenta con 10 recuperadores, ¿Considera que esta cantidad es apropiada?	No
Si su respuesta anterior fue "No", indique que cantidad de recuperadores considera necesaria.	20

2.

Nombre y Apellido	Blanca Dagua
Edad	56
Genero	Femenino
Nivel Educativo	Ninguno
¿Cuánto tiempo dedica a la actividad? (Aproximadamente horas por día)	6
¿Cuáles son sus ingresos diarios por la actividad?	\$30.000
¿Cuáles son los gastos mensuales destinados para llevar a cabo la actividad? (Mantenimiento, herramientas de protección, etc.)	\$20.000
¿En qué barrio reside?	La cristiana
¿Qué herramientas o equipos utiliza para la recolección? (Puede seleccionar varios)	Carretilla, Guantes, Bolsas
¿Qué días a la semana realiza la recolección?	Lunes, Miércoles, Viernes, Sábado, Domingo
¿En qué días de la semana nota que se puede recolectar más material reciclable?	Sábado, Domingo
¿Las personas suelen separar los residuos reciclables de los ordinarios?	Poco Frecuente
¿Qué cantidad de plástico recolecta diariamente? (en kilogramo)	25
¿Qué cantidad de cartón recolecta diariamente? (en kilogramo)	40
¿Qué cantidad de vidrio recolecta diariamente? (en kilogramo)	8
¿Qué cantidad de papel recolecta diariamente? (en kilogramo)	55

¿Qué cantidad de metal recolecta diariamente? (en kilogramo)	10
¿Cuál es la capacidad de carga aproximada de su triciclo o carreta? (en kilogramos)	500
¿Qué áreas o barrios cubre principalmente?	Todos
¿Cuáles son los puntos de destino de los residuos recolectados?	Chatarrería Padilla Ortigal
¿En qué estado se encuentra generalmente el material que recolecta?	Sucio
¿Qué razones toma en cuenta para realizar el recorrido?	Hora de recolección de basura en el Municipio
¿Qué dificultades ha enfrentado realizando la recolección?	Que no separan el material
¿Considera que hay suficiente material para reciclar en el Municipio?	Sí
Actualmente el Municipio cuenta con 10 recuperadores, ¿Considera que esta cantidad es apropiada?	Sí
Si su respuesta anterior fue "No", indique que cantidad de recuperadores considera necesaria.	-

3.

Nombre y Apellido	Alba Luz
Edad	59
Genero	Femenino
Nivel Educativo	Primaria Incompleta
¿Cuánto tiempo dedica a la actividad? (Aproximadamente horas por día)	4
¿Cuáles son sus ingresos diarios por la actividad?	30.000
¿Cuáles son los gastos mensuales destinados para llevar a cabo la actividad? (Mantenimiento, herramientas de protección, etc.)	20.000
¿En qué barrio reside?	Porvenir
¿Qué herramientas o equipos utiliza para la recolección? (Puede seleccionar varios)	Triciclo, Guantes, Bolsas, Costales
¿Qué días a la semana realiza la recolección?	Martes, Sábado

¿En qué días de la semana nota que se puede recolectar más material reciclable?	Sábado
¿Las personas suelen separar los residuos reciclables de los ordinarios?	Poco Frecuente
¿Qué cantidad de plástico recolecta diariamente? (en kilogramo)	8
¿Qué cantidad de cartón recolecta diariamente? (en kilogramo)	11
¿Qué cantidad de vidrio recolecta diariamente? (en kilogramo)	3
¿Qué cantidad de papel recolecta diariamente? (en kilogramo)	14
¿Qué cantidad de metal recolecta diariamente? (en kilogramo)	13
¿Cuál es la capacidad de carga aproximada de su triciclo o carreta? (en kilogramos)	400
¿Qué áreas o barrios cubre principalmente?	El porvenir y La cristiana
¿Cuáles son los puntos de destino de los residuos recolectados?	Centro de Acopio de Norbey
¿En qué estado se encuentra generalmente el material que recolecta?	Sucio
¿Qué razones toma en cuenta para realizar el recorrido?	Hora de recolección de basura en el Municipio
¿Qué dificultades ha enfrentado realizando la recolección?	Conflictos entre recuperadores cuando se encuentran y llegan de municipios vecinos a llevarse el reciclaje.
¿Considera que hay suficiente material para reciclar en el Municipio?	Si
Actualmente el Municipio cuenta con 10 recuperadores, ¿Considera que esta cantidad es apropiada?	Sí
Si su respuesta anterior fue "No", indique que cantidad de recuperadores considera necesaria.	-

4.

Nombre y Apellido	Yemny Yonda
Edad	46
Genero	Femenino
Nivel Educativo	Secundaria Completa
¿Cuánto tiempo dedica a la actividad? (Aproximadamente horas por día)	6
¿Cuáles son sus ingresos diarios por la actividad?	25.000
¿Cuáles son los gastos mensuales destinados para llevar a cabo la actividad? (Mantenimiento, herramientas de protección, etc.)	12.000
¿En qué barrio reside?	La Cristiana
¿Qué herramientas o equipos utiliza para la recolección? (Puede seleccionar varios)	Triciclo, Guantes, Tapabocas, Bolsas
¿Qué días a la semana realiza la recolección?	Lunes, Martes, Miércoles, Viernes, Sábado
¿En qué días de la semana nota que se puede recolectar más material reciclable?	Viernes
¿Las personas suelen separar los residuos reciclables de los ordinarios?	Poco Frecuente
¿Qué cantidad de plástico recolecta diariamente? (en kilogramo)	3
¿Qué cantidad de cartón recolecta diariamente? (en kilogramo)	8
¿Qué cantidad de vidrio recolecta diariamente? (en kilogramo)	0
¿Qué cantidad de papel recolecta diariamente? (en kilogramo)	4
¿Qué cantidad de metal recolecta diariamente? (en kilogramo)	3
¿Cuál es la capacidad de carga aproximada de su triciclo o carreta? (en kilogramos)	20
¿Qué áreas o barrios cubre principalmente?	La mayoría de barrios
¿Cuáles son los puntos de destino de los residuos recolectados?	Chatarrería de Arbey
¿En qué estado se encuentra generalmente el material que recolecta?	Sucio

¿Qué razones toma en cuenta para realizar el recorrido?	Mayor volumen generado por zona, Hora de recolección de basura en el Municipio
¿Qué dificultades ha enfrentado realizando la recolección?	Las personas no separan el material
¿Considera que hay suficiente material para reciclar en el Municipio?	No
Actualmente el Municipio cuenta con 10 recuperadores, ¿Considera que esta cantidad es apropiada?	No
Si su respuesta anterior fue "No", indique que cantidad de recuperadores considera necesaria.	6

5.

Nombre y Apellido	Nereida Yunda
Edad	45
Genero	Femenino
Nivel Educativo	Secundaria Completa
¿Cuánto tiempo dedica a la actividad? (Aproximadamente horas por día)	3
¿Cuáles son sus ingresos diarios por la actividad?	25.000
¿Cuáles son los gastos mensuales destinados para llevar a cabo la actividad? (Mantenimiento, herramientas de protección, etc.)	20.000
¿En qué barrio reside?	La Cristiana
¿Qué herramientas o equipos utiliza para la recolección? (Puede seleccionar varios)	Triciclo, Bolsas
¿Qué días a la semana realiza la recolección?	Lunes, Martes, Miércoles, Viernes, Sábado
¿En qué días de la semana nota que se puede recolectar más material reciclable?	Lunes, Martes
¿Las personas suelen separar los residuos reciclables de los ordinarios?	Poco Frecuente
¿Qué cantidad de plástico recolecta diariamente? (en kilogramo)	16

¿Qué cantidad de cartón recolecta diariamente? (en kilogramo)	8
¿Qué cantidad de vidrio recolecta diariamente? (en kilogramo)	No aplica
¿Qué cantidad de papel recolecta diariamente? (en kilogramo)	4
¿Qué cantidad de metal recolecta diariamente? (en kilogramo)	5
¿Cuál es la capacidad de carga aproximada de su triciclo o carreta? (en kilogramos)	50
¿Qué áreas o barrios cubre principalmente?	Cabaña, Quinta Porra, Colseguros, Colombiana
¿Cuáles son los puntos de destino de los residuos recolectados?	Centro de acopio de Norbey
¿En qué estado se encuentra generalmente el material que recolecta?	Contaminado
¿Qué razones toma en cuenta para realizar el recorrido?	Hora de recolección de basura en el Municipio
¿Qué dificultades ha enfrentado realizando la recolección?	La no separación de residuos
¿Considera que hay suficiente material para reciclar en el Municipio?	Si
Actualmente el Municipio cuenta con 10 recuperadores, ¿Considera que esta cantidad es apropiada?	No
Si su respuesta anterior fue "No", indique que cantidad de recuperadores considera necesaria.	15

6.

Nombre y Apellido	Maryurin Toro
Edad	24
Genero	Femenino
Nivel Educativo	Secundaria Completa
¿Cuánto tiempo dedica a la actividad? (Aproximadamente horas por día)	5
¿Cuáles son sus ingresos diarios por la actividad?	35.000

¿Cuáles son los gastos mensuales destinados para llevar a cabo la actividad? (Mantenimiento, herramientas de protección, etc.)	10.000
¿En qué barrio reside?	La Cristiana
¿Qué herramientas o equipos utiliza para la recolección? (Puede seleccionar varios)	Triciclo, Guantes, Bolsas
¿Qué días a la semana realiza la recolección?	Lunes, Martes, Miércoles, Jueves, Viernes, Sábado
¿En qué días de la semana nota que se puede recolectar más material reciclable?	Viernes
¿Las personas suelen separar los residuos reciclables de los ordinarios?	Poco Frecuente
¿Qué cantidad de plástico recolecta diariamente? (en kilogramo)	18
¿Qué cantidad de cartón recolecta diariamente? (en kilogramo)	7
¿Qué cantidad de vidrio recolecta diariamente? (en kilogramo)	7
¿Qué cantidad de papel recolecta diariamente? (en kilogramo)	14
¿Qué cantidad de metal recolecta diariamente? (en kilogramo)	5
¿Cuál es la capacidad de carga aproximada de su triciclo o carreta? (en kilogramos)	100
¿Qué áreas o barrios cubre principalmente?	Porvenir, cristiana, colombiana
¿Cuáles son los puntos de destino de los residuos recolectados?	Centro de Acopio de Norbey
¿En qué estado se encuentra generalmente el material que recolecta?	Sucio
¿Qué razones toma en cuenta para realizar el recorrido?	Hora de recolección de basura en el Municipio
¿Qué dificultades ha enfrentado realizando la recolección?	La no separación del material y encuentro con otros recuperadores en una misma zona, lo que causa conflictos

¿Considera que hay suficiente material para reciclar en el Municipio?	Si
Actualmente el Municipio cuenta con 10 recuperadores, ¿Considera que esta cantidad es apropiada?	No
Si su respuesta anterior fue "No", indique que cantidad de recuperadores considera necesaria.	18

7.

Nombre y Apellido	Dora Isabel
Edad	58
Genero	Femenino
Nivel Educativo	Primaria Completa
¿Cuánto tiempo dedica a la actividad? (Aproximadamente horas por día)	3
¿Cuáles son sus ingresos diarios por la actividad?	15.000
¿Cuáles son los gastos mensuales destinados para llevar a cabo la actividad? (Mantenimiento, herramientas de protección, etc.)	5.000
¿En qué barrio reside?	El Porvernir
¿Qué herramientas o equipos utiliza para la recolección? (Puede seleccionar varios)	Bolsas, Coche
¿Qué días a la semana realiza la recolección?	Viernes, Sábado
¿En qué días de la semana nota que se puede recolectar más material reciclable?	Sábado
¿Las personas suelen separar los residuos reciclables de los ordinarios?	Poco Frecuente
¿Qué cantidad de plástico recolecta diariamente? (en kilogramo)	5
¿Qué cantidad de cartón recolecta diariamente? (en kilogramo)	8
¿Qué cantidad de vidrio recolecta diariamente? (en kilogramo)	5

¿Qué cantidad de papel recolecta diariamente? (en kilogramo)	14
¿Qué cantidad de metal recolecta diariamente? (en kilogramo)	3
¿Cuál es la capacidad de carga aproximada de su triciclo o carreta? (en kilogramos)	50
¿Qué áreas o barrios cubre principalmente?	Cristiana, Porvenir
¿Cuáles son los puntos de destino de los residuos recolectados?	Centro de Acopio de Norbey
¿En qué estado se encuentra generalmente el material que recolecta?	Sucio
¿Qué razones toma en cuenta para realizar el recorrido?	Hora de recolección de basura en el Municipio
¿Qué dificultades ha enfrentado realizando la recolección?	Conflictos con otros recicladores cuando se cruzan en un mismo barrio
¿Considera que hay suficiente material para reciclar en el Municipio?	Si
Actualmente el Municipio cuenta con 10 recuperadores, ¿Considera que esta cantidad es apropiada?	No
Si su respuesta anterior fue "No", indique que cantidad de recuperadores considera necesaria.	15

Anexo D. Código para la clusterización con el algoritmo K – means

A continuación, se comparte enlace para la visualización del código en Google Colab:

<https://colab.research.google.com/drive/1PfZGbqp9C1NfJredWCLp-bshjrR-o3xS#scrollTo=SaqJFMDJe9rv>

Anexo E. Códigos implementados y código base.

A continuación, se comparte enlace para la visualización del código en Google Colab:

Clúster 0:

<https://colab.research.google.com/drive/1GhtJ6bv8rZ5pY3lZ7uaxLtNtFUqIkBIL#scrollTo=Uryz1jhWagrM>

Clúster 1:

https://colab.research.google.com/drive/19FW3Qeu03c0xpKGScnr7RJ_6LoT4oc2b#scrollTo=8SXXwDnGpaDK

El enlace del código utilizado para ejecutar el modelo del CPP es el siguiente:

<https://github.com/supermitch/Chinese-Postman>

Anexo F. Resultado de las rutas

CLÚSTER 0

Clúster 0-0

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
Finding pair solutions
(56 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 9 edges
Total cost is 1803.95
Attempting to solve Eulerian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<40> edges)
[1, 328, 31, 18, 13, 12, 13, 11, 13, 18, 10, 7, 6, 5, 2, 3, 400, 3, 4, 3, 6, 9, 8, 5, 8, 26, 27, 9, 10, 29, 28, 45, 38, 27, 38, 37, 26, 27, 28, 29, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 1-0

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(56 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 12 edges
Total cost is 1927.42
Attempting to solve Eulerian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<38> edges)
[1, 34, 33, 326, 42, 325, 32, 19, 14, 19, 20, 325, 42, 41, 328, 31, 18, 13, 18, 31, 32, 325, 33, 21, 16, 17, 16, 15, 327, 20, 327, 21, 33, 34, 1, 25, 22, 25, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 2-0

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(30 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 16 edges
Total cost is 3152.06
Attempting to solve Eulerian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<42> edges)
[1, 91, 62, 63, 64, 65, 64, 94, 64, 63, 53, 35, 36, 24, 25, 24, 36, 35, 53, 54, 53, 52, 51, 52, 34, 52, 62, 61, 60, 50, 42, 50, 49, 50, 51, 326, 51, 61, 90, 61, 62, 63, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 3-0

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(56 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 12 edges
Total cost is 2568.000000000001
Attempting to solve Eularian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<38> edges)
[1, 59, 58, 47, 329, 46, 38, 45, 39, 4, 39, 29, 39, 47, 58, 57, 46, 44, 43, 55, 43, 44, 56, 44, 37, 38, 45, 329, 47, 48, 40, 30, 40, 48, 49, 41, 49, 59, 1
]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 4-0

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(90 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 15 edges
Total cost is 2495.41
Attempting to solve Eularian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<44> edges)
[1, 86, 330, 77, 76, 70, 76, 75, 74, 75, 69, 68, 74, 82, 73, 67, 73, 72, 71, 72, 66, 72, 73, 82, 81, 79, 80, 79, 81, 83, 84, 83, 85, 77, 330, 56, 55, 56,
57, 86, 154, 86, 1, 58, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 5-0

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(30 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 12 edges
Total cost is 3231.0199999999995
Attempting to solve Eularian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<38> edges)
[1, 149, 150, 90, 150, 160, 150, 151, 152, 88, 87, 153, 157, 153, 154, 153, 152, 158, 159, 151, 89, 88, 59, 88, 89, 60, 89, 90, 91, 149, 161, 149, 1, 336,
92, 93, 92, 336, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 6-0

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(30 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 12 edges
Total cost is 3231.0199999999995
Attempting to solve Eularian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<38> edges)
[1, 149, 150, 90, 150, 160, 150, 151, 152, 88, 87, 153, 157, 153, 154, 153, 152, 158, 159, 151, 89, 88, 59, 88, 89, 60, 89, 90, 91, 149, 161, 149, 1, 336,
92, 93, 92, 336, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 7-0

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(56 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 18 edges
Total cost is 2374.34
Attempting to solve Eularian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<48> edges)
[1, 135, 134, 98, 99, 129, 130, 131, 133, 132, 128, 127, 124, 125, 122, 121, 120, 117, 114, 117, 118, 121, 120, 123, 126, 127, 124, 121, 118, 119, 116, 11
9, 122, 125, 128, 132, 133, 170, 133, 131, 130, 129, 99, 98, 97, 98, 134, 135, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 8-0

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(56 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 8 edges
Total cost is 1429.8400000000001
Attempting to solve Eularian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<35> edges)
[1, 146, 93, 94, 95, 96, 97, 135, 333, 136, 333, 334, 137, 334, 135, 334, 335, 138, 131, 130, 134, 335, 138, 137, 140, 141, 142, 141, 140, 145, 94, 93, 146, 1
45, 144, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 9-0

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(30 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 13 edges
Total cost is 2899.38
Attempting to solve Eularian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<40> edges)
[1, 209, 210, 157, 156, 211, 210, 217, 218, 211, 212, 219, 220, 221, 222, 223, 222, 221, 220, 224, 220, 219, 218, 211, 156, 155, 85, 83, 81, 79, 78, 79, 8
1, 83, 85, 154, 156, 157, 158, 209, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 10-0

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(90 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 18 edges
Total cost is 2737.9499999999994
Attempting to solve Eularian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<52> edges)
[1, 203, 204, 205, 162, 161, 160, 207, 160, 159, 160, 161, 162, 148, 147, 148, 336, 146, 147, 164, 165, 166, 144, 143, 142, 141, 168, 169, 170
, 171, 170, 169, 168, 141, 142, 175, 176, 167, 143, 144, 166, 165, 164, 338, 337, 338, 164, 163, 162, 205, 204, 203, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 11-0

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(56 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 11 edges
Total cost is 1594.3699999999994
Attempting to solve Eulerian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<34> edges)
[1, 185, 1, 201, 175, 174, 173, 172, 169, 139, 138, 139, 141, 139, 133, 131, 133, 139, 169, 168, 173, 174, 202, 177, 178, 179, 178, 171, 172,
177, 184, 177, 202, 201, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 12-0

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(12 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 23 edges
Total cost is 3130.97
Attempting to solve Eulerian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<55> edges)
[1, 205, 162, 163, 164, 338, 337, 176, 187, 188, 186, 188, 189, 190, 183, 194, 183, 182, 181, 180, 179, 184, 190, 184, 185, 189, 188, 192, 188
, 187, 176, 337, 338, 164, 163, 162, 205, 206, 207, 214, 207, 208, 215, 208, 209, 208, 159, 208, 207, 206, 161, 206, 213, 206, 205, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

CLÚSTER 1

Clúster 0-1

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(56 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 10 edges
Total cost is 2707.4700000000003
Attempting to solve Eulerian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<36> edges)
[1, 237, 236, 237, 231, 213, 204, 203, 231, 213, 214, 215, 230, 229, 216, 215, 216, 217, 228, 227, 218, 227, 244, 227, 228, 229, 240, 239, 230, 239, 255,
239, 238, 256, 238, 237, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 1-1

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(56 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 17 edges
Total cost is 2242.8600000000006
Attempting to solve Eulerian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<42> edges)
[1, 258, 259, 235, 234, 233, 232, 233, 234, 200, 199, 200, 339, 203, 339, 198, 197, 196, 195, 194, 193, 194, 195, 190, 183, 190, 195, 196, 191, 189, 191,
192, 197, 198, 339, 200, 234, 235, 236, 258, 257, 258, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 2-1

```
PROBLEMS  OUTPUT  DEBUG CONSOLE  TERMINAL  PORTS

(12 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 20 edges
Total cost is 3412.0599999999995
Attempting to solve Eulerian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<45> edges)
[1, 250, 1, 254, 240, 340, 242, 340, 241, 228, 241, 243, 342, 252, 342, 251, 249, 248, 247, 246, 245, 225, 226, 227, 226, 219, 226, 225, 245, 246, 247, 24
8, 249, 251, 244, 341, 243, 241, 253, 241, 340, 240, 254, 1, 260, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 3-1

```
PROBLEMS  OUTPUT  DEBUG CONSOLE  TERMINAL  PORTS

(90 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 18 edges
Total cost is 3143.3499999999995
Attempting to solve Eulerian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<46> edges)
[1, 264, 257, 258, 286, 287, 286, 285, 284, 285, 286, 258, 257, 256, 263, 276, 263, 262, 255, 262, 261, 260, 261, 266, 267, 262, 267, 270, 274, 270, 269,
268, 269, 343, 272, 343, 271, 343, 269, 266, 261, 254, 255, 256, 257, 264, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 4-1

```
PROBLEMS  OUTPUT  DEBUG CONSOLE  TERMINAL  PORTS

(56 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 11 edges
Total cost is 1907.4299999999998
Attempting to solve Eulerian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<38> edges)
[1, 283, 284, 291, 298, 297, 290, 285, 290, 289, 296, 295, 294, 295, 301, 302, 304, 302, 303, 301, 303, 308, 303, 296, 297, 296, 295, 288, 287, 288, 289,
286, 289, 290, 291, 284, 281, 280, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 5-1

```
PROBLEMS  OUTPUT  DEBUG CONSOLE  TERMINAL  PORTS

(30 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 25 edges
Total cost is 3540.9099999999994
Attempting to solve Eulerian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<58> edges)
[1, 282, 283, 284, 285, 286, 258, 257, 264, 345, 346, 347, 348, 394, 348, 349, 350, 351, 352, 351, 350, 349, 348, 347, 395, 347, 344, 277, 276, 277, 275,
274, 272, 273, 275, 277, 344, 347, 346, 345, 264, 257, 258, 286, 285, 284, 283, 292, 299, 292, 291, 292, 293, 300, 293, 282, 1, 279, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 6-1

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(56 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 10 edges
Total cost is 1648.6000000000001
Attempting to solve Eulerian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<36> edges)
[1, 300, 312, 300, 316, 317, 312, 318, 317, 318, 313, 311, 310, 314, 319, 314, 313, 314, 315, 307, 321, 307, 315, 320, 315, 306, 305, 31, 305, 304, 3
09, 311, 309, 308, 298, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 7-1

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(30 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 14 edges
Total cost is 2052.36
Attempting to solve Eulerian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<40> edges)
[1, 318, 360, 359, 370, 359, 358, 357, 374, 357, 356, 376, 356, 355, 356, 357, 358, 316, 358, 371, 358, 359, 317, 359, 360, 368, 360, 361, 323, 1, 323, 32
2, 324, 362, 363, 361, 324, 322, 321, 320, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 8-1

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(56 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 15 edges
Total cost is 1760.1000000000004
Attempting to solve Eulerian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<42> edges)
[1, 353, 1, 355, 379, 382, 384, 353, 352, 386, 385, 386, 388, 351, 388, 387, 388, 390, 392, 391, 392, 394, 393, 397, 396, 344, 396, 397, 395, 394, 392, 349, 3
92, 390, 350, 390, 389, 390, 388, 386, 384, 382, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 9-1

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(30 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 15 edges
Total cost is 1421.56
Attempting to solve Eulerian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<41> edges)
[1, 374, 372, 371, 369, 370, 368, 370, 369, 371, 372, 373, 375, 1, 375, 377, 378, 380, 403, 380, 381, 382, 381, 383, 385, 387, 389, 387, 385, 402, 401, 40
0, 401, 385, 383, 384, 383, 381, 380, 378, 379, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 10-1

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(90 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 21 edges
Total cost is 2388.549999999997
Attempting to solve Eulerian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<51> edges)
[1, 401, 400, 404, 431, 404, 400, 399, 398, 397, 396, 438, 440, 438, 396, 397, 393, 391, 389, 391, 393, 397, 398, 437, 439, 441, 439, 437, 434, 433, 432, 433, 434, 435, 436, 435, 434, 400, 401, 1, 405, 429, 427, 429, 428, 406, 407, 406, 405, 1, 403, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

Clúster 11-1

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(30 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 16 edges
Total cost is 2000.45
Attempting to solve Eulerian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<44> edges)
[1, 367, 414, 415, 416, 415, 418, 417, 416, 365, 362, 365, 366, 363, 366, 415, 366, 367, 414, 413, 419, 413, 412, 371, 372, 411, 410, 409, 408, 403, 408, 409, 377, 409, 410, 373, 410, 421, 410, 411, 372, 371, 369, 367, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

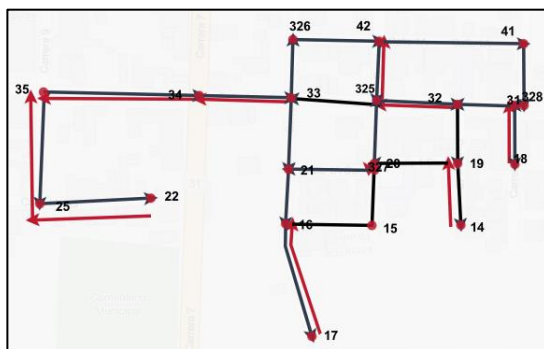
Clúster 12-1

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(12 solutions)
Building path sets
Finding cheapest route
Adding new edges
Conversion complete
Added 23 edges
Total cost is 2126.5
Attempting to solve Eulerian Circuit...
Solved in <1> attempts
Solution: (<50> edges)
[1, 420, 419, 418, 419, 450, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 408, 407, 425, 426, 427, 430, 446, 430, 431, 432, 436, 442, 441, 443, 440, 443, 441, 442, 445, 442, 436, 432, 431, 430, 427, 426, 428, 426, 425, 424, 423, 447, 423, 422, 409, 422, 421, 420, 1]
PS C:\Users\erika\Documents\TrabajoDeGrado\Chinese-Postman-master>
```

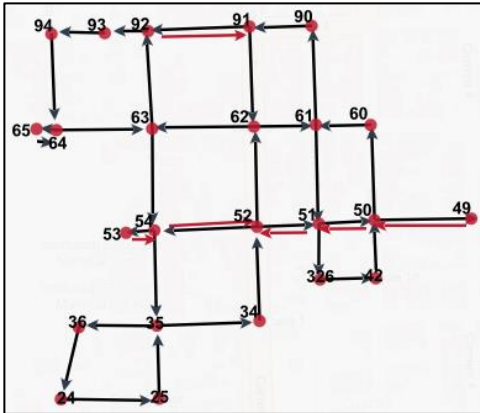
Anexo G. Grafos de las rutas

CLÚSTER 0

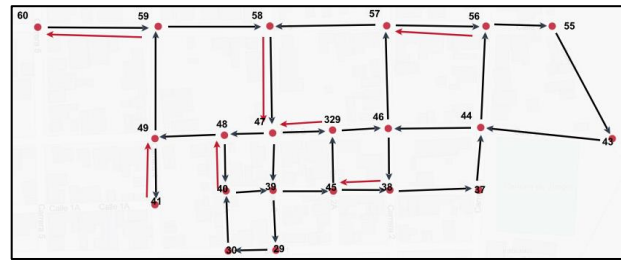
Clúster 0.1



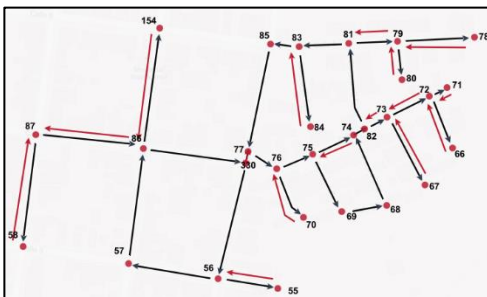
Clúster 0.2



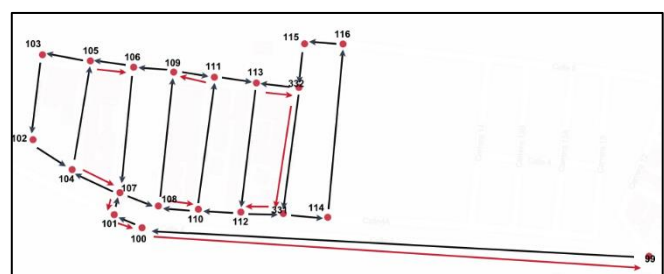
Clúster 0.3



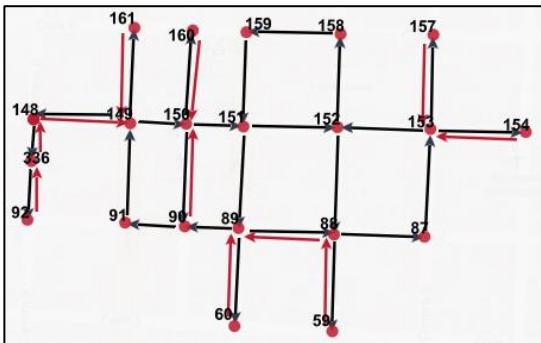
Clúster 0.4



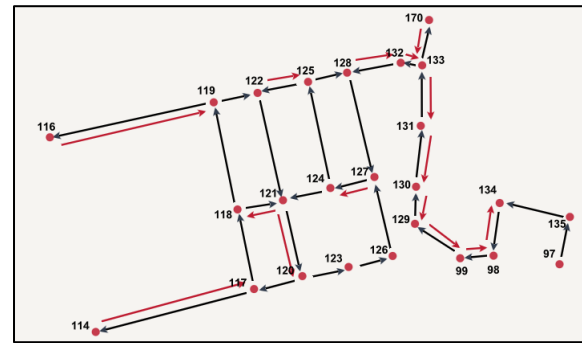
Clúster 0.5



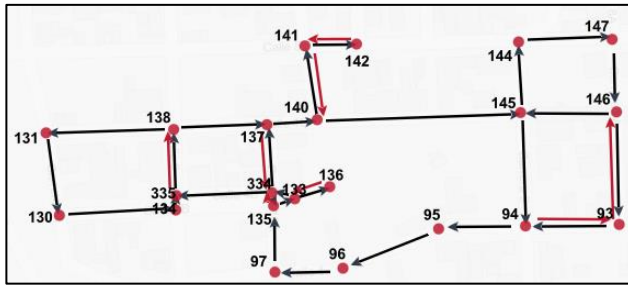
Clúster 0.6



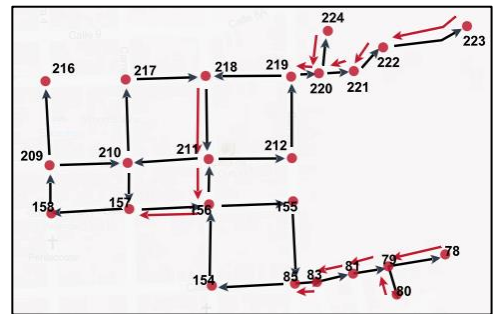
Clúster 0.7



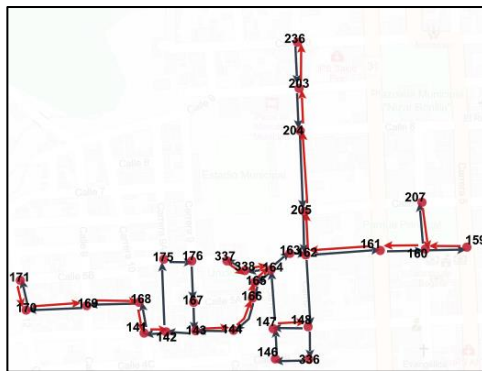
Clúster 0.8



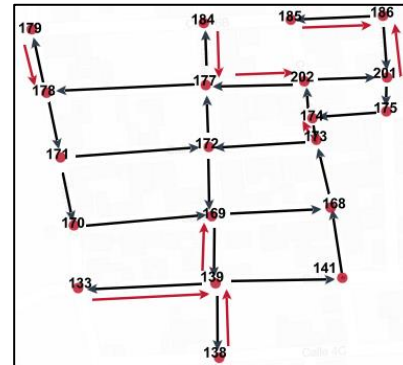
Clúster 0.9



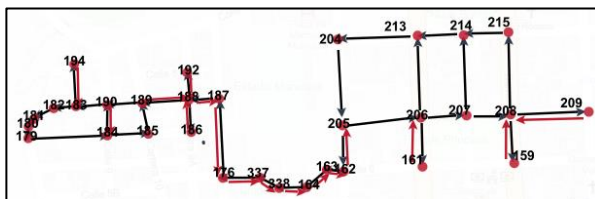
Clúster 0.10



Clúster 0.11

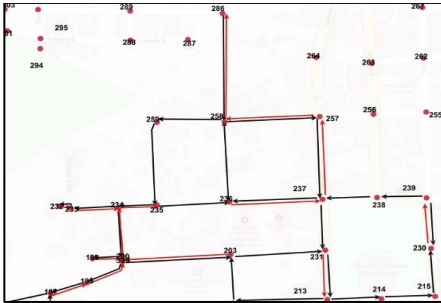


Clúster 0.12

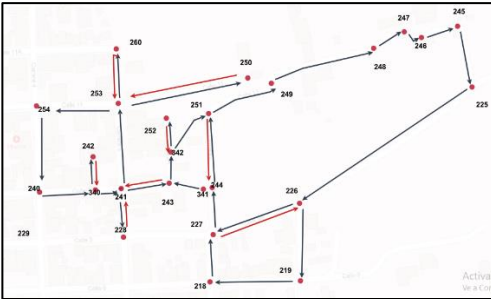


CLÚSTER 1

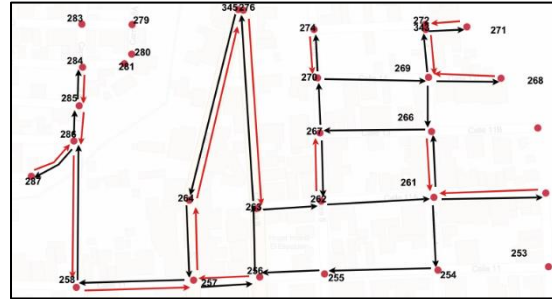
Clúster 1.1



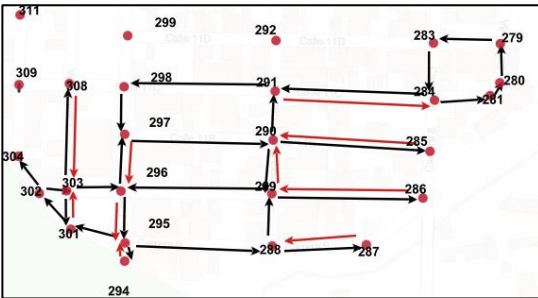
Clúster 1.2



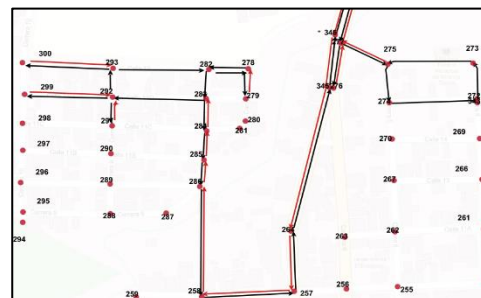
Clúster 1.3



Clúster 1.4



Clúster 1.5



Clúster 1.12

