

# Modelo de ruteo para la recolección de residuos sólidos domiciliarios en la ciudad de Villavicencio: Prueba piloto comuna 7

**RESUMEN:** El análisis de asignación de las rutas de transporte se convierte en parte fundamental en la operación de recolección de residuos sólidos, ya que impacta directamente en el cumplimiento de la prestación del servicio y la eficiencia en términos de tiempo y costo para la empresa prestadora del servicio; en el presente artículo se presenta un modelo matemático para la identificación de la ruta de recolección, partiendo del análisis de la menor ruta de expansión, teniendo en cuenta las restricciones identificadas en la ruta y definidas por la empresa prestadora del servicio. El modelo identifica la ruta de recolección de la comuna 7 de la ciudad de Villavicencio, Colombia, así como determinar la ubicación de cada contenedor a través del método del centroide con el fin de encontrar los puntos más adecuados y equidistantes al área de cobertura de cada servidor. El análisis realizado en la zona se convierte en parte fundamental del proyecto de contenerización que se viene planteando en la ciudad, ya que se logran identificar diferentes variables, criterios y restricciones operativas que se deben tener en cuenta para la programación de las rutas de recolección de residuos sólidos domiciliarios en la ciudad.

**PALABRAS CLAVE:** árbol de expansión mínima, modelo de transporte, Recolección de residuos sólidos domiciliarios.



## Colaboración

Polanco Contreras Ramiro Hernán; García Orjuela Diego Ferney; Forero Molina Luis Stivens; Rojas Romero Stefanya, Universidad Antonio Nariño, Colombia

**ABSTRACT:** The assignment analysis of transport routes becomes a fundamental part of the solid waste collection operation, since it directly impacts on the fulfillment of the provision of the service and the efficiency in time and cost for service provider; In this article a mathematical model for the identification of the collection route is presented, starting from the analysis of the smallest route of expansion, taking into account the restrictions identified in the route and those defined by the service provider company. The model was applied for the identification of the collection route of a delimited area of the commune 7 of the Villavicencio, Colombia city, and in turn determines the location of each container through the centroid method in order to find the points more appropriate and equidistant to the coverage area of each server. The analysis carried out in the delimited area becomes a fundamental part of the containerization project that has been proposed in the city, since it is possible to identify different variables, criteria and operational restrictions that must be taken into account for the programming of collection routes of solid household waste in the city.

**KEYWORDS:** Collection of household solid waste, transportation model, minimum expansion tree.

## INTRODUCCIÓN

Para la operación de recolección de residuos sólidos domiciliarios (RSD), existen dos aspectos fundamentales a tener en cuenta, por un lado, desde el punto de vista normativo, se debe tener en cuenta el cumplimiento eficaz de la recolección de residuos en la comunidad, garantizando la prestación del servicio a la sociedad y preservando aspectos ambientales, culturales y sociales; por otro lado, se debe realizar una operación de forma eficiente, buscando la reducción de tiempos y costos del proceso, de tal forma que se pueda generar una ventaja competitiva y una gestión rentable para el prestador del servicio. Teniendo en cuenta que, la operación de recolección representa entre el 70% y 85% de los costos de la gestión de resi-

duos sólidos.[1], la asignación de las rutas de transporte para la operación de recolección de residuos es parte fundamental que debe ser analizada para garantizar un proceso eficaz y eficiente. Por ello se debe abordar el análisis desde la revisión del problema de ruteo de vehículos (VRP), que ha sido abordado por diferentes autores y diferentes contextos en la búsqueda de soluciones exactas o heurísticas, que mejoren u optimicen operaciones de Transporte.

A través del tiempo se ha visto la evolución del estudio de problemas de transporte, los cuales parten el problema del agente viajero (TSP) y da pie a la formulación de las diferentes variaciones de problemas de ruteo de vehículos (VRP) [2]. Consisten en problemas compuesto por múltiples nodos y las conexiones entre ellos o ramas, en los cuales se busca soluciones que cumplan con los criterios definidos y la búsqueda de la eficiencia en variables como costo, distancia o capacidad. A través del estudio de diferentes casos y variaciones del problema original, se han planteado diversas soluciones que se pueden clasificar en, exactas, heurísticas o metaheurísticas; a su vez, las soluciones exactas pueden ser el método de búsqueda directa de expansión de ruta, la programación lineal, dinámica o entera.

En el caso de la recolección urbana de residuos sólidos, se configura como una red en la cual se identifican los nodos o puntos de recolección definidos por el operador y las ramas definidas con la distancia existente entre los n nodos de una zona [3]. Para este caso se requiere encontrar la ruta más corta a través de algoritmos de iteración que permitan analizar y comparar las posibles combinaciones de los nodos y de tal forma que se pueda establecer la secuencia que genera el menor recorrido.[4] [5].

## MATERIAL Y MÉTODOS

Para el desarrollo del objetivo se planteó un enfoque de investigación mixto, ya que se recolectó información y datos de variables tanto cuantitativas como cualitativas. El diseño de investigación implementado fue una investigación aplicada con alcance descriptivo, ya que se buscaba identificar las características del fenómeno en observación y la descripción de cómo interactúan las variables para la construcción y planteamiento de las soluciones que cumplan con las restricciones y mejoren los resultados de las variables centrales analizadas.

Para la recolección de información se utilizó la técnica de observación directa, a través de la construcción de diarios de campo, en los cuales se realizó el levantamiento de la información técnica del recorrido de los vehículos de recolección, así como de la identificación de los aspectos, operativos, sociales y culturales relevantes y que puedan ser determinantes para el planteamiento de la propuesta de distribución de contenedores que requiere la empresa prestadora del servicio.

La frecuencia de los recorridos realizados a la microrruta observada, fueron definidos y/o sugeridos por la empresa prestadora del servicio, teniendo en cuenta criterios como: la frecuencia de recolección de la ruta, los días en la semana de mayor o menor generación de RSD, horarios de inicio y finalización de los turnos de los operarios de recolección, y las zonas que se consideran críticas por parte de la empresa prestadora del servicio. De esta manera se estableció que se debía realizar recorrido de observación previo, durante y posterior al paso del vehículo recolector, se realizaron recorridos en diferentes días de la semana durante tres meses, para determinar diferentes variables que puedan considerarse en el estudio.

Inicialmente se estableció el recorrido por la microrruta C7R1, figura 1, ya que es una de las más críticas para la operación de recolección, teniendo en cuenta el volumen de generación, y las novedades operativas que presenta el recorrido. El registro de información se realizó por medio del trazado de la ruta en la aplicación de Google Maps, permitiendo encontrar la ruta, distancia del recorrido, tiempo de operación y tener la información del trazado actual, adicionalmente se registró información detallada sobre las novedades, restricciones y condiciones actuales del recorrido del camión recolector, con el fin de identificar las variables para tener en cuenta en el desarrollo del modelo matemático. El procesamiento de la información se utilizó el complemento Solver de MS Excel, y el software Python, con el fin de procesar los datos del modelo y poder encontrar la solución adecuada al planteamiento.



Figura 1. Área de operación de la ruta C7R1  
Fuente. Google Maps

**Modelo aplicado**

Uno de los algoritmos comúnmente utilizados para resolver los problemas de decisión se constituye el árbol de expansión mínimo, tomando en cuenta que el proceso de optimización se apunta en procesos de combinación en situaciones reales, pero puede usar diferentes criterios para seleccionar el siguiente borde o bordes entre iteraciones, a partir del algoritmo 1 (Dos más cercanos Fragmentos), así mismo añade un borde más corto que une diferentes fragmentos. Por su parte el algoritmo 2 (Vecino más cercano) (Elige arbitrariamente un vértice  $u$ ) agrega el borde más corto que une el fragmento que contiene  $u$  con otro fragmento. [6] El algoritmo 3 (Todos los fragmentos más cercanos) agrega el borde más corto que lo une a otro fragmento. (En el algoritmo 3 se supone que todos los pesos de los bordes son diferentes, por lo que no se puede producir un ciclo) [7]

La mayoría de las redes en problemas reales son redes inciertas porque la mayor parte del tiempo no tiene datos históricos. Debido a la falta de datos estadísticos, la teoría de la probabilidad no funciona. Muchas otras teorías, como la teoría de conjuntos difusos y la teoría aleatoria difusa tienen sus propias limitaciones, de esta manera nació la teoría de la incertidumbre que se ha convertido en una rama de las matemáticas [8]. La teoría del esquema gráfico permite un algoritmo eficiente para resolver problemas que necesitan distribuir algo para diferentes caminos en este caso que tiene el modelo.[9] [10]

Una red  $G$  tiene tres conjuntos  $V(G)$ ;  $A(G)$  e  $I(G)$  donde:  
 $V(G)$ : conjunto cuyos elementos son vértices  
 $A(G)$ : conjunto cuyos elementos son arcos  
 $I(G)$ : conjunto que establece las relaciones

Por otro lado, la red puede ser representada como:  
 $G = \{(i, j) A; i, j \in V\} = \{(i, j) A; (i, j) \in V \times V\}$   
 El orden en la red se denota  $o(G) = n$

Los criterios para clasificar las redes son:  
 Número de nodos y arcos: finitas e infinitas.  
 Situación relativa y número de arcos: especial o nivel.  
 Tipo de red: regular, simple, múltiple, completa, incompleta, simétrica, asimétrica, bipartita, conectada, valorada y parcial.

De otro lado, las redes se pueden representar como un modelo matricial

a. Matriz de adyacencia (vértice - vértice)

- Red no orientada:

If  $M_{n \times n} = (a_{ij}) = (a_{ji})$  as

$(a_{ij}) = \{ \text{número de arcos conectados } x_i \text{ y } x_j \}$  o 0 en otro caso }

- Red orientada:

If  $M_{n \times n} = (a_{ij})$  as

$a_{ij} = \{ \text{número de arcos entre } x_i \text{ (origen) and } x_j \text{ (destino)} \}$  o 0 en otro caso }

b. Matriz complementaria  $C_{ij} = p - a_{ij}$

c. Matriz de incidencia (vértice - arco)

- Red no orientada:

$M_{n \times m} = (a_{ij}) = \{ 1 \text{ si } x_i \text{ es el fin del arco } A_j \text{ o } 0 \text{ en otro caso } \}$

- Red orientada:

$M_{n \times m} = (a_{ij}) = \{ 1 \text{ si } x_i \text{ es el inicio del arco } A_j \text{ o } -1 \text{ si } x_i \text{ es el inicio del arco } A_j$

$2 \text{ if } x_i \text{ es un bucle o } 0 \text{ en otro caso } \}$

Para definir el árbol de decisión, tiene vértices únicos que conectan todos los vértices restantes. De la misma manera, el árbol de decisión tiene un vértice principal llamado nodo raíz desde que comienza el algoritmo. El árbol puede ser.

- Árbol de expansión: incluye todos los vértices de red.

- El grado de los vértices: es una serie de subárboles que se construyen para comenzar en este vértice específico.

- La hoja es un vértice final.

- Árbol binario si cada vértice tiene solo dos arcos.

- El rango máximo del árbol es que tiene todos los vértices relacionados y sin bucles.

- El árbol de expansión mínima tiene un alcance máximo con un valor mínimo (distancia, costo, ...)

- El árbol de expansión máxima tiene un alcance máximo con valor máximo (margen, recursos, ...).

**Datos de partida**

Dentro del proyecto de contenerización de la recolección de RSD en la ciudad, se define el desarrollo de una prueba piloto realizada en las micro rutas definidas por el operador del servicio de recolección en la ciudad. La microruta se define como C7R1 la cual cubre un área de recolección aproximada de 4,84 Km<sup>2</sup>, la zona es recorrida por un vehículo de recolección con capacidad para 15 ton. en un turno completo de 8 horas. La frecuencia de recolección es de tres veces en la semana, los martes, jueves y sábado. Para el reconocimiento de las características específicas de la recolección de RSD bajo el método de recolección por acera, se realizaron recorridos antes, durante y posterior al paso del vehículo recolector. Algunos datos iniciales identificados de la microruta C7R1 se pueden ver en la tabla 1.

La zona delimitada cuenta con ocho etapas, colinda al norte con la Avenida calle 15, al Sur con la calle 7, al Este con la carrera 39 y Oeste con la Avenida 40, también se encuentra el cruce del Caño El buque. En la zona se identifican 12 instituciones educativas, centros comerciales, un centro de salud y una biblioteca; los cuales deben ser tenidos en cuenta y diferenciados como grandes generadores y por ende la estrategia de recolección debe ser analizada en condiciones específicas. Adicionalmente es importante tener en cuenta que en algunas etapas de la zona analizada se cuentan con diferentes predios o locales comerciales, que podrían generar variación en tipos y cantidades de residuos. [11]

Tabla 1. Datos iniciales de la Microrruta

Parámetro	Datos
Área delimitada	4,84 km <sup>2</sup>
Cantidad de predios	2014
Cantidad de habitantes	9163
Cantidad de RSD	≈ 39 Ton/sem
Distancia recorrida por el vehículo en un recorrido	19,41 km
Tiempo de recolección	6.5 h - 8.5 h
Velocidad promedio de recolección	3 km/h
Velocidad máxima	46 km/h

Fuente: Elaboración propia

### Identificación de puntos y ruta de recolección

El método del centroide permite identificar un punto de ubicación equidistante con las coordenadas  $i$  y  $j$  para cada  $x$  en que se cortan los hiperplanos de las ubicaciones de las unidades residenciales a agrupar,

$$\forall x: i \rightarrow j \quad x_i = \int x_i \frac{dB}{B} \Leftrightarrow B = \text{Área} \quad \text{Ec (1)}$$

$$\forall x: j \rightarrow i \quad x_j = \int x_j \frac{dB}{B} \Leftrightarrow B = \text{Área}$$

Esta metodología contempló en la elección de los puntos de presentación de los residuos restricciones operativas de dirección del flujo, espacio para el cargue del vehículo compactador y la capacidad aproximada del contenedor, así como la generación total de residuos y el número total de predios del sector bajo los siguientes supuestos:

$$\forall k \cap K: M = \frac{N \bar{k}}{C} \Leftrightarrow K = \sum_{k=1}^{\alpha} k \quad \text{Ec (2)}$$

$$K = N \bar{k} : \exists 10\ 800 \leq K \leq 12\ 500 \quad \text{Ec (3)}$$

Donde,

$N$  = Número de predios en el sector

$K$  = Peso total de RSD generados en ruta (Kg)

$\bar{k}$  = Peso promedio RSD generado por predio (Kg)

$C$  = Capacidad del contenedor

$M$  = Número de contenedores

$n$  = Número de predios por contenedor

La capacidad del contenedor ( $C$ ) en volumen y carga del contenedor seleccionado por la empresa prestadora del servicio, para el proyecto de contenerización es de 3 yd<sup>3</sup> y 300 Kg de residuos, siendo esta una restricción en el número de contenedores necesarios en la zona ( $M$ ).

El número total de predios en el sector ( $M$ ) es de 2014 según datos de la cartografía [11] suministrada por Secretaría de Planeación Municipal de la zona, sin embargo se deben tener en cuenta que en el sector se cuenta con la presencia de instituciones de educación, biblioteca, hoteles, centros comerciales y centros de salud considerados como grandes generadores e incluso generadores de residuos especiales con protocolos de recolección diferenciados, por tal razón se excluyen del modelo y su solución.

La cantidad de residuos presentados en la zona se estimó a partir de registros históricos de las últimas 100 semanas, datos suministrados por el prestador del servicio, en el que se cuenta con cotas mínimas de 10800 Kg y máximas de 12900 Kg, estos son asociados con una distribución normal y comportamiento estacional, evidenciado en el aumento de la generación de RSD durante los meses de diciembre y enero, así mismo encontrando como promedio de generación ( $\bar{k}$ ) de 11800 Kg por recorrido.

$$\bar{k} = \frac{11\ 800\ Kg}{2014\ predios} = 5,86 \frac{Kg}{predio} \quad \text{Ec (4)}$$

De igual forma se establece que se requieren un total de 40 contenedores para cubrir el requerimiento de la zona

$$M = \frac{11\ 800\ Kg}{300\ Kg/Contenedor} = 39,3 \quad \text{Ec (5)}$$

La ubicación articula el criterio del centroide (ecuación 1) cumpliendo las restricciones de flujo, por lo cual, se requiere determinar el número de predios que cada contenedor puede servir. Determinando los predios de cada servidor e identificándolo por diferentes colores como se puede en la Figura 2.

$$n = \frac{300\ Kg / Contenedor}{5,86\ Kg / Predio} = 51,19 \frac{Predios}{Contenedor} \quad \text{Ec (6)}$$

En cuyo caso el modelo propone un sistema de programación lineal entera del tipo binario, con el objetivo de minimizar el tiempo estimado de la ruta, por lo cual el modelo estima la distancia total recorrida como elemento fundamental a optimizar, así se consideran como variables:

$x_{ij}$  = Asignación de  $i$  a  $j$

$d_{ij}$  = Distancia de  $i$  a  $j$

$$f. o. Min. f(x, d) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M x_{ij} * d_{ij} \quad \text{Ec (7)}$$

$$\text{Sujeto a: } C \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M x_{ij} \leq K$$

$$\bar{k} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M n * x_{ij} \leq C$$

$$\forall i \sum_{j=1}^M x_{ij} = 1$$

$$\forall j \sum_{i=1}^M x_{ij} = 1$$

$$\forall ij \in \text{entera: } x_{ij} \in (0, 1)$$

$$d_{ij} \geq 0$$

Ec (8)

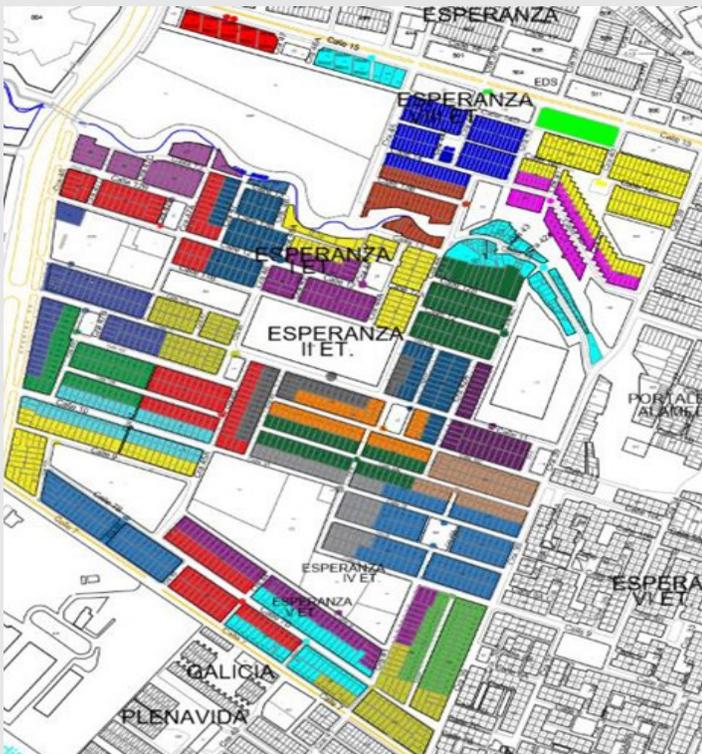


Figura 2. Ubicación de contenedores por método de centroide  
Fuente: Elaboración propia, Adaptado de cartografía de la secretaría de planeación de Villavicencio.

Posteriormente el modelo construido, fue evaluado en Python usando como solucionador la subrutina Scipy Optimize Linprog minimizando la función objetivo lineal sujeta a restricciones de igualdad y desigualdad lineal; la programación lineal está destinada a resolver la siguiente forma de problema partiendo del ingreso de los datos de forma matricial cuya estructura general es:

```
linprog(c,  
A_ub=None,b_ub=None,A_eq=None,  
b_eq=None,bounds=None,method='simplex',  
callback=None,options=None):
```

Bajo los parámetros:

*c*: Matriz con coeficientes de la función objetivo lineal a minimizar.

*A\_ub*: Matriz 2-D que, cuando se multiplica por matrices por *x*, da los valores de las restricciones de desigualdad del límite superior en *x*.

*b\_ub*: Matriz 1-D de valores que representan el límite superior de cada restricción de desigualdad (fila) en *A\_ub*.

*A\_eq*: Matriz 2-D que, cuando se multiplica por matrices por *x*, da los valores de las restricciones de igualdad en *x*.

*b\_eq*: Matriz 1-D de valores que representan el RHS de cada restricción de igualdad (fila) en *A\_eq*.

*bounds*: secuencia, opcional pares para cada elemento en *x*, definiendo los límites en ese parámetro. Use None para uno de min o max cuando no haya límite en esa dirección. Por defecto, los límites son (0, Ninguno) (no negativo) print(): Salida por pantalla [13].

## RESULTADOS

En los seguimientos realizados a la ruta de recolección se identificaron diferentes novedades o restricciones que influyen en la dinámica del proceso y que fueron caracterizadas, identificando su influencia en el proceso de recolección de RSD, los recorridos realizados por la ruta de recolección actual buscaron identificar las condiciones actuales de las vías teniendo en cuenta las variables necesarias para la construcción y análisis del modelo, Según Kinatan [12], las cuales son la distancia entre los puntos, el ancho de la vía y el sentido de las vías, de este modo los valores de distancia (*d*) identificados contemplan los recorridos necesarios para no hacer movimientos en contravía o retroceso por parte del vehículo.

**Vías inadecuadas:** Las vías inadecuadas se presentan cuando la vía es angosta dificultando el tránsito de vehículos de carga, cuando el espacio para hacer el giro en las esquinas no es suficiente para un vehículo pesado, cuando hay vías averiadas o no pavimentadas y cuando la vía no es apta para el ingreso de vehículos con peso superior a 10 Toneladas. En estos casos el tránsito del vehículo de recolección se dificulta o se restringe, por lo cual los vehículos deben buscar otras rutas o simplemente se retrasan para continuar con la ruta.

**Obstáculos en el flujo del vehículo:** Este tipo de novedades se presentan ocasionalmente en alguno de los siguientes casos, obras civiles en la vía, vehículos abandonados, negocios comerciales o ambulantes invadiendo la vía, o cuando hay objetos impidiendo el paso vehicular. En estos casos hay un retraso para el tránsito del vehículo y en ocasiones debe procederse a llamar las autoridades de tránsito para movilizar vehículos u obstáculos que impidan el tránsito, este tipo de novedad es frecuente en zonas residenciales con vías angostas.

**Puntos de parada fija:** Se presenta cuando la misma comunidad ha definido un punto común para la acumulación de basuras, normalmente en un parque o punto de fácil acceso para los residentes cercanos. Los puntos de acumulación masiva presentan en la actualidad casos de malos olores, proliferación de roedores e insectos, y mal aspecto visual, sin embargo, son puntos que pueden ser seleccionados como un punto fijo de ubicación de contenedor.

**Grandes generadores:** Pueden ser Instituciones educativas, centros de salud, centros comerciales, conjuntos residenciales y/o empresas, presentes en la zona de análisis que tienen dinámicas diferentes de generación de residuos por la cantidad y tipo de residuo, Estos puntos deben ser identificados y analizados diferenciadamente para determinar la estrategia de recolección que se va a implementar en cada uno de los casos.

**Acumulación inadecuada:** También se identificaron diversos casos que se presentan principalmente por la

falta de conciencia y cultura de algunos habitantes de la zona, disposición en horas inadecuadas (antes o después), disposición en bolsas rotas, disposición de materiales diferentes a RSD, disposición de residuos peligrosos.

**Sentido de las vías:** En la zona analizada se presentan múltiples casos de vías con un solo sentido, las cuales deben ser tenidas en cuenta para la definición de la ruta de recolección.

**Vías ciegas:** En la zona analizada se presentan varios puntos en los que hay vías ciegas, y el vehículo normalmente debe hacer largos retrocesos para ingresar o salir de calles o vías ciegas.

**Alto tráfico vehicular:** Zonas de la ciudad en las cuales se presenta flujo lento o congestión vehicular en diferentes horas del día.

La programación realizada de ingreso y tratamiento de los datos se presenta a continuación:

```
>> from scipy.optimize import linprog
>> c=[M x n*n]
>> A_ub=[[0,0,0,1,1,1,0,0,0],[0,0,0,1,1,1,0,0,0],[0,0,0,0,0,1,1,1,1].....]]
b_ub=[1,1,1,....,1]
>> res=linprog(c,A_ub,b_ub,A_eq,b_eq,bounds=(0,-None))
>> print(res)
>> print("Valor optimo: ",res.fun,"\nX: ",res.x)
```

Los puntos encontrados como la ruta más corta se pueden ver en la Tabla 2, y en la figura 3, la nueva ruta evidencia una disminución del recorrido frente a la ruta actual. De igual forma se calcularon algunos valores obtenidos en el recorrido realizado a través de la nueva ruta definida como se pueden ver en la tabla 3, encontrando importantes diferencias a los datos iniciales presentados en la tabla 1.

Tabla 2. Coordenadas y ruta de recolección

Contenedor	Coordenada
Cont 1	4.12802, -73.63687
Cont 2	4.12785, -73.6377
Cont 3	4.12678, -73.63694
...	...
Cont 37	4.13107, -73.63314
Cont 38	4.13102, -73.6322
Cont 39	4.13127, -73.63173
Cont 40	4.13124, -73.63165
Fin R C7R1	4.13161, -73.63038
PER	4.13203, -73.43619

Fuente: E=laboración propia

La búsqueda de una solución ideal aproximada y optima se ha logrado a través de la minimización de los recorridos que se deben hacer entre los diferentes nodos

establecidos como punto de recolección o acumulación de residuos, de igual forma como se ha definido en diferentes soluciones a problemáticas planteadas para modelos de recolección como el analizado por S. Simón [14] en donde se define un modelo de programación lineal entera mixta, se logra encontrar una solución que mejora la eficiencia a la operación de transporte o recolección, cumpliendo las restricciones definidas por el prestador de servicio.

Tabla3. Datos esperados microruta C7R1

Parámetro	Datos
Distancia recorrida	7.1 km
Tiempo de recolección	2.4 h
Velocidad promedio	3 km/h
Velocidad máxima	46 km/h

Fuente: Elaboración propia

En este caso la prueba piloto realizada da cobertura al área, predios y población definida en las condiciones iniciales y además se han tenido en cuenta los criterios restrictivos identificados, ya que la definición de los puntos y coordenadas de ubicación busco la eliminación de contraflujos, retrocesos o reprocesos en la operación de recolección.

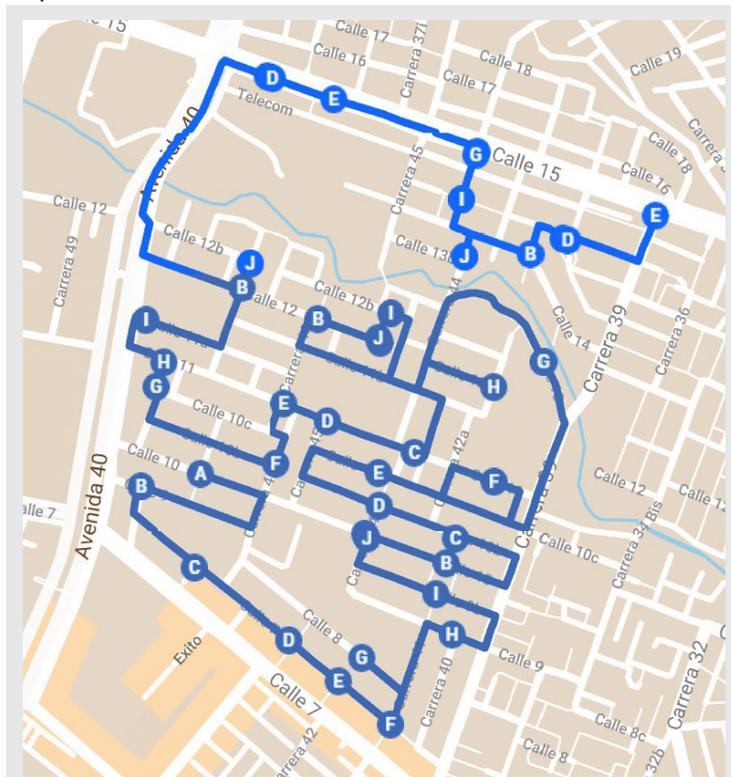


Figura 3. Ubicación de contenedores por método de centroide.

Fuente: Elaboración propia. Tomado de Google Maps

## CONCLUSIONES

A partir de la información recolectada en los diarios de campo realizados sobre la operación en la ruta, se

pudo identificar que gran parte de las problemáticas presentadas obedecen a diferentes factores externos a la operación propia de la empresa, estos fenómenos son asociados a comportamientos sociales y culturales por prácticas inadecuadas de la misma comunidad al momento de realizar la presentación de los residuos. [15] De igual forma se evidencia la presencia de condiciones a excluir asociadas a la presencia en la zona de grandes generadores como centros comerciales y colegios, así como generadores institucionales, provenientes de servicios médicos cuyo tratamiento debe ser diferenciado con base en el volumen generado y la propia naturaleza de los residuos que en los primeros casos son de naturaleza reutilizable, en el segundo grupo se cuenta con los residuos peligrosos [16].

La propuesta apunta a la optimización del modelo de recolección, pasando de un sistema de acera a uno contenerizado, logrando la reducción de la distancia total recorrida, así como el tiempo medio de recolección de residuos sólidos domiciliarios en la trayectoria definida. Al pasar de 19,1 Km en el primer caso a 7,1 Km lo que genera una reducción en distancia del 62,8% y del 70% en tiempo al pasar de 8 horas en el recorrido a 2,4 horas, manteniendo una velocidad media durante el recorrido, las mejoras están asociadas a los retrocesos en la ruta, la eliminación de reprocesos al pasar dos o más veces por la misma vía y la disminución en las paradas durante el recorrido por la presentación de residuos a lo largo de la acera.

El modelo de contenerización requirió la agrupación de las unidades residenciales generadoras de residuos alrededor de un punto de acopio equidistante y con la capacidad del contenedor estándar adoptado por la empresa de servicios públicos que es de 300 kg, para ello se utilizó el método del centroide que agrupo un promedio de cincuenta unidades habitacionales por cada recipiente contenedor tomando en cuenta el promedio de residuos generados, de esta asignación se estima un máximo de cuarenta puntos de acopio para suplir las necesidades de la ruta que es de 12 Ton métricas en cada recorrido.

Debido a la naturaleza de la asignación, el modelo de programación lineal propuesto, es entero al tomar como criterios para la asignación valores de cero y uno, siendo el primero la no asignación y el segundo la asignación del contenedor a la coordenada respectiva, de igual forma se cuenta con restricciones asociadas al peso total de RSD generados en la ruta, a la capacidad del contenedor en cada punto y la asignación para cada origen ( $i$ ) y cada destino ( $j$ ) como uno; la función objetivo contempla el producto de la distancia entre origen y destino ( $d_{ij}$ ) y la variable de asignación de posición ( $x_{ij}$ ). El modelo fue evaluado usando la rutina linprog de Python y el Árbol de expansión mínima encontrando coincidencias en la asignación realizada con peque-

ñas variaciones en cuanto a la geolocalización precisa de los contenedores, manteniendo la velocidad media dentro del recorrido en tres kilómetros por hora.

Los anteriores resultados indican que el establecimiento de un sistema contenerizado para el manejo de los Residuos Sólidos Domiciliarios en la ciudad, redundó en el aprovechamiento de los tiempos destinados para el proceso, así mismo mejora desde el punto de vista técnico el manejo de los RSD reduciendo el impacto de, por ejemplo, olores ofensivos como uno de los elementos de mejora o generación de vectores y focos de contaminación en el ambiente; finalmente la propuesta del sistema se presenta como óptimo aplicando los puntos de contenerización acciones que reducen ostensiblemente el recorrido que realiza el camión recolector al eliminar movimientos.

#### BIBLIOGRAFÍA

[1] E. Betanzo-Quezada, M. Á. Torres-Gurrola, J. A. Romero-Navarrete, and S. A. Obregón-Biosca, "EVALUACIÓN DE RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS CON APOYO DE DISPOSITIVOS DE RASTREO SATELITAL: ANÁLISIS E IMPLICACIONES," *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 32, no. 3, pp. 323–337, Jul. 2016.

[2] L. B. Rocha-Medina, E. C. González La Rotta, and J. A. Orjuela Castro, "Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución," *Ing. ISSN-e 0121-750X*, Vol. 16, No. 2, 2011, págs. 35–55, vol. 16, no. 2, pp. 35–55, 2011.

[3] E. Salazar Hornig and N. Ruiz Fuentealba, "MODELO ACO PARA LA RECOLECCIÓN DE RESIDUOS POR CONTENEDORES ACO MODEL APPLIED TO THE WASTE COLLECTION BY CONTAINERS," 2009.

[4] M. W. Carter and C. C. Price, *Operations research : a practical introduction*. CRC Press, 2001.

[5] J. Banks and J. S. Carson, *Discrete-event system simulation*. Prentice-Hall, 1984.

[6] J. Holm, K. de Lichtenberg, M. Thorup, and M. Thorup, "Poly-logarithmic deterministic fully-dynamic algorithms for connectivity, minimum spanning tree, 2-edge, and biconnectivity," *J. ACM*, vol. 48, no. 4, pp. 723–760, Jul. 2001.

[7] R. L. Graham and P. Hell, "On the History of the Minimum Spanning Tree Problem," *IEEE Ann. Hist. Comput.*, vol. 7, no. 1, pp. 43–57, 1985.

[8] X. Gao and L. Jia, "Degree-constrained minimum spanning tree problem with uncertain edge weights," *Appl. Soft Comput.*, vol. 56, no. C, pp. 580–588, Jul. 2017.

[9] J. L. Jain, S. G. Mohanty, and W. Böhm, *A course on queueing models*. Chapman & Hall/CRC, 2007.

[10] Q. Martín Martín, M. T. Santos Martín, and Y. del R. de Paz Santana, *Investigación operativa : problemas y ejercicios resueltos*. Madrid España ;;México: Pearson Educación, 2005.

[11] S. de planeación Villavicencio-Meta, "Planos cartograficos comuna 8 Villavicencio." Villavicencio, p. 10, 2010.

[12] B. Kinantan, A. Rahim Matondang, and J. Hidayati, "Waste management as an effort to improve urban area cleanliness and community income (journal review)," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 309, no. 1, p. 012017, Feb. 2018.

[13] C. python Argentina, "PyAr - Python Argentina." [Online]. Available: <http://www.python.org.ar/wiki/Tutorial>. [Accessed: 01-Feb-2019].

[14] S. Simón, J. Demaldé, J. Hernández, and M. Carnero, "Optimización de Recorridos para la Recolección de Residuos Infecciosos," *Inf. tecnológica*, vol. 23, no. 4, pp. 125-132, 2012.

[15] R. H. POLANCO and D. F. GARCIA, "Caracterización de la gestión de Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD) en la ciudad de Villavicencio (Colombia)," *Rev. Espac.*, vol. 40, no. 04, Feb. 2019.

[16] Á. M. Niño Torres, J. M. Trujillo González, and A. P. Niño Torres, "GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARIOS EN LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO. UNA MIRADA DESDE LOS GRUPOS DE INTERÉS: EMPRESA, ESTADO Y COMUNIDAD," *Luna Azul*, 2017.