

Un modelo de rutas para la recolección de residuos sólidos domiciliarios: un caso de estudio

Case study for household solid waste collection

Lina Clemencia Bustamante Gutiérrez
Universidad Católica de Manizales (Colombia)
<https://orcid.org/0000-0003-1172-1287>
lcbustamanteg@unal.edu.co

Ángela María Alzate Álvarez
Universidad Católica de Manizales (Colombia)
<https://orcid.org/0000-0003-4931-7562>
aalzate@ucm.edu.co

Paola Alzate
Universidad Católica Luis Amigó (Colombia)
<https://orcid.org/0000-0001-5406-3355>
paola.alzateon@amigo.edu.co

RESUMEN

La gestión integral de residuos sólidos a nivel domiciliario involucra una logística de recolección adecuada para el aprovechamiento por parte de los recuperadores. El objetivo del presente estudio fue optimizar el recorrido para el acceso a los residuos en puntos estratégicos de la ciudad de Manizales (Colombia), además de analizar las características cualitativas relacionadas con un proceso de sensibilización del personal ejecutor. La integración de los insumos numéricos y variables de estudio se llevó a cabo mediante la aplicación del algoritmo de optimización ruta más corta, mientras la matriz DOFA fue implementada para analizar las condiciones de satisfacción operacional. Los resultados generaron una reducción en los recorridos del 62,5% de los casos, obteniéndose ahorros de hasta 28,61% de kilómetros transitados diariamente por los recuperadores. Asimismo, se identificaron que los factores como la topografía y el clima inciden directamente en las actividades de recolección.

PALABRAS CLAVE

Logística; Optimización; reciclaje; residuos sólidos.

ABSTRACT

The integrated management of solid waste at the household level involves adequate collection logistics for recovery by waste collectors. The objective of this study was

to optimize the route for access to waste at strategic points in the city of Manizales (Colombia), in addition to analyzing the qualitative characteristics related to a process of sensitization of the executing personnel. The integration of the numerical inputs and study variables was carried out through the application of the Shortest Route optimization algorithm, while the SWOT matrix was implemented to analyze the operational satisfaction conditions. The results generated a reduction in routes in 62.5% of the cases, obtaining savings of up to 28.61% of kilometers traveled daily by the reclaimers. It was also identified that factors such as topography and climate have a direct impact on collection activities.

KEYWORDS

Logistics; optimization; recovery; solid waste.

Clasificación JEL: L81, C61, Q53.

MSC2010: 68R10, 46N10.

1. INTRODUCCIÓN

La Gestión Integral de Residuos se ha convertido en una estrategia eficiente que busca reducir el riesgo de contaminación medio ambiental, mientras favorece el desarrollo social de las comunidades a través de la concientización de recuperación de materiales y el desarrollo de cadenas productivas eficientes para un adecuado manejo de los recursos. El término acuñado a la innovación y a los avances tecnológicos para la administración y recolección de residuos busca a través de la información establecer una red de comunicación que pueda ser usada para el agendamiento eficiente de las operaciones (Hashemi-Amiri et al., 2023). Por lo anterior, los procesos de transformación de residuos consideran el reciclaje, el aprovechamiento energético, la elaboración de compost, la producción de biogás, la formulación de combustibles alternos, entre otros (Jaramillo et al., 2008); su procesamiento y finalidad se enmarcan dentro de una Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS), de tal forma que representen beneficios sanitarios, ambientales, sociales y económicos para la sociedad (De residuos sólidos en Colombia., n.d.). Mientras, los residuos no aprovechables son tratados a través de rellenos sanitarios y en ocasiones incinerados para su disposición final (Noguera & Olivero, 2010).

La gestión de los residuos, el impacto ambiental, la producción excesiva, y los materiales de fabricación son temas que han cobrado fuerza y prelación en los últimos años, siendo de interés el cambio climático y la contaminación del agua causadas por inadecuadas GIRS principalmente en países en desarrollo (Molayzahedi & Abdoli, 2022). En consecuencia, una sociedad más consciente y una producción más amable y sensible a las afectaciones medioambientales. Sin embargo, el consumismo mundial y la elevada generación de residuos por persona, estimada en 1 kg diario (Velásquez & de Jesús Bedoya Osorio, 2009), superan los esfuerzos institucionales, siendo los hogares actores que obstaculizan el avance hacia una GIRS eficiente debido a las malas prácticas de disposición de residuos (Fadhullah et al., 2022), que generan enfermedades crónicas y agudas, malaria y diarrea por acciones como el vertimiento descontrolado en aguas (Kouassi et al., 2022). En consecuencia, los esfuerzos de los países por llevar a cabo procesos de administración de residuos se obstaculizan por la falta de inclusión de las comunidades y las necesidades de reforma institucional y social con relación a las políticas ambientales (Amin et al., 2023)

En promedio, la vida útil de los rellenos sanitarios en Colombia es de cinco años (Rojas-Avenida, 2022). En el año 2018 se tenían más de 29.000 toneladas de residuos sólidos por cada billón de PIB; sin embargo, la tasa de reciclaje ha ido creciendo año tras año, incrementándose en 0,3% en comparación con el 2017 (Correa-Orozco et al., 2021). En la ciudad de Manizales, eje cafetero de Colombia, la generación de residuos crece de manera exponencial; para su gestión, la Empresa Metropolitana de Aseo S.A. E.S.P. (EMAS) apoya los diferentes procesos relacionados

con la disposición final de los residuos sólidos, siendo un aliado estratégico de la Alcaldía, las secretarías de medio ambiente, obras públicas y planeación, quienes actualmente tienen bajo su responsabilidad el Plan de Gestión de Residuos Sólidos (PGIRS), donde se establece una guía de ruta dentro de la planeación para la interacción de los organismos municipales, la ciudadanía y los recicladores (De Manizales, n.d.).

El crecimiento global de residuos ha llevado a diferentes países a buscar alternativas de solución para su integración y disposición eficiente (Oyedotun et al., 2021). Para ello, la logística, y específicamente la logística inversa se ha enfocado en la resolución de este tipo de problemas (Purwani et al., 2020), con la incorporación de modelos eficientes para el relacionamiento de la red logística y la programación de rutas (Asefi et al., 2019); es así, como los modelos matemáticos y más exactamente los modelos logísticos, pretenden optimizar tiempos, distancias o costos, traduciéndose en una ventaja competitiva para enfrentar la velocidad de cambio evidente en el mundo globalizado actual.

El presente proyecto es un pilotaje que busca analizar, en principio, cómo una empresa, puede planear, organizar, dirigir y controlar todos sus procesos involucrados en la ruta de abastecimiento, y que responda a un orden, producto de la disciplina empresarial. Asimismo, existe un interés que supera los indicadores de ciudad, y corresponde a la innovación dentro de un modelo que precise la manera más eficiente de generar dinero para la empresa en cuestión de recuperadores, y que a su vez favorezca empresarios, recuperadores, entes territoriales, entidades gubernamentales, sociedades de beneficio económico, considerando aspectos sociales en la participación de la actividad propia del reciclaje.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Los recuperadores

Existe un interés mundial por la gestión eficiente de la disposición final de los residuos de tal forma que contribuyan a la economía circular y a los objetivos de desarrollo sostenible (Villalba-Ferreira et al., 2022). El crecimiento acelerado de la población y la economía en la última década ha traído consigo problemas relacionados con las bajas tasas de recolección de residuos, las limitaciones en los recicladores informales y la inapropiada disposición final de los residuos (Singh et al., 2014). Con lo cual, la optimización de la cadena de producción a partir del incremento en la cantidad y calidad del material reciclable ha sido un reto de interés mundial (Jourdain & Zwolinski, 2015).

La administración eficiente de residuos se ha convertido en un aspecto fundamental para tornar hacia la economía circular y contribuir a los objetivos de desarrollo sostenible; para ello, una mayor inversión en los diferentes tipos de cooperación es una alternativa que influye en los resultados de rendimiento en la gestión de residuos, la disposición final, y la participación e inclusión de los recicladores en la sostenibilidad ambiental (Villalba-Ferreira et al., 2022). Sin embargo, otro reto corresponde a la formalización del proceso de reciclaje debido a las dificultades para concientizar y promover las acciones de reciclaje entre los residentes de los hogares y los recicladores (Chen et al., 2023). Además de los obstáculos relacionados con los recicladores informales, los procesos de recolección y manipulación deficiente, la falta o ineficiencia en las políticas ambientales y la falta de financiación (Dickson et al., 2023).

El oficio de reciclar y extraer de los residuos material no ha tenido el contexto histórico social con el que cuenta actualmente. Su origen está enmarcado por la violencia, el desplazamiento y la falta de oportunidades y no fue sino hasta la década de los ochenta, cuando empezó su organización en cooperativas y diferentes asociaciones (Nd, 2017). Posteriormente, tuvo su inicio el interés por parte de los organismos gubernamentales para incluirlos dentro de sus programas de gobierno y específicamente como actores fundamentales dentro de los PGIRS locales. Es así, como nace su papel fundamental en el programa de la ciudad de Manizales, el cual, lo

identifica como “un actor clave en la cadena del aprovechamiento de los residuos sólidos” (De Manizales, n.d.), caracterizándolos de la siguiente forma:

1. Recuperadores habitantes de calle: personas que viven en situación de vulnerabilidad, su manera de ver la vida misma es desde el rebusque, duermen en la calle y su oficio es totalmente informal. La gran mayoría son población vicio-dependiente.
2. Recuperadores del planchón: corresponde a los trabajadores contiguos al relleno sanitario, el planchón. Se encargan de separar los residuos que los camiones compactadores y camionetas depositan transitoriamente. Los materiales reciclados pueden ser comercializados para su venta. El sitio de trabajo no tiene ninguna protección contra enfermedades e infecciones.
3. Recuperadores asociados: personas que trabajan dignamente en un ambiente más humano, bajo el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos, PGIRS. No tienen una relación contractual con la empresa EMAS S.A. E.P.S.; sin embargo, una vez realizada la recolección, la empresa les proporciona algunos recursos como elementos de protección personal, capacitaciones, actividades de bienestar, y bodega de disposición final para culminar la clasificación y de esta forma contribuir al contacto posterior con clientes.

2.2 Los modelos logísticos

La logística, según el Consejo de la Dirección Logística, planea y controla el flujo eficiente de bienes y servicios; así como la información relacionada desde el origen hasta el punto de consumo satisfaciendo los requerimientos de los clientes (Ballou, 2004). Por su parte, los modelos logísticos pretenden optimizar tiempos y/o distancias, cuyo fin es que las operaciones relacionadas con el cliente final pueda hacer efectiva la entrega del producto o servicio solicitado (Mahmoud et al., 2022).

La necesidad de considerar un alto número de variables, inputs y outputs bajo la optimización de los desplazamientos y consecuente de los tiempos de operación conllevan a la consideración de los modelos de redes como técnica para llevar a cabo los objetivos de aprovechamiento de los recursos. Según (Taha, 2004), una red consta de un conjunto de nodos conectados por arcos o ramas, a quien se asociada un flujo de algún tipo.

Algunas investigaciones desarrolladas en el área de estudio comprenden el diseño de una red logística para una comercializadora ferretera donde se sugiere realizar etapa de evaluación logística basada en modelos matemáticas incluyendo ruteo, con el fin de minimizar la distancia total recorrida y establecer las estaciones, horarios y secuencia de rutas (Peña-Orozco et al., 2016). Por su parte, (González & Nataly, 2018) construyeron una red logística mediante la identificación de nodos en la empresa Mineralex, identificando la posibilidad de replantear la ubicación de los centros de acopia a pesar de la optimización evidente de sus rutas.

Estudios relacionados con modelos de ruteo se han desarrollado a partir de la aplicación de diversas técnicas a fin de llevar a cabo la articulación de nodos de forma óptima en términos de costos, procesos y recursos. La programación de rutas de transporte para maximizar entregas y cargas en una empresa de Perú evidencia como la aplicación de programas de ruteo favorecen la satisfacción de clientes y el desarrollo eficiente de las labores operativas (Reyes-Morales, 2016). Asimismo, el estudio de (Luz et al., n.d.) abordó el transporte terrestre desde el flujo de mercancías con definición de nodos en los corredores logísticos, presentando la importancia de aplicar modelos bajo la consideración de aspectos reales y fluctuantes durante el proceso de entrega. Asimismo, (Chandomí-Castellanos et al., 2019), implementaron la metodología de la ruta más corta bajo el esquema de lógica difusa, siendo los tiempos de recorrido inciertos, permitiendo un acercamiento a los procesos recurrentes.

Tres modelos logísticos se destacan en la conexión de nodos de forma eficiente: la ruta más corta, la expansión mínima y el problema del flujo de costo mínimo. El problema de la Ruta más corta, según (Taha, 2004), determina la menor distancia entre un origen y un destino en una red

de transporte. Los ejemplos de su aplicación en la cotidianidad, van desde la planificación de las rutas turísticas (Henao & Betancur, 2006), pasando por encontrar la menor distancia a recorrer entre dos ciudades (Calderón et al., 2016), hasta considerar la predicción sobre el hurto a personas en la ciudad de Bogotá (Campo-Agreto, 2017).

El modelo de expansión mínima difiere del de la ruta más corta en que “Para el árbol de expansión mínima la propiedad que se requiere es que las ligaduras seleccionadas deben proporcionar una trayectoria entre cada par de nodos” (Hillier & Lieberman, 2003). La aplicación de estos problemas de optimización, se ubica en las redes de comunicación eléctrica (Dominguez & Richard, 2018), problemas económicos de la bolsa (Herrera & Corona, 2007) y estructuras de precios (Martínez-Bentancor & Mones, 2020), ciclo de rutas (Gelves et al., 2021), principalmente. Mientras, el problema del flujo de costo mínimo tiene una posición destacada entre los modelos de optimización de redes debido a sus aplicaciones y soluciones eficientes siendo aplicado principalmente a problemas de puntos de aprovisionamiento (Bustos-Rosales et al., 2014; García-Campoverde, 2022; Rozo-Ostos, 2018).

Después de un análisis comparativo y el barrido bibliográfico realizado, se pudo establecer el modelo de la Ruta más corta como el modelo idóneo para abordar la problemática de estudio, debido a que considera nodos e interacciones fácilmente ajustables a los datos de estudio y de recolección en campo.

3. METODOLOGÍA

La presente investigación consideró dos etapas: la evaluación sistemática para la planificación estratégica a partir de la matriz DOFA y la metodología de la ruta más corta como modelo logístico para la determinación de la ruta más eficiente entre dos puntos en una red o grafo.

La fase inicial aplicó la matriz DOFA en la evaluación de las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas producto del proceso de reciclaje. La incorporación de esta actividad se llevó a cabo a partir del acompañamiento de los recuperadores durante los trayectos habituales a fin de obtener una sensibilización de la percepción de los mismos y su influencia en la eficiencia operacional.

En el desarrollo de la ruta más corta se consideraron los aspectos clave de la metodología (García et al., 2013). Inicialmente se definió el problema con la determinación de los puntos de origen y de destino; posteriormente se realizó el modelamiento de la red de forma gráfica con la implementación de Google Maps. La etapa posterior aplicó el algoritmo Dijkstra para la identificación y análisis de resultados.

Los puntos de origen y de destino, el diseño de la red y la medición de las distancias reales recorridas por los actores del programa “Recuperador Amigo” fueron tomados en la empresa EMAS S.A. E.S.P. El levantamiento directo de datos en campo fue realizado por parte de los investigadores y el grupo de apoyo de los estudiantes de octavo semestre de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Católica de Manizales, quienes además implementaron un instrumento para la recolección de información y acompañamiento de los recuperadores en cada una de sus rutas.

Con los datos recolectados, se trazaron los recorridos realizados por los recuperadores implementando el programa ArcGIS. En esta etapa, a partir de la imagen del mapa correspondiente a cada barrio de la ciudad de Manizales se georreferenciaron los puntos de interés del modelo logístico. Allí se identificaron los cuatro puntos de control en sentido horario de cada sector, ubicando en cada uno de ellos, las coordenadas X (que corresponden al este) y Y (que corresponden al norte).

Para la aplicación del algoritmo se establecieron tres supuestos: un nodo es un punto de recolección; el diseño de la red sólo conserva un nodo cuando hay más de un punto de recolección; y Todas las cuadradas miden 0,08 km.

En la aplicación del algoritmo se implementó el siguiente procedimiento:

1. Selección del vértice de partida, identificado como origen.
2. Identificación del nodo de inicio.
3. Determinación de los caminos especiales desde el nodo de inicio. El camino especial es aquel que solo puede trazarse a través de los nodos o vértices ya marcados.
4. Para cada nodo no marcado, selección de la mejor ruta: usar el camino especial antes calculado o usar un nuevo camino especial generado al marcar este nuevo nodo.
5. Para seleccionar un nuevo nodo no marcado como referencia, tomar el camino especial con mínima arista.
6. Determinación de los caminos mínimos, correspondiente a la suma de los pesos de las aristas que forman el camino para ir del nodo principal al resto de nodos, pasando únicamente por caminos especiales, es decir nodos marcados.

Seguidamente, se empleó la función: ruta óptima por distancia, donde se identificaron dentro de las porciones de mapas georreferenciados, los puntos de llegada y de partida de cada recolector según el barrio. A continuación, se ejecutó el comando Network Analyst para obtener la ruta óptima en cada uno de los 8 recolectores analizados. Finalmente se exportaron las imágenes obtenidas con los recorridos óptimos sugeridos en cada caso.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El método científico fue implementado en el 30 % de la población recicladora correspondiente a un tamaño de muestra de 8 recuperadores de la ciudad de Manizales vinculados al programa “Recuperador Amigo” de la Empresa EMAS S.A. E.S.P. Pero gracias a la interdisciplinariedad del equipo investigador, se consideró desde la fase de planeación, identificar variables de tipo cualitativo y cuantitativo, y garantizar así la completitud del estudio cuyo objeto es al fin de cuentas, el ser humano.

Los resultados de la Tabla 1. Fortalezas y Amenazas matriz DOFA y de la Tabla 2. Debilidades y oportunidades matriz DOFA, fueron generados a partir de una jornada de reflexión realizada con los recuperadores. Las debilidades y fortalezas corresponden a los agentes internos; es decir, aquellos que dependen de las dinámicas que se presentan al interior de la empresa EMAS o del grupo de recuperadores; mientras, las oportunidades y amenazas, son los factores externos que no pueden ser controlados.

Como debilidades, los recuperadores reconocieron que aspectos como su forma de ser y dinámicas familiares afectan los buenos resultados de su trabajo; sin embargo, las situaciones externas como las condiciones climáticas, la topografía y la percepción negativa de la comunidad inciden directamente en su desempeño, afectando los recorridos, la optimización del tiempo y la obtención de reciclaje debido a que existe el imaginario que estos son habitantes de calle que utilizan el dinero del material reciclable para sustentar su dependencia a sustancias psicoactivas.

Un modelo de rutas para la recolección de residuos sólidos domiciliarios: un caso de estudio

Lina Clemencia Bustamante Gutiérrez, Ángela María Alzate Álvarez, Paola Alzate

Tabla 1. Fortalezas y Amenazas matriz DOFA

Fortalezas		Amenazas	
F01	Largos años de experiencia por parte de los recuperadores	AM1	La forma discriminatoria con que se mira a los recicladores por parte de la comunidad
F02	Conocimiento y destreza por parte de los recuperadores, del trabajo realizado	AM2	Falta de conciencia y cultura ciudadana por parte de la comunidad, en separación de residuos sólidos
F03	La existencia del programa de Recuperador Amigo	AM3	Condiciones climáticas cambiantes y complejas de la ciudad
F04	Apoyo de una empresa tan reconocida como EMAS, a los recuperadores y su formalización	AM4	Condiciones topográficas de la ciudad
F05	Permanencia en la labor, por parte de los recuperadores.	AM5	Presencia de habitantes de calle que se llevan los residuos aprovechables, y los no aprovechables los dejan mal dispuestos en la vía
F06	Conocimiento del tema logístico y sus aplicaciones, por parte de EMAS	AM6	Diferente oferta de material según sector. Por ejemplo, barrios de bajos recursos, oferta menos residuos aprovechables
F07	Conocimiento y levantamiento parcial de la información de las rutas en mapas	AM7	Falta de apoyo del usuario y sus hábitos
F08	Amplio conocimiento por parte de los recuperadores, de las rutas que realizan a diario	AM8	Incumplimiento del comparendo ambiental
F09	Los recuperadores valoran el hecho que EMAS, los apoye y tenga un programa que mejore sus condiciones de trabajo	AM9	A pesar que hacen parte del PGIR's, no son incluidos en este
F10	Coordinación con el PGIRS de Manizales		

Tabla 2. Debilidades y oportunidades matriz DOFA

Debilidades		Oportunidades	
DE1	No hay unidad de grupo, por parte de algunos recuperadores	OP1	Manizales, una ciudad con calidad de vida
DE2	Escasa publicidad y promoción del programa de Recuperador Amigo	OP2	Mercado potencial existente para el aprovechamiento y comercialización de residuos sólidos
DE3	Ausencia de vínculo laboral de los recuperadores con EMAS	OP3	Expedición del decreto 596 y el CONPES 3874 de 2016, que trata de la formalización del oficio del reciclador

Debilidades		Oportunidades	
DE4	Ausencia de Estaciones de Acopio Temporal o bodegas cerca a las rutas de recolección, lo cual disminuye la calidad del material recolectado	OP4	Instrumentos a nivel nacional: GUÍA para el cálculo de la tarifa de aprovechamiento y tips de comercialización de materiales que pretenden estandarizar las tarifas de aprovechamiento y recolección de residuos sólidos
DE5	Sentimiento negativo con respecto a EMAS de parte de los recuperadores	OP5	Proyecto “Hacia el reconocimiento y la institucionalización del reciclaje inclusivo en Colombia” del Minvivienda, que pretende: “Incentivar las cadenas de valor inclusivas, fortalecer los Sistemas Urbanos del Reciclaje Inclusivo, crear el Observatorio Nacional de Reciclaje Inclusivo, fortalecer de manera integral a las organizaciones de recicladores y fortalecer las cadenas de valor inclusivas”
DE6	No siempre se cumplen los recorridos de las rutas	OP6	Existencia del Observatorio Nacional de Reciclaje Inclusivo-ONRI
		OP7	Expedición de la resolución 1407 de 2018 sobre la gestión de residuos de envases y empaques en Colombia
		OP8	Objetivos de Desarrollo Sostenible-ODS: 12. Producción y consumo responsables
		OP9	Implementación de la economía circular
		OP10	Buscar acuerdos con Ediles y comunidad del barrio para los más vulnerables

Del lado cuantitativo, en el desarrollo del modelo logístico se analizaron un total de 8 rutas, el modelo de la ruta más corta fue implementado como se presenta a continuación en la ruta denominada Camino del Morro, posteriormente se presentan los resultados globales de todas las rutas de la presente investigación.

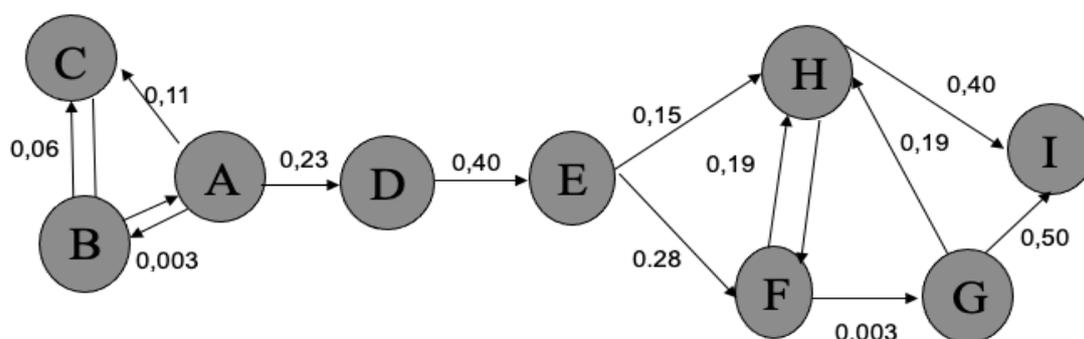
La Figura 1. Mapa de ruta Camino del Morro fue obtenida con el software Arcgis, presenta el camino recorrido en la ruta Camino del Morro- Palermo y constituye el insumo para el análisis y la aplicación del algoritmo del modelo logístico.

Figura 1. Mapa de rutas



Cada una de las 8 rutas analizadas fueron representadas mediante nodos e interacciones. El siguiente diagrama de red (Figura 2) presenta los nodos, relaciones, direcciones e interacciones identificadas en el diseño de la red de la ruta Camino del Morro – Palermo. Cada nodo representa una cuadra en el mapa que muestra la ruta original; mientras, los arcos, son las distancias entre los nodos en kilómetros.

Figura 2. Diagrama ruta Camino del Morro–Palermo



La optimización de los recorridos se obtuvo mediante el algoritmo de la ruta más corta, el cual implementa los siguientes pasos para el ejemplo de la Figura 2:

1. Inicializar todas las distancias en D con un valor infinito relativo, ya que son desconocidas al principio, exceptuando la de x , que se debe colocar en 0, debido a que la distancia de x a x sería 0.
2. Sea $a = x$ (Se toma a como nodo actual.)
3. Se recorren todos los nodos adyacentes de a , excepto los nodos marcados. Se les llamará nodos no marcados vi .
4. Para el nodo actual, se calcula la distancia tentativa desde dicho nodo hasta sus vecinos con la siguiente fórmula: $dt(vi) = Da + d(a,vi)$. Es decir, la distancia tentativa del nodo vi es la distancia que actualmente tiene el nodo en el vector D más la distancia desde dicho nodo a (el actual) hasta el nodo vi . Si la distancia tentativa es menor que la distancia almacenada en el vector, entonces se actualiza el vector con esta distancia tentativa. Es decir, si $dt(vi) < Dvi \rightarrow Dvi = dt(vi)$.

5. Se marca como completo el nodo *a*.
6. Se toma como próximo nodo actual el de menor valor en *D* (puede hacerse almacenando los valores en una cola de prioridad) y se regresa al paso 3, mientras existan nodos no marcados.

Una vez terminado el algoritmo, *D* estará completamente lleno.

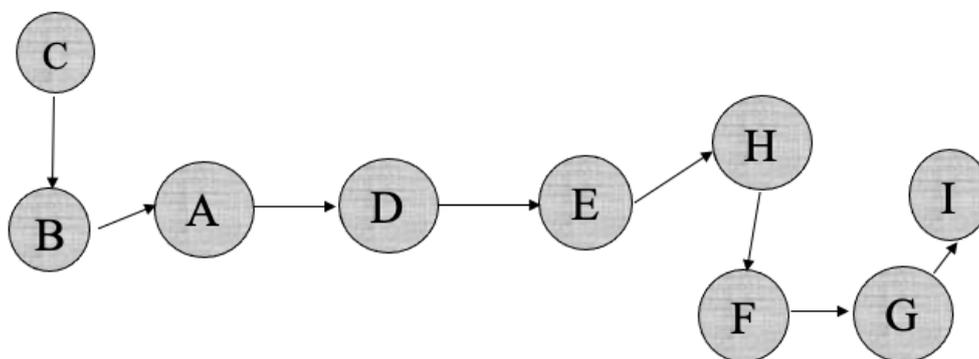
La cantidad de interacciones, distancias y conexiones entre nodos se presentan en la Tabla 3. Distancia mínima ruta Camino del Morro-Palermo, donde se identifica que, en total, la distancia recorrida por un recuperador tras aplicar el modelo de la ruta más corta es de 1,536 Km, su recorrido debe iniciar en el nodo *C* y culminar en el nodo *I*, con un total de 8 interacciones.

Tabla 3. Distancia mínima ruta Camino del Morro-Palermo

Número de iteración	Nodos resueltos conectados directamente a nodos no resueltos	Nodo no resuelto más cercano conectado	Distancia total involucrada	n-ésimo nodo más cercano	Distancia mínima (km)	Última conexión
1	A	B	0,003	B	0,003	AB
2	A	C	0,11	C	0,063	BC
	B	C	0,063			
3	A	D	0,293	D	0,293	AD
4	D	E	0,693	E	0,693	DE
5	E	F	0,973	H	0,843	EH
		H	0,843			
6	H	F	1,033	F, G	1,033	HF O HG
		G	1,033			
7	F	G	1,036	G	1,036	FG
	G	I	1,533			
8	G	I	1,536	I	1,536	GI

Durante el acompañamiento de la ruta en campo se calculó una distancia total recorrida de 1,676 km., mientras la ruta más corta arrojada por el algoritmo implementado (Figura 3) optimiza el recorrido en 8,35 % equivalente a 140 mts. menos de tránsito, que, al considerar la topografía que se tiene en la ciudad de Manizales es un logro significativo en el bienestar del recuperador que opera dicho trayecto.

Figura 3. Ruta más corta Camino del Morro- Palermo



La Tabla 4. Optimización de rutas presenta los resultados de ruta más corta obtenidos en campo y con la aplicación del algoritmo de la ruta más corta. Las distancias recorridas sugieren que las rutas 101 perros-San Jorge, Palermo- Mercaldas y Terminal nuevo- Edificio trivento operan de forma eficiente arrojando resultados idénticos a los del modelo logístico; mientras, las otras 5 rutas pueden tener ajustes en sus recorridos para disminuir las distancias transitadas y optimizar sus procesos de reciclaje.

Tabla 4. Optimización de rutas

Nombre de la ruta	Km recorridos actualmente	Km obtenidos con la aplicación de la ruta más corta	% optimización
Camino del Morro - Palermo	1676	1536	8,35 %
Villa Pilar La Linda	4,800	4,624	3,67 %
101 Perros-San Jorge	300	300	0,00 %
Laureles	998	901	9,72 %
Cementerio - La Enea - Lusitania	1681	1200	28,61 %
La Estrella	1102	1050	4,72 %
Palermo Mercaldas	1527	1527	0,00 %
Terminal Nuevo - Edificio Trivento	900	900	0,00 %

Los resultados sugieren que el algoritmo implementado es eficiente para 5 de las 8 rutas analizadas; las dos rutas más beneficiadas son Cementerio – La Enea – Lusitania con una optimización de 481 km (28,61%) y Laureles con 97 km (9,72%).

5. CONCLUSIONES

La eficiencia en la operación y recorrido de las rutas está afectada por aspectos cuantitativos, como la adaptación de los resultados de la implementación de modelos matemáticos; y por factores cualitativos que inciden en el comportamiento y las decisiones de los recuperadores. Es importante resaltar, que las recomendaciones entregadas a la Empresa Metropolitana de Aseo S.A. E.S.P. EMAS, se basan en el estudio cuantitativo a través del Modelo matemático de

Un modelo de rutas para la recolección de residuos sólidos domiciliarios: un caso de estudio

Lina Clemencia Bustamante Gutiérrez, Ángela María Alzate Álvarez, Paola Alzate

Ruta Óptima y se complementan con recomendaciones en torno al bienestar del trabajador y las oportunidades de mejora identificadas a través del encuentro de tipo social y consolidadas en la Matriz DOFA.

La implementación del algoritmo en la aplicación del modelo de la ruta más corta generó resultados satisfactorios en el 62,5% de los casos estudiados, minimizando las distancias recorridas en porcentajes desde el 3,67% hasta el 28,61%; así mismo, las demás rutas no tuvieron una optimización debido a que los recorridos que venían realizando estaban en dicha situación de eficiencia.

Los resultados en términos matemáticos cumplen las expectativas de optimalidad; sin embargo, se evidencia la necesidad de tener programas ambientales que integren la participación de instituciones, como la Alcaldía Municipal de Manizales y la Empresa Metropolitana de Aseo S.A. E.S.P. (EMAS), gremios, empresas públicas y privadas de forma que contribuyan al desarrollo de la ciudad y cumplan con un papel representativo en el manejo, disposición y aprovechamiento de los residuos generados por la actividad humana a partir de las industrias, el comercio y los hogares.

REFERENCIAS

- Amin, S., Khandaker, M. K., Jannat, J., Khan, F., & Rahman, S. Z. (2023). Cooperative environmental governance in urban South Asia: implications for municipal waste management and waste-to-energy. *Environmental Science and Pollution Research International*, 30(26), 69550–69563.
- Asefi, H., Shahparvari, S., & Chhetri, P. (2019). Integrated Municipal Solid Waste Management under uncertainty: A tri-echelon city logistics and transportation context. *Sustainable Cities and Society*, 50, 101606.
- Ballou, R. H. (2004). *Logística: administración de la cadena de suministro*. Pearson Educación.
- Bustos-Rosales, A., Herrera del Canto, L. E., & Zamora Dominguez, A. R. (2014). Selección de rutas de distribución multiobjetivo para productos perecederos en el mercado de exportación. *Publicación Técnica*, 410. <https://trid.trb.org/view/1366455>
- Calderón, J., Borja, R., & Tapia, B. (2016). RUTA OPTIMA-Implementar métodos de búsqueda para encontrar la ruta más corta entre dos ciudades capitales de Ecuador. *Researchgate.net*. https://www.researchgate.net/profile/John-Calderon-Ortega/publication/303819191_RUTA_OPTIMA_ENTRE_DOS_CIUDADES_CAPITALES_DE_ECUADOR/links/5755a09408ae0405a5754bc8/RUTA-OPTIMA-ENTRE-DOS-CIUDADES-CAPITALES-DE-ECUADOR.pdf (Original work published 2016)
- Campo-Agredo, C. (2017). *Desarrollo de modelos de predicción sobre el hurto a personas en Bogotá a partir del análisis y aplicación de algoritmos en Base de datos*. [Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/eb8371cc-80f2-4259-a53a-27d6680f253d>
- Chandomí-Castellanos, E., Escobar-Gómez, E. N., Velázquez-Trujillo, S., De León, H. R. H., Patricio, M. P., & Pérez, C. V. D. C. (2019). Modelo para la determinación de la ruta más corta con funciones experimentales para arcos difusos. *Research in Computing Science*, 148(8), 317–330.
- Chen, R., Fan, R., Wang, D., & Yao, Q. (2023). Exploring the coevolution of residents and recyclers in household solid waste recycling: Evolutionary dynamics on a two-layer heterogeneous social network. *Waste Management*, 157, 279–289.
- Correa-Orozco, L. M., Alvarez Posada, G. A., & Matos Fernandez, Y. (2021). *Rellenos sanitarios en Colombia, ¿una solución o un problema?* <https://repository.ces.edu.co/handle/10946/5359>
- De Manizales, A. (n.d.). *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos de Manizales*. Retrieved December 6, 2022, from <https://manizales.gov.co/RecursosAlcaldia/201512232000439309.pdf>
- De residuos sólidos en Colombia, I. de E. P. D. del C. I. D. T. Q. I. el D. y. E. del T. (n.d.). *Tratamiento de residuos sólidos en el marco del servicio público de aseo*. https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/20210806-entregable-1-v5-definitiva_0.pdf
- Dickson, E. M., Hastings, A., & Smith, J. (2023). Energy production from municipal solid waste in low to middle income countries: a case study of how to build a circular economy in Abuja, Nigeria. *Frontiers in Sustainability*, 4:1173474, 1-13. <https://doi.org/10.3389/frsus.2023.1173474>

Un modelo de rutas para la recolección de residuos sólidos domiciliarios: un caso de estudio

Lina Clemencia Bustamante Gutiérrez, Ángela María Alzate Álvarez, Paola Alzate

- Dominguez, A., & Richard, J. (2018). *Reducción de costos en las instalaciones de redes eléctricas usando árboles de expansión mínima en una edificación de la región Áncash* – 2018 [Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. <http://www.repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/3364>
- Fadhullah, W., Imran, N. I. N., Ismail, S. N. S., Jaafar, M. H., & Abdullah, H. (2022). Household solid waste management practices and perceptions among residents in the East Coast of Malaysia. *BMC Public Health*, 22(1), 1.
- García-Campoverde, H. (2022). *Aplicación del problema de ruteo de vehículos capacitados en la ciudad de Piura* [Universidad Nacional de Piura]. <https://repositorio.unp.edu.pe/handle/20.500.12676/3426>
- García, J. J. B., Hernández, E. H., & Aleksovski, D. (2013). El problema del enrutamiento de vehículos. Propuestas para la búsqueda del camino más corto. Aplicación al entorno docente y Pymes. *Rect@*, 4(1), 25–42.
- Gelves, O. M., Alarcón, E. P., Puentes, N. B., & Turmequé, K. A. S. (2021). Diseño de una red de ciclo rutas para la ciudad de Bogotá D.C por medio del método de árbol de mínima de expansión. *Cuaderno Activa*, 13(1), 73–80.
- González, C., & Nataly, J. (2018). *Caracterización de la red logística de la empresa Mineralex ubicada en el municipio de Paz del Río- Boyacá* [Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/2619>
- Hashemi-Amiri, O., Mohammadi, M., Rahmanifar, G., Hajiaghaei-Keshteli, M., Fusco, G., & Colombaroni, C. (2023). An allocation-routing optimization model for integrated solid waste management. *Expert Systems with Applications*, 227, 120364.
- Henao, M. I. R., & Betancur, J. A. A. (2006). Planificador de rutas turísticas basado en sistemas inteligentes y sistemas de información geográfica RUTASIG. *Revista Avances En Sistemas E Informática*, 3(2), 43–48.
- Herrera, L. M. M., & Corona, R. M. (2007). Un árbol de expansión mínima en la Bolsa Mexicana de Valores. *Revista de Administración, Finanzas*. <https://ideas.repec.org/a/ega/rafega/200708.html>
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2003). *Introducción a la Investigación de Operaciones*, 5^a edición, McGrawHill. Interamericana de México, SA de CV, México.
- Jaramillo, G., Liliana, H., & Zapata Márquez, M. (2008). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. Retrieved December 6, 2022, from <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/45/1/AprovechamientoRSOUenColombia.pdf>
- Jourdain, C., & Zwolinski, P. (2015). Optimization of a Non-Hazardous Integrated Solid Waste Processing Line. *Procedia CIRP*, 29, 674–679.
- Kouassi, H. K., Murayama, T., & Ota, M. (2022). Life Cycle Analysis and Cost-Benefit Assessment of the Waste Collection System in Anyama, Cote d'Ivoire. *Sustainability*, 14(20), 13062. <https://doi.org/10.3390/su142013062>
- Luz, I., Guevara Ortega, M., & Bogotá, C. (n.d.). *Nodos en corredores logísticos estratégicos que articulan el transporte terrestre de mercancías en Colombia utilizando modelos de grafos*. Retrieved December 6, 2022, from <https://repository.universidadean.edu.co/bitstream/handle/10882/10121/OsorioHugo2020.pdf?sequence=2>
- Mahmoud, A., Taha, Y., Meece, L. E., Bavry, A. A., & Ahmed, M. M. (2022). Effect of Angiotensin II Antagonism on Gastrointestinal Bleeding in Patients With Left Ventricular Assist Devices: A Systematic Review and Meta-Analysis. *ASAIO Journal*, 68(12), 1470–1474.
- Martínez-Bentancor, M., & Mones, P. (2020). Evolutividad en la estructura de precios de la economía uruguaya: una visión desde el análisis redes y árboles de expansión mínima. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/31708>
- Molayzahedi, S. M., & Abdoli, M. A. (2022). A new sustainable approach to integrated solid waste management in Shiraz, Iran. *Pollution*, 8(1), 303–314.
- Nd, C. (2017). *Estudio Nacional del Reciclaje y los Recicladores Informe condensado Aluna Consultores Limitada Informe condensado del Estudio Nacional de Reciclaje*. https://www.academia.edu/32386899/Estudio_Nacional_del_Reciclaje_y_los_Recicladores_Informe_condensado_Aluna_Consultores_Limitada_Informe_condensado_del_Estudio_Nacional_de_Reciclaje

Un modelo de rutas para la recolección de residuos sólidos domiciliarios: un caso de estudio

Lina Clemencia Bustamante Gutiérrez, Ángela María Alzate Álvarez, Paola Alzate

- Noguera, K., & Olivero, J. (2010). Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso colombiano. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 34(132), 347–356.
- Oyedotun, T. D. T., Moonsammy, S., Oyedotun, T. D., Nedd, G. A., & Lawrence, R. N. (2021). Evaluation of waste dynamics at the local level: The search for a new paradigm in national waste management. *Environmental Challenges*, 4, 100130.
- Peña-Orozco, D. L., Universidad del Valle, Buga – Colombia, Urueña-Villamil, J. F., González-Valencia, L. A., Universidad del Valle, Buga – Colombia, & Universidad del Valle, Buga – Colombia. (2016). Diseño de una red logística para una comercializadora ferretera en el centro del Valle del Cauca. *ENTRAMADO*, 12(1), 304–330.
- Purwani, A., Hisjam, M., & Sutopo, W. (2020). Municipal solid waste logistics management: A study on reverse logistics. *AIP Conference Proceedings*. <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2217/1/030181/1025252>
- Reyes-Morales, N. (2016). Modelo de optimización de programación de rutas para una empresa logística peruana usando herramientas FSMVRPTW. *Industrial Data*, 19(2), 118.
- Rojas-Avendaño, M. C. (2022). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos para la generación energía en Bogotá* [Fundación Universidad de América]. <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8899>
- Rozo-Ostos, B. A. (2018). *Optimización exacta para el problema de selección de tiendas y ruteo de compras sostenible para consumidores en grandes ciudades*. <http://hdl.handle.net/1992/45149>
- Singh, R. K., Yabar, H., Mizunoya, T., Higano, Y., & Rakwal, R. (2014). Potential benefits of introducing integrated solid waste management approach in developing countries: A case study in Kathmandu city. *Journal of Sustainable Development in Africa*, 7(6), 70.
- Taha, H. A. (2004). *Investigación de operaciones* 7a edición. Pearson Educación.
- Velásquez, K. T. M., & de Jesús Bedoya Osorio, A. (2009). El Papel de los Residuos Sólidos, En la Solución de Problemas Ambientales. Economía Autónoma. *Servicios académicos Intercontinentales*, issue 3. <https://ideas.repec.org/a/erv/eaeeae/y2009i32.html>
- Villalba-Ferreira, M., Dijkstra, G., Scholten, P., & Sucozhañay, D. (2022). The effectiveness of inter-municipal cooperation for integrated sustainable waste management: A case study in Ecuador. *Waste Management*, 150, 208–217.