

## Obtención de rutas para la distribución de residuos textiles posconsumo con Open Capacitated Vehicle Routing Problem OCVRP multidepósito<sup>1</sup>

Ruth Milena Suárez Castro<sup>2</sup>, Román Leonardo Rodríguez Florián<sup>3</sup>

### Resumen

**Introducción:** El volumen de prendas de vestir posconsumo que son dispuestas anualmente en los rellenos sanitarios está causando afectación ambiental, razón por la que se hace necesaria la búsqueda de alternativas para aprovechar estos desechos. Existen pocas empresas que estén recuperando fibras o generando nuevos productos, sin embargo, la donación y la comercialización son las alternativas más utilizadas. Modelos **Vehicle Routing Problem-VRP** se han enfocado en manejo de residuos sólidos en general, más no se ha estudiado el desecho textil específicamente. **Objetivo:** se propone aplicar un modelo de ruteo para la distribución de las prendas de vestir posconsumo a fundaciones sociales que atiendan población vulnerable o que comercializan prendas de segunda mano. **Materiales y métodos:** se aplicó la heurística *Arco del camino más barato* y la metaheurística *Búsqueda local guiada*, en un modelo OCVRP

multidepósito para minimizar la distancia recorrida por una flota de vehículos con capacidad homogénea, que sale de 10 puntos de acopio hacia 39 fundaciones sociales. **Resultados:** para distribuir 40 toneladas de prendas de vestir posconsumo desde diez puntos de acopio hasta treinta y nueve fundaciones sociales se requiere una flota de 10 vehículos con capacidad de carga de 4,5 toneladas. La mínima distancia para recorrer sería de 180 km con la heurística *Arco del camino más barato* y de 159 km con *Búsqueda local guiada*. **Conclusiones:** las rutas desde múltiples puntos de acopio hacia distintas fundaciones que son obtenidas mediante la aplicación de heurísticas y metaheurísticas son soluciones aproximadas al óptimo, pero más sencillas de encontrar que por métodos exactos.

**Palabras clave:** problema de ruteo de vehículos abierto, ropa posconsumo, acopios, fundaciones.

1 Artículo original derivado del proyecto de investigación titulado *Desarrollo de una propuesta de localización y ruteo aplicado a productos textiles posconsumo en Bogotá*, de la Universitaria Agustiniiana (Colombia), ejecutado entre el 2 de febrero de 2023 y el 30 de noviembre de 2023 por el grupo de investigación Geicos, financiado por Universitaria Agustiniiana.

2 Magister en Ingeniería Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, ingeniera industrial. Docente investigadora y miembro del grupo Geicos de la Universitaria Agustiniiana. Correo: ruth.suarez@uniagustiniana.edu.co, Orcid: 0000-0003-3986-2567.

3 Magister en TIC para la Educación, especialista en Pedagogía y Docencia, ingeniero de producción. Docente investigador y miembro del grupo Geicos de la Universitaria Agustiniiana. Correo: roman.rodriguez@uniagustiniana.edu.co, Orcid: 0009-0008-2693-6890

**Autor para Correspondencia:** ruth.suarez@uniagustiniana.edu.co

Recibido: 26/11/2023 Aceptado: 28/10/2024

\*Los autores declaran que no tienen conflicto de interés

## Obtaining routes for the distribution of post-consumer textile waste with Open Capacitated Vehicle Routing Problem multi-depot OCVRP

### Abstract

**Introduction.** The volume of post-consumer clothing that is disposed of annually in landfills is causing environmental damage, which is why it is necessary to search for alternatives to take advantage of this waste. There are few companies that are recovering fibers or generating new products; however, donation and marketing are the most used alternatives. Vehicle Routing Problem VRP models have focused on solid waste management in general, but textile waste has not been studied specifically. **Objective:** The aim is to apply a routing model for the distribution of post-consumer clothing to social foundations

that serve vulnerable populations or that sell second-hand clothing. **Materials and methods.** The Arc of the cheapest path heuristic and the Guided Local Search metaheuristic are applied in a multi-depot OCVRP model to minimize the distance traveled by a fleet of vehicles with homogeneous capacity, which leaves from 10 collection points to 39 social foundations. **Results.** To distribute 40 tons of post-consumer clothing from 10 collection points to 39 social foundations, a fleet of 10 vehicles with a loading capacity of 4.5 tons is required. The minimum distance to travel would be 180 km with the Path Cheapest Arc heuristic and 159 km with Guided Local Search. **Conclusions.** The routes from multiple collection points to different foundations that are obtained through the application of heuristics and metaheuristics are approximate solutions to the optimal one, but easier to find than by exact methods.

**Keywords:** Open vehicle routing problem, post-consumer clothing, Stockpiles, Foundations.

## Obtenção de rotas para distribuição de resíduos têxteis pós-consumo com Problema de roteamento de veículos capacitados abertos OCVRP multidepósito

### Resumo

**Introdução:** O volume de roupas pós-consumo que é descartado anualmente em aterros sanitários está causando danos ambientais, por isso é necessário buscar alternativas para aproveitar esses resíduos. São poucas as empresas que estão recuperando fibras ou gerando novos produtos, porém, a doação e a comercialização são as alternativas mais utilizadas. Os modelos

Problema de roteamento de veículos VRP têm-se centrado na gestão de resíduos sólidos em geral, mas os resíduos têxteis não foram estudados especificamente. **Objetivo:** O objetivo é aplicar um modelo de roteirização de distribuição de roupas pós-consumo para fundações sociais que atendem populações vulneráveis ou que vendem roupas de segunda mão. **Materiais e métodos:** A heurística Arco do caminho mais barato e a metaheurística Busca Local Guiada são aplicadas em um modelo OCVRP multidepósito para minimizar a distância percorrida por uma frota de veículos com capacidade homogênea, que sai de 10 pontos de coleta a 39 fundações sociais. **Resultados.** Para distribuir 40 toneladas de roupas pós-consumo de 10 pontos de coleta para 39 fundações sociais, é necessária uma frota de 10 veículos com capacidade de carga de 4,5 toneladas. A distância mínima a

percorrer seria de 180 km com a heurística Path Cheapest Arc e 159 km com a pesquisa local guiada **Conclusões:** As rotas de múltiplos pontos de coleta para diferentes fundações obtidas através da aplicação de heurísticas e metaheurísticas são soluções aproximadas da

solução ótima, mas mais fáceis de encontrar do que por métodos exatos.

**Palavras-chave:** Problema de roteamento aberto de veículos, Roupas pós-consumo, Estoques, Fundações.

## Introducción

El aprovechamiento de desechos textiles posconsumo se ha convertido en una necesidad imperiosa para reducir la cantidad de estos residuos que llegan a los rellenos sanitarios. A nivel mundial, el sector textil genera cerca de 40 millones de toneladas de residuos cada año, además de consumir elevadas cantidades de recursos hídricos, de suelo y de materias primas (Amed *et al.*, 2022), razón por la cual es considerada como la segunda industria más contaminante del mundo. Sumado a esto, se generan desechos posconsumo derivados de inventario no vendido, y prendas de vestir que el consumidor ya no desea usar (Eppinger, 2022).

Según datos del (United Nations Environment Programme, 2023), el número de veces que un producto textil se usa antes de desecharlo se ha reducido en aproximadamente 36 % desde 2008. Para 2021 los consumidores de Estados Unidos compraron en promedio 69 prendas anuales, mientras que, en los años 90, el promedio de compra era de 40 prendas al año.

El consumo creciente de prendas de vestir debido a la moda rápida o *Fast fashion* genera como consecuencia el incremento de prendas posconsumo desechadas, aun cuando todavía pueden ser utilizadas, esta situación se presenta tanto en países desarrollados como en países en desarrollo, donde la tasa de reutilización es considerablemente mayor.

En Colombia, el negocio de moda rápida ha tomado fuerza debido al ingreso al país de marcas extranjeras líderes en *Fast Fashion* como Zara, Bershka, Stradivarius entre otras y esto ha repercutido en que empresas nacionales adopten el mismo modelo para mantener competitividad en el mercado (Studio F y Koaj) y con las consecuencias que genera en el ámbito ambiental. Se sabe que para 2019 la producción de textiles dejó 20.759 toneladas de residuos a nivel nacional, sin contar los residuos sólidos que se generan cuando la ropa cumple su vida útil y es desechada por los consumidores. La regulación ambiental en el país aún no está dirigida al sector textil y aunque según el DANE para 2021 los sectores textil, confección, calzado y pieles tuvieron inversiones en protección y conservación ambiental por 14.984 millones de pesos, este esfuerzo no es suficiente para subsanar el impacto ambiental generado por esta industria (DANE, 2022). En el caso de Bogotá, en 2021 llegaron al relleno sanitario Doña Juana 147.000 toneladas de textiles, según cifras de la Unidad Administrativa de Servicios Especiales UAESP (Ramírez, 2022).

Ante este panorama, se han propuesto diversas alternativas para el aprovechamiento de residuos textiles, algunas conocidas como actividades de recolección y donación, reciclaje de circuito abierto y de circuito cerrado. La normativa de la Unión Europea ha obligado a los fabricantes a crear sistemas de recolección de residuos textiles como parte de los programas de responsabilidad extendida del productor, lo que complementa las iniciativas de donación y compra de ropa

de segunda mano, así mismo, se cuenta con programas de donación a entidades de servicio social (Osam-Pinanko, 2020).

En el reciclaje de circuito cerrado, los materiales que componen las prendas de vestir se recuperan e ingresan nuevamente al sistema productivo para la creación de nuevas prendas; en el reciclaje de circuito abierto, los materiales que componen algunos productos se recuperan, pero van a conformar productos de otro tipo de industrias, tal es el caso del PET (tereftalato de polietileno), el cual al ser recuperado es utilizado en la fabricación de tela poliéster (Amed *et al.*, 2022).

En países desarrollados, el reciclaje de circuito cerrado viene en crecimiento, lo que ha impuesto límites a la producción extractiva de materias primas disminuyendo por tanto la generación de residuos textiles, de tal manera que se está convirtiendo en un componente importante de las actividades de desarrollo de productos en el sector (Amed *et al.*, 2022), aun cuando la donación de prendas usadas a familiares o a entidades de caridad es la alternativa más utilizada (Sinha *et al.*, 2022).

A nivel mundial, la alternativa más común consiste en la donación de prendas de vestir posconsumo, sin embargo, a la fecha no se cuenta con el desarrollo de una cadena de suministro enfocada en esta problemática que incluya centros de acopio controlados y tampoco se tiene información precisa sobre el nivel de prendas de vestir posconsumo que se recolectan y se donan, situación generalizada en la mayoría de países (Sandberg, 2023). Hasta ahora están emergiendo empresas de reciclaje de circuito abierto y cerrado, dedicadas a la reintegración de los residuos textiles en la cadena productiva y en la generación de nuevos materiales.

Se busca entonces con este estudio una alternativa que permita la recolección controlada de residuos textiles y la distribución

de las donaciones hacia fundaciones sociales, de esta forma se busca ampliar la vida útil de los productos textiles evitando que lleguen directamente al relleno sanitario, mientras se desarrollan mayores capacidades en las empresas de aprovechamiento de residuos de este tipo.

### Problema de ruteo de vehículos

El problema de ruteo de vehículos (VRP por sus siglas en inglés) es un modelo que fue presentado por Dantzig y Ramser en 1959, como una derivación del problema de vendedor viajero (TSP), el cual busca determinar rutas de bajo costo en tareas de distribución de clientes. Es considerado un modelo de optimización *NP-Hard* debido al elevado número de rutas que pueden surgir cuando se cuenta con varios clientes ubicados en distintas ubicaciones geográficas (Erdelic y Carić, 2019), a quienes se requiere distribuir productos desde un depósito central (Konstantakopoulos *et al.*, 2022). Ha sido estudiado en múltiples casos dada la aplicabilidad que tiene en el ámbito de la investigación de operaciones, manufactura, transporte y logística de distribución.

El modelo básico de VRP analiza el caso de uso de una flota de vehículos con capacidad limitada conocidos como VRP capacitado (Nazari *et al.*, 2018), el modelo considera que todos los vehículos tienen igual capacidad de carga, determinando entonces la ruta de menor costo con la que se atiende a toda la demanda y con la condición de que los vehículos inician su ruta en un depósito central y al finalizar su trayecto regresan a este (Elshaer y Awad, 2020). Sin embargo, en el VRP, se han incluido otros elementos de importancia para la determinación de rutas, como es el caso de limitantes de tiempo que reconocen que los vehículos funcionan por horarios de trabajo fijos y que se denominan como VRP con ventana de tiempo (TWVRP).

Otras variaciones del VRP se conocen como: VRP heterogéneo (HVRP), modelo con múltiples depósitos para cubrir la demanda de los clientes MDVRP (Lahyani *et al.*, 2019), modelo que incluye componentes con comportamientos aleatorios que siguen una distribución de probabilidad (SVRP), modelo en el cual se dividen los clientes en diferentes rutas y vehículos (SDVRP), modelo que no implica el regreso de los vehículos al depósito central (OVRP) (Niu *et al.*, 2018), modelo VRP verde (G-VRP) enfocado en la reducción de emisiones ambientales por combustibles fósiles (Elshaer y Awad, 2020; Erdelic y Carić, 2019), y modelos que buscan analizar las rutas con medios de transporte mixtos como el caso de camiones y drones en tareas de distribución de mercancías (Wang y Sheu, 2019), entre otros.

Para mejorar el manejo de residuos sólidos se han trabajado modelos VRP multiobjetivo (Wang *et al.*, 2020) con flota heterogénea, con capacidad de vehículo variable, así como con velocidad y costos asociados a tareas de distribución y transporte para que el residuo sea reutilizado (Gutiérrez-Sánchez y Rocha-Medina, 2022) Pick-up and Delivery Problem (PDP. Tan solo se ha encontrado un estudio relacionado con la generación de rutas para la distribución de prendas de vestir posconsumo donadas a la Cruz Roja en Suecia y donde las rutas se establecen con ArcGIS On line (Osam-Pinanko, 2020).

Dada la problemática que genera el manejo de prendas de vestir posconsumo, en la que se tienen múltiples puntos de acopio, múltiples fundaciones y donde las rutas son abiertas dado que la ruta termina en una de las fundaciones, se encuentra que el modelo OVRP –que no implica el regreso de los vehículos a los depósitos– es adecuado para la propuesta que se desea obtener. La versatilidad del modelo OVRP se presenta en los estudios relacionados con el transporte con flota aérea, transporte con flota ferroviaria, transporte de pasajeros

por carretera, transporte de mercancías de centros de distribución hacia supermercados, entre otras modalidades.

Aunque la solución con modelos VRP puede realizarse mediante el uso de métodos exactos con solucionadores de programación entera binaria o mediante el uso de métodos aproximados con heurísticas y metaheurísticas, para el caso de los OVRP se han desarrollado técnicas heurísticas y metaheurísticas que como son: *Clark and Wright* (Yousefikhoshbakht y Darani, 2019), *Branch and bound*, *Búsqueda local*, *Búsqueda tabú recocido simulado*, *Colonia de hormigas* (Stodola, 2018) y *Vecino más cercano entre otras*.

Estas técnicas generan soluciones pseudoóptimas, sin llegar a dar soluciones óptimas globales a la minimización de costos de operación, de número de vehículos empleados o de menor distancia a recorrer por cada ruta. Entre las variantes del OVRP se pueden incluir restricciones de capacidad en la flota de vehículos homogénea o heterogénea OCVRP (Hartono *et al.*, 2018) y también existencia de múltiples depósitos MDOVRP (Lahyani *et al.*, 2019). Una forma general de un modelo VRP se presenta a continuación.

Formulación general:

$$\text{MAXIMIZAR } \sum_{i \in V_c} \sum_{k \in K} P_i y_i^k - \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} c_{ij}^k x_{ij}^k - \sum_{j \in V_c} \sum_{k \in K} F^k x_{o^k,j}^k \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k=K} y_i^k = 1 \forall i \in V_M \quad (2)$$

$$\sum_{k=K} y_i^k \leq 1 \forall i \in V_c \setminus V_M \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ij}^k \leq \sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ij}^k \forall j \in V_c, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{p \in S, q \in V \setminus S} x_{pq}^k \geq y_i^k \forall j \in V_c, k \in K, S \subset V: o^k \in S, i \in V \setminus S \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V_c} x_{o^k,j}^k \leq 1 \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{i\}} z_{ji}^k - \sum_{j \in V \setminus \{i\}} z_{ij}^k = \hat{q}_i y_i^k \forall i \in V_c, k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V_c} z_{o^k,j}^k = \sum_{i \in V_c} z_{ij}^k = \hat{q}_i y_i^k \forall k \in K \quad (8)$$

$$w_{ij}^k + z_{ij}^k \leq Q^k x_{ij}^k \forall (i,j) \in A, k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} d_{ij} x_{ij}^k \leq D^k \forall (i,j) \in A, k \in K \quad (10)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \forall (i,j) \in A, k \in K \quad (11)$$

$$y_i^k \in \{0,1\} \forall i \in V_c, k \in K \quad (12)$$

$$z_{ij}^k \geq 0 \forall (i,j) \in A, k \in K \quad (13)$$

Donde se tienen los siguientes elementos

### Índices y notaciones

$VD$ : índice que contiene el conjunto de depósitos  $D = 1$

$VC$ : índice que contiene el conjunto de clientes

$VM \subseteq VC$ : índice de clientes que deben ser visitados

$K$ : conjunto de rutas disponibles.

### Parámetros

- Cliente:

$P_i$ : beneficio por atender a un cliente  $i$

$q_i$ : cantidad a recoger de un cliente  $i$

$d_{i,j}$ : distancia entre clientes

- Vehículo:

$FK$ : costo fijo de utilización del vehículo

$o^k$ : depósito de origen del vehículo

$Q^k$ : capacidad del vehículo

$c_{ij}^k$ : costo de recorrer una distancia usado el vehículo  $k$  en el arco  $i, j$

- Variables binarias:

$x_{ij}^k$ : el vehículo  $k$  usa el arco  $i, j$  (0,1)

$y_i^k$ : el vehículo  $k$  visita al cliente  $i$  (0,1)

$z_{ij}^k$ : cantidad entregada por el vehículo  $k$  en el arco  $i, j$

La función objetivo es la maximización de beneficios mientras se reducen los costos de los arcos activos, lo cual se da mediante distancias más cortas desde cada depósito a cada nodo (1). Restricciones que garantizan que cada cliente sea visitado al menos una vez por parte de los vehículos (2). Restricciones que asignan una visita a cada cliente que deba ser visitado (3). Restricción de conservación del flujo en la red, permitiendo que el vehículo no vuelva al punto inicial (4). Restricción de conexión entre el depósito de origen del vehículo  $k$  y los clientes visitados por este vehículo (5). Restricción que asegura utilizar como máximo una vez cada vehículo (6). Restricciones de la conservación del flujo para el producto de entrega (7) y (8). Restricción que garantiza el cumplimiento de la máxima capacidad del vehículo (9). Restricción de los límites de distancia recorrida (10). Restricciones de integralidad y no negatividad (11), (12), (13).

## Materiales y métodos

El enfoque metodológico de este estudio es cuantitativo y está soportado en la aplicación de un modelo de optimización para solucionar el problema de distribución desde múltiples depósitos con rutas abiertas para la reutilización y aprovechamiento de prendas de vestir posconsumo en fundaciones que atienden población vulnerable o que comercializan ropa de segunda mano. Para este fin se usó el *software* Python con herramientas OR desarrolladas por Google, fue utilizada la heurística *ruta del arco más barato* (*Path cheapest arc*) para la obtención de una solución inicial, posteriormente, se utiliza la metaheurística *búsqueda local guiada* (*Guided local search*), con el propósito de encontrar la mejor asignación de puntos de acopio a fundaciones asegurando la mínima distancia y utilización de vehículos de transporte.

La heurística *Path cheapest arc*, es una técnica que brinda una solución inicial al problema de ruteo y consiste en conectar cada nodo partiendo del nodo de inicio (*Start*) al siguiente nodo, que asegure el arco de ruta más económico y posteriormente va iterando la ruta hasta llegar al último nodo posible. Por otra parte la metaheurística *Guided local search* o *Búsqueda local guiada*, hace parte de las estrategias de búsqueda que permiten escapar a los valores mínimos locales y por ende brinda una ruta más corta para los vehículos, aunque no sea la óptima (Dereci y Karabekmez, 2022; Furnon y Perron, 2019).

Con el fin de obtener la matriz de distancias entre cada uno de los nodos se usó el sistema de información geográfica *Google Maps* para obtener las coordenadas de latitud y longitud de los puntos de acopio y de las fundaciones sociales, para luego obtener las distancias reales de transporte terrestre mediante la *API Bing Maps* de *Microsoft*, que ofrece información más precisa que la técnica de cálculo de

distancia euclidiana, a pesar de ser esta última la más utilizada.

Posteriormente, se utilizó el *software* Python con librería OR *TOOLS* para la solución del problema debido al número de combinaciones posibles a calcular (Dereci y Karabekmez, 2022), razón por la cual este tipo de problemas se definen con *NP-Hard*. Las técnicas utilizadas para dar solución al problema propuesto utilizaron la matriz de distancias, la cantidad de vehículos, la capacidad en toneladas de cada vehículo y las coordenadas de los puntos de acopio para encontrar las soluciones pseudoóptimas, que fueron comparadas. El tipo de vehículo tenido en cuenta para este modelo corresponde a camión tipo turbo rígido de dos ejes, con 21,5 y capacidad de carga de 4,5 toneladas.

## Resultados

Este estudio se centra en la búsqueda de rutas de transporte para la distribución de prendas de vestir posconsumo en la ciudad de Bogotá. Datos obtenidos del Departamento Nacional de Estadística (DANE) sobre la población de Bogotá discriminada por edad, así como la realización de una encuesta con muestra aleatoria a 385 individuos con edades entre 25 y 40 años, permitieron realizar la proyección del desecho de prendas de vestir en toneladas/año.



**Tabla 1.***Proyección prendas posconsumo desechadas en población con edades entre 25 y 40 años*

Proyección desecho t/año	Proyección 50 % desecho t/año	Proyección desecho t/mes	Proyección desecho t/semana	Proyección desecho t/día
20.641	10.321	860	160	40

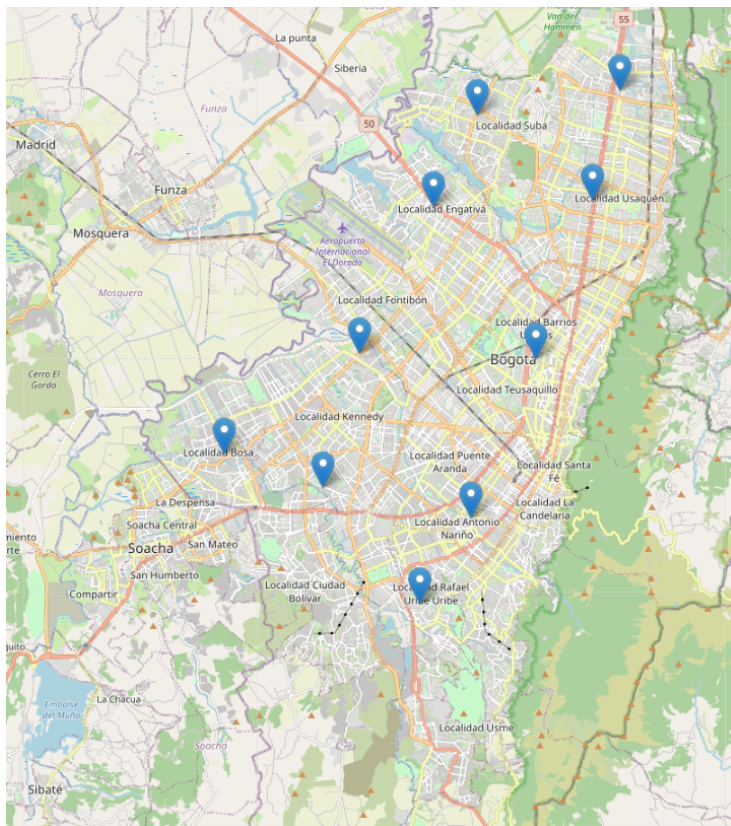
*Nota.* Elaboración propia.

La proyección del desecho de prendas de vestir posconsumo para las 20 localidades de la ciudad de Bogotá se obtuvo a partir de información obtenida en estudio de campo y asciende a 40 toneladas/día, con lo cual se estableció que la cantidad de vehículos necesarios para la distribución de este tipo de prendas corresponde a 10 vehículos con capacidad de 4,5 toneladas en viaje.

A partir de la anterior información, se presenta un modelo de ruteo abierto OCVRP con múltiples depósitos en el que la ubicación y estructura de los distintos puntos de acopio no permite mantener los vehículos estacionados

demasiado tiempo, lo cual obliga a que los vehículos realicen la distribución de las prendas de vestir posconsumo y no retornen a los puntos de acopio.

A partir de esta información, se determinó la ubicación de puntos de acopio en cada localidad mediante la aplicación del método de centro de gravedad, ubicando las coordenadas de cada barrio donde habitan los encuestados y el nivel de desecho de prendas de vestir posconsumo como variable de importancia para la localización de los puntos de acopio. La ubicación geográfica obtenida para cada punto de acopio se presenta en la **figura 1**.

**Figura 1.***Ubicación geográfica de los diez puntos de acopio**Nota. Elaboración propia.*

Se buscó determinar la secuencia de rutas diarias que aseguren la distribución con vehículos de las prendas de vestir hacia las 39 fundaciones que atienden población vulnerable. El modelo considera un área geográfica perteneciente a una ciudad capital, dividida en 20 sectores con demanda diaria determinística y atendida por múltiples puntos de acopio o depósitos.

Para esto, se requiere determinar previamente el tamaño óptimo de la flota de vehículos que logre atender la totalidad de prendas de vestir que se almacenan temporalmente en los puntos de acopio, teniendo en cuenta la capacidad en toneladas de los vehículos, la distribución se desarrolla en una ciudad capital y por tanto los vehículos a utilizar deben atender requerimientos de primera o de última milla, debido al tamaño y facilidad de tránsito por la ciudad.

**Tabla 2.***Parámetros del OCVRP para prendas de vestir posconsumo*

Desecho por distribuir día	40.000 kg	Nodos puntos de acopio	0-9
Capacidad de vehículo	4.500 kg (4,5 t)	Cantidad de fundaciones	39
Vehículos necesarios	10	Demanda día por fundación	1.000 a 1.050kg

*Nota.* Elaboración propia.

Se aplicó entonces un modelo OCVRP multidepósito con 39 fundaciones y 10 puntos de acopio. El modelo tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

- Del total de prendas posconsumo desechadas se pueden donar por su estado el 50 % y llegan a los puntos de acopio.
- Cada vehículo de la flota distribuye una única ruta que inicia en el punto de acopio y termina en una fundación sin retornar al punto de acopio.
- Cada fundación es visitada una sola vez por cada vehículo.
- El total de prendas de vestir posconsumo distribuidas en la ruta no puede exceder la capacidad del vehículo (4,5 t).
- El modelo busca asegurar rutas con la menor distancia posible para atender a todas las fundaciones.
- El modelo se parametrizó con una matriz de distancia en kilómetros, un vector de demanda en kilogramos para cada fundación, un vector de capacidad de vehículos con flota homogénea en kilogramos, un número de vehículos determinado a partir de la cantidad total de desechos esperada, así como un vector de inicio y de finalización. En la **tabla 5** se presentan los resultados obtenidos para el OCVRP multidepósito.

**Tabla 3.**

Extracto de matriz de distancias para 10 puntos de acopio y 39 fundaciones sociales

Matriz de distancias	Altavista Centro Comercial	Unicentro de Occidente	Centro comercial Paseo del Río	Club de Suboficiales de la Fuerza Aérea	Parque La Colina Centro Comercial	Galerías Centro Comercial	Olimpica Bosa Nova	Multiplaza Centro Comercial	Éxito Restrepo	Alcaldía de Usme
Altavista Centro Comercial	0	29	14	24	29	16	16	22	9	8
Unicentro de Occidente	29	0	20	9	12	12	18	12	20	34
Centro Comercial Paseo del Río	14	20	0	17	20	13	7	12	8	18
Club Suboficiales de la Fuerza Aérea	23	9	17	0	7	6	19	11	14	30
Parque La Colina Centro Comercial	29	11	20	7	0	13	22	13	20	38
Galerías Centro Comercial	18	14	13	9	14	0	18	9	9	25
Olimpica Bosa Nova	17	18	7	19	22	17	0	11	13	22
Multiplaza Centro Comercial	18	14	12	12	14	11	11	0	11	26
Éxito Restrepo	10	21	8	16	20	8	13	15	0	16
Alcaldía de Usme	8	34	18	30	34	26	23	27	18	0

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con Dereci y Karabekmez (2022), el modelo OCVRP se resolvió primero mediante la heurística de la *ruta del arco más barato* (*Path cheapest arc*) y luego se analizó con la metaheurística *búsqueda local guiada* (*Guided local search*) (Furnon y

Perron, 2019). A continuación, se presentan los resultados obtenidos con el modelo OCVRP para distribuir 40 t de prendas de vestir posconsumo ubicadas en 10 puntos de acopio hasta 39 fundaciones sociales.

**Tabla 4.**

Resultados obtenidos para el OCVRP multidepósito. Heurística ruta del arco más barato

Ruta	Vehículos	Punto Acopio	Path Cheapest Arc	Distancia km	Carga kg	Índice utilización vehículos
1	1	0. Unicentro de Occidente	0 Load (0) -> 44 Load (1000) -> 43 Load (2000) -> 46 Load (3000) -> 10 Load (3000)	27	3.000	67 %
2	1	1. Club Suboficiales de la Fuerza Aérea	1 Load (0) -> 49 Load (1000) -> 47 Load (2000) -> 45 Load (3000) -> 42 Load (4000)	19	4.000	89 %
3	1	2. Parque La Colina Centro Comercial	2 Load (0) -> 25 Load (1050) -> 22 Load (2100) -> 23 Load (3150) -> 29 Load (4200)	14	4.200	93 %
4	1	3. Galerías Centro Comercial	3 Load (0) -> 21 Load (1050) -> 20 Load (2100) -> 19 Load (3150) -> 16 Load (4200)	27	4.200	93 %
5	1	4. Multiplaza Centro Comercial	4 Load (0) -> 27 Load (1050) -> 14 Load (2100) -> 11 Load (3150) -> 12 Load (4200)	23	4.200	93 %
6	1	5. Altavista Centro Comercial	5 Load (0) -> 18 Load (1050) -> 15 Load (2100) -> 17 Load (3150) -> 13 Load (4200)	6	4.200	93 %
7	1	6. Centro Comercial Paseo del Río	6 Load (0) -> 39 Load (1000) -> 36 Load (2000) -> 37 Load (3000) -> 32 Load (4000)	8	4.000	89 %
8	1	7. Olímpica Bosa Nova	7 Load (0) -> 40 Load (1000) -> 34 Load (2000) -> 31 Load (3000) -> 24 Load (4050)	25	4.050	90 %
9	1	8. Éxito Restrepo	8 Load (0) -> 33 Load (1000) -> 35 Load (2000) -> 38 Load (3000) -> 41 Load (4000)	14	4.000	89 %
10	1	9. Alcaldía de Usme	9 Load (0) -> 48 Load (1000) -> 28 Load (2050) -> 26 Load (3100) -> 30 Load (4150)	17	4.150	92 %
<b>Total</b>				<b>180</b>	<b>40.000</b>	<b>89 %</b>

Nota. Elaboración propia.

El total del recorrido de las 10 rutas corresponde a 180 km, con una carga distribuida total de prendas de vestir posconsumo de 40.000 kg/día (40 t/día).

**Tabla 5.**

Resultados obtenidos para el OCVRP multidepósito. Metaheurística búsqueda local guiada

Ruta	Vehículos	Punto Acopio	Guided Local Search	Distancia km	Carga kg	Índice utilización vehículos
1	1	0. Altavista Centro Comercial	0 Load (0) -> 12 Load (1050) -> 13 Load (2100) -> 17 Load (3150) -> 25 Load (4200)	10	4.200	93 %
2	1	1. Unicentro de Occidente	1 Load (0) -> 37 Load (1000) -> 32 Load (2000) -> 29 Load (3050) -> 27 Load (4100)	24	4.100	91 %
3	1	2. Centro Comercial Paseo del Río	2 Load (0) -> 24 Load (1050) -> 28 Load (2100) -> 26 Load (3150) -> 30 Load (4200)	11	4.200	93 %
4	1	3. Club de Suboficiales Fuerza Aérea	3 Load (0) -> 45 Load (1000) -> 40 Load (2000) -> 34 Load (3000) -> 31 Load (4000)	18	4.000	89 %
5	1	4. Parque la Colina Centro Comercial	4 Load (0) -> 23 Load (1050) -> 22 Load (2100) -> 19 Load (3150) -> 16 Load (4200)	11	4.200	93 %
6	1	5. Galerías Centro Comercial	5 Load (0) -> 18 Load (1050) -> 15 Load (2100) -> 14 Load (3150) -> 11 Load (4200)	12	4.200	93 %
7	1	6. Olímpica Bosa Nova	6 Load (0) -> 39 Load (1000) -> 36 Load (2000) -> 21 Load (3050) -> 20 Load (4100)	13	4.100	91 %
8	1	7. Multiplaza Centro Comercial	7 Load (0) -> 44 Load (1000) -> 43 Load (2000) -> 46 Load (3000) -> 10 Load (3000)	28	3.000	67 %
9	1	8. Éxito Restrepo	8 Load (0) -> 33 Load (1000) -> 35 Load (2000) -> 38 Load (3000) -> 42 Load (4000)	14	4.000	89 %
10	1	9. Alcaldía de Usme	9 Load (0) -> 48 Load (1000) -> 49 Load (2000) -> 47 Load (3000) -> 41 Load (4000)	18	4.000	89 %
<b>Total</b>				<b>159</b>	<b>40.000</b>	<b>89 %</b>

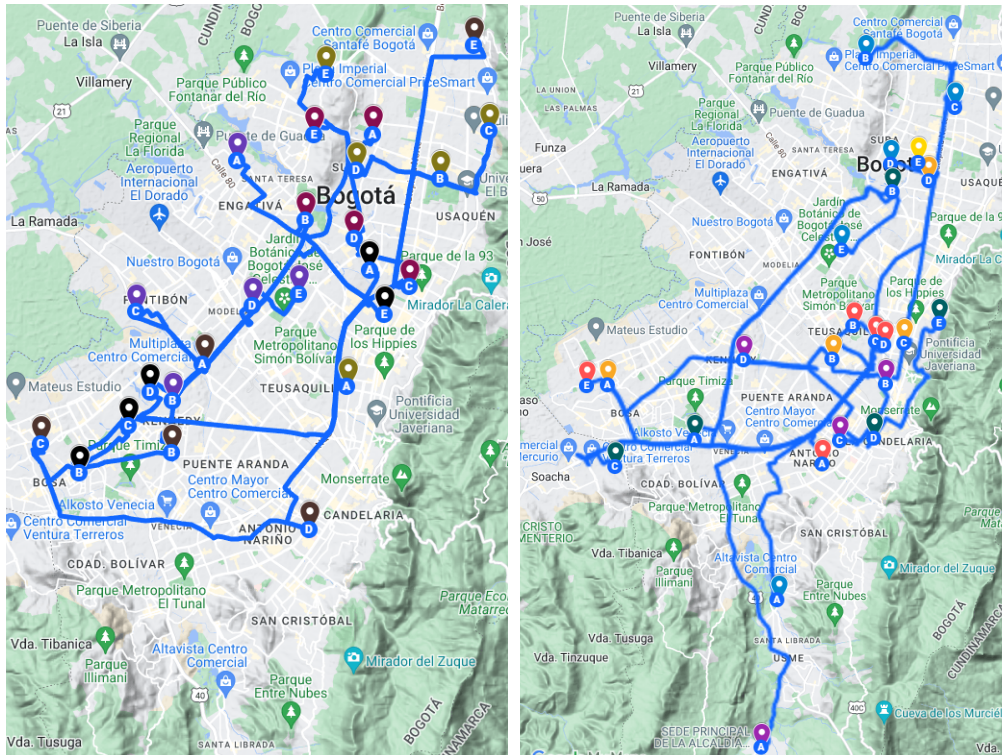
Nota. Elaboración propia.

El total del recorrido de las 10 rutas corresponde a 326 km, con una carga distribuida total de prendas de vestir posconsumo de 97

t/semanal. La **figura 2** presenta las rutas a seguir por los 10 vehículos para la distribución de 40 t de prendas de vestir posconsumo.

**Figura 2.**

*Rutas obtenidas desde puntos de acopio zona norte y zona sur*



Nota. Elaboración propia.

## Discusión

La proyección de toneladas de prendas de vestir posconsumo desechadas para 2023 se tomó sobre la base de que individuos con edades entre 25 y 40 años desechan un promedio de 4,85 kg/año. Sin embargo, al contrastar esta información con la proporcionada por Ramírez (2022), se encuentra que para que se generen 147.000 toneladas en el relleno sanitario cada habitante debió desechan un promedio de 9,38 kg/año. Esto se debe a que el informe de la

UAESP incluye todo tipo de residuos textiles, más allá de las prendas de vestir, razón por la que el valor obtenido es menor.

El cálculo de la matriz de distancias entre los puntos de acopio y las fundaciones sociales se realizó utilizando la App *Bing Maps*, esto con el fin de asegurar que las distancias sean reales y no se incurra en elevadas desviaciones como las proporcionadas por el uso de distancias euclidianas o Manhattan, las cuales asumen que las distancias entre los nodos son rectas.

Es evidente que la técnica metaheurística de *Búsqueda local guiada* proporciona mejores soluciones (Dereci y Karabekmez, 2022), a pesar de no llegar al óptimo. La aplicación de la técnica *Path Cheapest Route*, genera 10 rutas con una distancia mínima de 180 kilómetros semanales y una carga distribuida de 40 t, sin embargo, teniendo en cuenta que la técnica *Path Cheapest* genera rutas pseudoóptimas, se obtiene una mejora en la función de mínima distancia al aplicar *Búsqueda local guiada* con la cual se obtienen 10 rutas de 159 km semanales y una carga distribuida de 40 t, lo que representa una reducción en la distancia total recorrida de 21 km (11,6 %).

## Conclusiones

En este estudio se incluyeron herramientas de ruteo de vehículos VRP para la problemática relacionada con el manejo de desechos por prendas de vestir posconsumo, buscando la distribución del material textil con la menor distancia recorrida. El problema se estudió aplicando un modelo de rutas abiertas para vehículos restringidos por capacidad y con múltiples depósitos, que se abordó utilizando métodos heurísticos y metaheurísticos. Se obtuvieron resultados que permiten proyectar la distribución de prendas de vestir posconsumo desde 10 puntos de acopio hasta 39 fundaciones que atienden población vulnerable.

La aplicación de este modelo puede servir de referencia para la solución de problemas sobre manejo de prendas de vestir posconsumo en otras ciudades, dado que se convierte en una herramienta importante para analizar las variables que inciden en el específico manejo de residuos textiles. La proyección del total de prendas desechadas obtenida muestra un valor menor al presentado en los datos de la UAESP, sin embargo, indica que la cantidad de desechos generados al día corresponde a

40 t, cantidad elevada de desechos para ser manejados solo con estrategias de reutilización por donación o por comercialización de ropa de segunda mano. Se requiere entonces ampliar la capacidad de las empresas que recuperan fibra o que utilizan este tipo de desechos en otros productos para evitar que lleguen a los rellenos sanitarios, acompañado de una gran campaña para implementar el concepto de *slow fashion*.

En trabajos futuros se buscará explorar el modelo incluyendo ventanas de tiempo y demandas probabilísticas, así como el estudio de otras técnicas de resolución, como es el caso de métodos exactos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto Código: INV-2023B-527-Desarrollo de una propuesta de localización y ruteo aplicado a productos textiles posconsumo en Bogotá de la Universitaria Agustiniense, Colombia.



## Referencias

- Amed, I., Berf, A., Balchandani, A., Hedrich, S., Jensen, J. E., Straub, M., Rölkens, F., Young, R., Brown, P., Le Merle, L., Crump, H. and Dargan, A. (2022). *The State of Fashion 2022*. McKinsey and Company. <https://bit.ly/4gbESkO>
- Atefi, R., Salari, M., Coelho, L. and Renaud, J. (2018). The open vehicle routing problem with decoupling points. *European Journal of Operational Research*, 265(1), 316-327. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.07.033>
- DANE. (2022). *Encuesta Ambiental Industrial (EAI)*. *Boletín Técnico*. <https://bit.ly/49k8omj>
- Dereci, U. and Karabekmez, M. E. (2022). The applications of multiple route optimization heuristics and meta-heuristic algorithms to solid waste transportation: A case study in Turkey. *Decision Analytics Journal*, 4. <https://bit.ly/30yTJdv>
- Elshaer, R. and Awad, H. (2020). A taxonomic review of metaheuristic algorithms for solving the vehicle routing problem and its variants. *Computers and Industrial Engineering*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106242>
- Eppinger, E. (2022). Recycling technologies for enabling sustainability transitions of the fashion industry: Status quo and avenues for increasing post-consumer waste recycling. *Sustainability: Science, Practice, and Policy*, 18(1), 114-128. <https://doi.org/10.1080/15487733.2022.2027122>
- Erdelic, T. and Carić, T. (2019). A Survey on the Electric Vehicle Routing Problem: Variants and Solution Approaches. *Journal of Advanced Transportation*, 2019, 1-48. <https://doi.org/10.1155/2019/5075671>
- Furnon, V. y Perron, L. (2019). *Google OR-Tools versión 9.8. Rutas para vehículos*. <https://developers.google.com/optimization/routing/>
- Gutiérrez-Sánchez, A. and Rocha-Medina, L. B. (2022). VRP variants applicable to collecting donations and similar problems: A taxonomic review. *Computers and Industrial Engineering*, 164. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2021.107887>
- Hartono, Y., Puspita, F. M., Permatasari, D. I. and Arisha, B. (6-7 March 2018). *LINGO-based on robust counterpart open capacitated vehicle routing problem (RC-OCVRP) model of waste transportation in Palembang* [Paper]. 2018 International Conference on Information and Communications Technology, Yogyakarta, Indonesia. <https://doi.org/10.1109/ICOIACT.2018.8350689>
- Konstantakopoulos, G. D., Gayialis, S. P. and Kechagias, E. P. (2022). Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: A literature review and classification. *Operational Research*, 22(3), 2033-2062. <https://bit.ly/3Zz6D1n>
- Lahyani, R., Gouguenheim, A. L. and Coelho, L. C. (2019). A hybrid adaptive large neighbourhood search for multi-depot open vehicle routing problems. *International Journal of Production Research*, 57(22), 6963-6976. <https://bit.ly/4iezdwh>
- Nazari, M., Oroojlooy, A., Takáč, M. and Snyder, L. V. (3-8 December 2018). *RL for Solving the Vehicle Routing Problem* [Paper].

- 32nd Conference on Neural Information Processing Systems, Montréal, Canada. <https://bit.ly/4eUczpX>
- Niu, Y., Yang, Z., Chen, P. and Xiao, J. (2018). Optimizing the green open vehicle routing problem with time windows by minimizing comprehensive routing cost. *Journal of Cleaner Production*, 171, 962-971. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.001>
- Osam-Pinanko, B. N. (2020). *Evaluating the reverse logistics and vehicle routing of clothes: A case study for the Swedish Red Cross* [Master Thesis, Vetenskap Och Konst]. <https://bit.ly/4gi3KHU>
- Ramírez, L. J. (27 de junio de 2022). Red Moda Circular: la gran apuesta de Bogotá para disminuir residuos textiles. *Alcaldía Mayor de Bogotá*. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/red-moda-circular-como-disminuir-los-residuos-textiles-en-bogota>
- Sandberg, E. (2023). Orchestration capabilities in circular supply chains of post-consumer used clothes—A case study of a Swedish fashion retailer. *Journal of Cleaner Production*, 387. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135935>
- Sinha, P., Dissanayake, D. G. K., Abeysooriya, R. P. and Bulathgama, B. H. N. (2022). Addressing post-consumer textile waste in developing economies. *Journal of the Textile Institute*, 113(9), 1887-1907. <https://bit.ly/419vwls>
- Stodola, P. (2018). Using metaheuristics on the multi-depot vehicle routing problem with modified optimization criterion. *Algorithms*, 11(5), 74-88. <https://bit.ly/3Zf22zT>
- United Nations Environment Programme. (2023). Sustainability and Circularity in the Textile Value Chain—A Global Roadmap. París: United Nations. Recuperado el 20 septiembre 2023, de <https://www.oneplanetnetwork.org/sites/default/files/2023-10/Full%20Report%20-%20UNEP%20Sustainability%20and%20Circularity%20in%20the%20Textile%20Value%20Chain%20A%20Global%20Roadmap.pdf>
- Wang, X., Choi, T. M., Li, Z. and Shao, S. (2020). An Effective Local Search Algorithm for the Multidepot Cumulative Capacitated Vehicle Routing Problem. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 50(12), 4948-4958. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2938298>
- Wang, Z. and Sheu, J. B. (2019). Vehicle routing problem with drones. *Transportation Research Part B: Methodological*, 122, 350-364. <https://bit.ly/3VlufOT>
- Yousefikhoshbakht, M. and Darani, N. M. (2019). A Combined Metaheuristic Algorithm for the Vehicle Routing Problem and its Open Version. *Journal of AI and Data Mining*, 7(1), 169-179. <https://doi.org/10.22044/JADM.2018.7116.1840>