

# APLICACIÓN DE UN MÉTODO HEURÍSTICO Y MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA EL DISEÑO DE RUTAS VEHICULARES EN LA EMPRESA ECO URBAN S.A DE LA CIUDAD DE TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO

## APPLICATION OF A HEURISTIC METHOD AND MATHEMATICAL MODELING FOR THE DESIGN OF VEHICLE ROUTES IN THE COMPANY ECO URBAN S.A OF THE CITY OF TOLUCA STATE OF MEXICO

<https://doi.org/10.22490/25394088.3835>

<sup>1</sup> Helmer Paz-Orozco, <sup>2</sup> I. Flórez-Burbano, <sup>3</sup> Y. León-Campo

<sup>1</sup>Docente de ingeniería industrial, Corporación Universitaria Comfacaucá – Grupo de investigación Cadenas de Valor.

<sup>2</sup>Docente de ingeniería industrial, Corporación Universitaria Comfacaucá – Grupo de investigación Cadenas de Valor.

<sup>3</sup>Investigadora, Corporación Universitaria Comfacaucá – Grupo de investigación Cadenas de Valor.

Recibido: 20-04-2020 Aprobado 10-06-2020

Citación: Paz Orozco, H. (2020). Aplicación de un método heurístico y modelación matemática para el diseño de rutas vehiculares en la empresa Eco Urban S.A de la ciudad de Toluca Estado de México. *Publicaciones E Investigación*, 14(1). <https://doi.org/10.22490/25394088.3835>

### RESUMEN

El problema de ruteo vehicular, VRP (Vehicle Routing Problem) propone alternativas de solución para Eco Urban S.A. una empresa mexicana encargada de la recolección de material PET (polietileno tereftalato) posconsumo en diferentes puntos de acopio dispersos en la ciudad de Toluca, estado de México; teniendo en cuenta que la empresa no posee un estudio de VRP que le permita elegir de manera eficiente el trayecto a seguir para la recolección del material. Por tal razón se propuso el diseño de una ruta vehicular para la recolección de PET que minimice los costos de transporte asociados a la operación realizada por la empresa, para ello se caracterizó el sistema de recolección actual identificando aspectos relevantes como la capacidad, distancias de recorrido desde la bodega de almacenamiento hasta los puntos de acopio. Luego, se formula el modelo matemático definiendo índices, variables, parámetros y restricciones que limitan la función objetivo para obtener la ruta óptima. Se define y desarrolla el método heurístico de barrido. Finalmente, se analizan y comparan los resultados arrojados por los modelos de estudio y el sistema actual de recolección, exponiendo la mejor ruta vehicular para la recolección de PET que opere al mínimo costo.

**Palabras clave:** ruteo vehicular, recolección, método heurístico, costo, transporte, PET.

<sup>1</sup> hpaz@unicomfacaucá.edu.co, [orcid.org/0000-0003-4661-8538](https://orcid.org/0000-0003-4661-8538).

<sup>2</sup> iflorez@unicomfacaucá.edu.co, [orcid.org/0000-0002-1270-7981](https://orcid.org/0000-0002-1270-7981).

<sup>3</sup> yesikaleon@unicomfacaucá.edu.co, [orcid.org/0000-0002-7321-5892](https://orcid.org/0000-0002-7321-5892).

## ABSTRACT

*The Vehicle Routing Problem, VRP (Vehicle Routing Problem) proposes solution alternatives for Eco Urban SA, a Mexican company in charge of collecting post-consumer PET (Polyethylene Terephthalate) material at different dispersed collection points in the city of Toluca, State of Mexico. , taking into account that the company does not have a VRP study that allows it to efficiently choose the path to follow to collect the material. For this reason, the design of a vehicle route for the collection of PET was proposed, which minimizes the transportation costs associated with the operation carried out by the company. To do this, identifying relevant aspects such as capacity, travel distances from the storage warehouse to the collection points characterized the current collection system. Then, the mathematical model is formulated defining indices, variables, parameters and constraints that limit the objective function to obtain the optimal route. The heuristic sweep method is defined and developed. Finally, the results of the study models and the current collection system are analyzed and compared, exposing the best vehicular route for the collection of PET that operates at minimum cost.*

**Keywords:** Vehicle routing, Collection, Heuristic method, Cost, Transport, PET.



## 1. INTRODUCCIÓN

La caracterización de las cadenas productivas es una actividad fundamental para la gestión eficiente de las cadenas de suministro (García Cáceres & Escobar, 2016). Por tal motivo, la creación de instrumentos para la caracterización de tales cadenas es una actividad previa indispensable (Ramanujan, Bernstein, Chandrasegaran & Ramani, 2017; Bimpikis, Candogan & Ehsani, 2019).

Así diferentes estudios exploran la construcción de herramientas e instrumentos para medir el desempeño de las cadenas (Banomyong & Supatn, 2011), o para la recolección de datos primarios (Oncioiu *et al.*, 2019; Huff *et al.*, 2015).

Un ejemplo de esto es la gestión de la cadena de suministro o SCM (Supply Chain Management) al incluir todas las actividades relacionadas con el flujo y transformación de bienes y productos, desde que se recoge la materia prima hasta que llega al consumidor final (Tavasszy & Friedrich, 2019). El transporte es un área de decisiones clave en la mezcla de la logística, pues incluye la selección del modo de transporte, el tamaño del envío y el diseño de rutas (Xiao *et al.*, 2012). La programación de vehículos y la consolidación de envíos, mejora la eficiencia mediante la máxima utilización de equipos y personal. Lo que es trascendental para disminuir los costos (Galindres Guancha, Toro Ocampo & Escobar

Zuluaga, 2015; Zhang, *et al.*, 2015), de los cuáles los de transporte normalmente se hallan entre un tercio y dos tercios de los costos logísticos totales (Gayialis, Konstantakopoulos & Tatsiopoulos, 2019).

Actualmente, empresas manufactureras como Pet-Star, planta de reciclaje PET marca aliada de Coca-Cola FEMSA México, enfocan esfuerzos organizacionales para integrar un sistema de logística inversa dentro de la SCM que permita lograr una sostenibilidad ambiental para utilizar como materia prima productos posconsumo, con la finalidad de reintegrarlos a la cadena de valor (Abdel-Basset *et al.*, 2020).

Para abastecerse de material suficiente en cantidades constantes, la empresa ha subcontratado la operación de recuperación de PET a empresas locales, dedicadas a la recolección de residuos sólidos, especialmente PET grado alimenticio. Sin embargo, la empresa de este estudio, realiza esta actividad de forma empírica, no existe una planeación o ruta vehicular para transportar el producto de forma efectiva desde los centros de acopio hasta la bodega donde se almacena el material compactado; lo que ha ocasionado continuos incumplimientos al momento de recoger material en los centros de acopio dispuestos por los socios proveedores.

El problema de ruteo vehicular (VRP) es un problema clásico de optimización combinatoria integrado en varias aplicaciones (Sharma, Routroy & Yadav, 2018). Se tiene un centro de almacenamiento, un conjunto de nodos o proveedores dispersos geográficamente y un vehículo para la recolección de producto (PetStar, 2018). Esta investigación caracterizó, diseñó un modelo matemático y evaluó una ruta vehicular para la recolección de PET que minimice los costos de transporte asociados a la operación realizada por la empresa.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Descripción de la empresa

Eco Urban S.A. es una empresa dedicada al acopio y compactación de materiales posconsumo, especialmente de PET. Actualmente, tiene convenios con trece escuelas Unesco (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) y 6 centros divididos en sector público y privado quienes actúan como socios proveedores de PET.



Fig. 1. Cadena de suministro para Eco Urban S.A.

### 2.2. Costos asociados al transporte de producto reciclado

Para el caso de estudio, los costos asociados se realizan en un vehículo de una capacidad de carga de 700 Kg, estos son: costo de mano de obra, combustible, mantenimiento, depreciación (Tabla 1). Se establece que el vehículo se mueve a una velocidad promedio de 30 km/h para la zona urbana, teniendo en cuenta que el máximo permitido para dicha zona es de 40 km/h.

El costo por kilómetro recorrido es definido por la siguiente ecuación:

$$\frac{USD}{km} = \frac{C_{mo} + C_{comb} + C_{mant} + C_{dep}}{V_{veh}}$$

**Tabla 1.** Costo por kilómetro recorrido

Variable	Unidad	Costo
Costo de mano de obra (2 operarios)	USD/h	3.10
Costo de combustible	USD/h	2.49
Costo de mantenimiento	USD/h	3.11
Costo de depreciación	USD/h	2.80
Velocidad promedio	Km/h	30
Costo total	USD/km	0.383

### 2.3. Características del sistema de recolección actual

La empresa realiza la recolección de forma empírica, confiando en la experiencia del conductor para mover y recolectar material por los 19 centros de acopio que deben ser visitados una vez a la semana.

La recolección se realiza durante la jornada de 8:00 am a 5:00 pm que equivalen a 8 horas de trabajo y una hora para descanso. El tiempo promedio de carga de material es de 15 minutos para cargas de 35 kg y 25 minutos para cargas de 70 kg en cada punto de acopio.

Para efectos del caso estudio, se tendrá en cuenta la recopilación de datos sobre tres rutas empíricas que generalmente son recorridas por el vehículo de la empresa, de acuerdo a la cercanía entre los puntos de acopio, los días martes, miércoles y jueves, en donde la bodega de almacenamiento es el punto de origen y llegada para entregar el material recogido y continuar así con los demás procesos logísticos establecidos como recepción, almacenamiento y entrega final (PetStar, 2018).

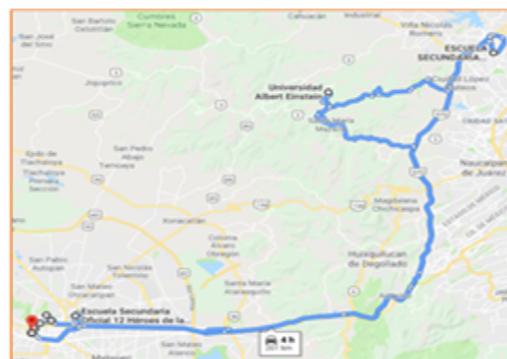
### 2.4. Resumen de la ruta de recolección actual

Como se observa en la Tabla 2 las rutas están integradas por 22 paradas en las que recogerá 1.120 kg de PET recorriendo una distancia total de 307 kilómetros, con un promedio de utilización del vehículo de 53%, en un tiempo total de 828 minutos equivalentes a 13 horas y 48 minutos, a un costo total de 117.89 USD.

### Ruta 1

Ruta comprendida por las escuelas 1, 4, 8, 10, 13, 15, 17 y 19 que son visitadas el día martes. La bodega de almacenamiento es el punto de origen y llegada.

Nº	Nombre
0	Bodega de almacenamiento
1	Esc. Sec. Ofic. N° 0001 “Miguel Hidalgo”
4	Esc. Sec. Ofic. N° 0004 “Dr. Jorge Jiménez Cantú”
10	Esc. Sec. Ofic. N° 0014 “Primero de Mayo”
13	Esc. Sec. Ofic. N° 0547 “Dr. Gustavo Baz Prada”
15	Universidad Albert Einstein
17	Centro Universitario Liceo Mexiquense - CULM
19	Tienda



**Fig. 2.** Puntos de acopio que integran la Ruta 1

### Ruta 2

Ruta comprendida por las escuelas 2, 3, 5, 6, 7, 9, y 14 que son visitadas el día miércoles. La bodega de almacenamiento es el punto de origen y llegada.

Nº	NOMBRE
0	Bodega de Almacenamiento
2	Esc. Sec. Ofic. N° 0002 “Adolfo López Mateos”
3	Esc. Sec. Ofic. N° 0003 “Benito Juárez”
5	Esc. Sec. Ofic. N° 0007 “Estado de México”
6	Esc. Sec. Ofic. N° 0009 “León Guzmán”
7	Esc. Sec. Ofic. N° 0011 “Cinco de Mayo”
9	Esc. Sec. Ofic. N° 0013 “Héroes de Chapultepec”
14	Centro de Desarrollo Infantil Valentina Cantón Arjona

● ● ● **Helmer Paz-Orozco, I. Flórez-Burbano, Y. León-Campo**

Aplicación de un método heurístico y modelación matemática para el diseño de rutas vehiculares en la empresa Eco Urban S.A de la ciudad de Toluca, Estado de México

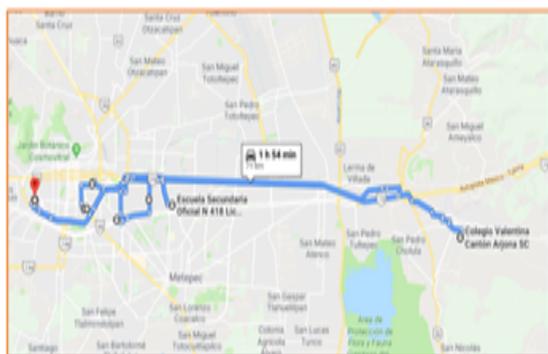
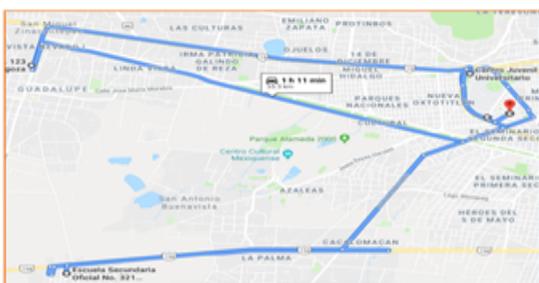


Fig. 3. Puntos de acopio que integran la Ruta 2

**Ruta 3**



Ruta 3 integrada por las escuelas 11, 12, 16 y 18 que son visitadas el día jueves. La bodega de almacenamiento es el punto de origen y llegada.

N°	NOMBRE
11	Esc. Sec. Ofic. N° 0123 “Gral. Ignacio Zaragoza”
12	Esc. Sec. Ofic. N° 0321 “Joaquín Baranda”
16	Facultad de Humanidades
18	Centro Juvenil Universitario - CJU

Figura 4. Puntos de acopio que integran la Ruta 3

**TABLA 2.**

Resumen ruta de recolección actual

Ruta actual empírica	Demanda Kg	Dist. total recorrida Km	Tiempo total min	% Promedio de utilización del vehículo	Costo total ruta USD
Ruta 1	455	201,35	410	65	77,18
Ruta 2	455	70,93	279	65	27,19
Ruta 3	210	35,25	139	30	13,51
Totales	1120	307,53	828	160	117,88

**2.5. Matriz de distancias y coordenadas cartesianas**

Con el fin de generar el modelo de ruteo de vehículos, se optó por ubicar geográficamente los puntos de acopio y la bodega de almacenamiento para realizar la matriz de distancias entre cada nodo, con distancias reales por carretera obtenidas con Google Maps®, utilizando la herramienta UTM®, se convirtieron las coordenadas geodésicas en coordenadas cartesianas.

Posteriormente, se restan las coordenadas cartesianas de la bodega de almacenamiento a las coordenadas de cada punto de acopio, de acuerdo a su respectivo eje, la bodega tiene coordenadas (0,0) y las coordenadas de los puntos de acopio queden organizadas en función a las que corresponden a la bodega.

**TABLA 3.**  
Coordenadas cartesianas para cada punto de acopio

N°	Nombre	Demanda	Coordenadas geográficas		Coordenadas cartesianas		Coordenadas respecto a la bodega (0,0)	
			N	W	X	Y	X	Y
0	Bodega de almacenamiento Eco Urban S.A.	N.A.	19,28031	-99,67457	-5937204,2	2092688,7	0	0
1	Esc. Sec. Ofic. N° 0001 "Miguel Hidalgo"	70	19,29399	-99,6563	-5937033,542	2094118,046	170,6581	1429,3461
2	Esc. Sec. Ofic. N° 0002 "Adolfo López Mateos"	70	19,28343	-99,65788	-5937386,352	2093014,702	182,1517	326,0015
3	Esc. Sec. Ofic. N° 0003 "Benito Juárez"	70	19,27705	-99,64974	-5937759,735	2092348,064	555,5354	-340,6363
4	Esc. Sec. Ofic. N° 0004 "Dr. Jorge Jiménez Cantú"	70	19,2864	-99,67294	-5937013,527	2093325,024	190,6727	636,3243
5	Esc. Sec. Ofic. N° 0007 "Estado de México"	70	19,2859	-99,64588	-5937508,816	2093272,782	304,6159	584,0818
6	Esc. Sec. Ofic. N° 0009 "León Guzmán"	70	19,27725	-99,64845	-5937775,259	2092368,962	571,0591	-319,7382
7	Esc. Sec. Ofic. N° 0012 "Héroes de la Independencia"	70	19,28043	-99,61734	-5938207,905	2092701,239	1403,7045	12,5386
8	Esc. Sec. Ofic. N° 0011 "Cinco de Mayo"	70	19,29951	-99,63325	-5937234,041	2094694,767	984,09	2006,0666
9	Esc. Sec. Ofic. N° 0013 "Héroes de Chapultepec"	70	19,27331	-99,63361	-5938178,463	2091957,264	974,2631	-731,4359
10	Esc. Sec. Ofic. N° 0014 "Primer de Mayo"	70	19,29996	-99,66094	-5936736,42	2094741,781	467,7796	2053,081
11	Esc. Sec. Ofic. N° 0123 "Gral. Ignacio Zaragoza"	70	19,2887	-99,73479	-5935834,799	2093565,338	-1369,4011	876,6377
12	Esc. Sec. Ofic. N° 0321 "Joaquín Baranda"	70	19,25253	-99,73039	-5937215,387	2089785,764	-1118,6	-2902,9363
13	Esc. Sec. Ofic. N° 0547 "Dr. Gustavo Baz Prada"	70	19,59017	-99,3929	-5932432,887	2125035,323	4771,3126	32346,6226
14	Centro de Desarrollo Infantil Valentina Cantón Arjona	35	19,26703	-99,46086	-5941416,801	2091301,036	2691,6005	-1387,6645
15	Universidad Albert Einstein	35	19,54684	-99,23598	-5933512,6	2120515,709	3691,6005	27827,0091
16	Facultad de Humanidades	35	19,27968	-99,67742	-5937176,545	2092622,872	-27,6546	-65,828
17	Centro Universitario Liceo Mexiquense - CULM	35	19,29129	-99,66638	-5936953,077	2093835,948	251,1226	1147,2476
18	Centro Juvenil Universitario - CJU	35	19,28719	-99,6796	-5936867,386	2093407,567	-336,8139	718,8671
19	Tienda	35	19,28502	-99,67126	-5937092,934	2093180,835	111,2664	492,1346

### 3. FORMULACIÓN DEL MODELO DE RUTEO VEHÍCULAR

El objetivo es minimizar la distancia total recorrida y sus costos (Braekers, Ramaekers & Nieuwenhuyse, 2016).

#### 3.1. Supuestos y limitaciones

- Existe un único depósito y cada vehículo inicia y finaliza en él.
- La empresa cuenta con un vehículo para el transporte de material y el vehículo puede o no hacer uso del total de su capacidad de carga.
- Se debe considerar la capacidad del vehículo que es de 700 kg.
- La demanda de cada punto de acopio es conocida, no presenta cambios en el periodo y debe ser atendida en su totalidad por un solo vehículo.
- El tiempo total de la ruta no debe sobrepasar las 8 horas laborales.

- No hay conflicto en los horarios de entrega del producto.
- El tráfico en la ruta asignada es una variable que no se puede controlar ni predecir, por lo tanto, el vehículo estará sujeto al tráfico que pueda existir en la ruta.
- El costo de transporte está asociado a la distancia total recorrida.

#### 3.2. Índices del modelo

Nodos: conjunto de nodos, unión entre puntos de paradas y de depósito, indexados en  $i$  y  $j$ , donde  $i$  difiere de  $j$  ( $i \neq j$ ), y en el que cada uno tiene una demanda conocida (Baldacci, Toth & Vigo, 2010).

$i$ : Nodo de partida  $i \{0,1,2,3, \dots, 19\}$

$j$ : Nodo de llegada  $j \{0,1,2,3, \dots, 19\}$

$n$ : Nodos  $\{0,1,2,3, \dots, 19\}$

$k$ : Vehículo o recurso utilizado  $k \{1\}$

$t$ : Tiempo en semana

TABLA 4.  
Notación básica del problema

Conjunto	Clase de elemento	Indexación	Notación básica
BA = {0}	Bodega de almacenamiento	$i, j$	BA[ $i,j$ ]
PA = {1, 2, 3, ..., 19}	Punto de acopio	$i, j$	PA[ $i,j$ ]
PROD = { $p$ }	PET posconsumo grado alimenticio	$P$	PROD[ $p$ ]
PER = {1}	Periodo de tiempo, semana.	$t$	T
VEH = {1}	Vehículo	$k$	VEH[ $k$ ]

#### 3.3. Parámetros

$C_{mo}$ : costo de mano de obra por hora laboral de transportar el producto  $p \in PROD[p]$  en el vehículo  $k \in VEH[k]$  en la ruta desde  $i \in (BA \cup PA) [i, j]$  hacia  $j \in (BA \cup PA) [i, j]$ .

$C_{comb}$ : costo de combustible consumido en una hora por el vehículo  $k \in VEH[k]$  al recorrer la ruta desde  $i \in (BA \cup PA) [i, j]$  hacia  $j \in (BA \cup PA) [i, j]$ .

$C_{mant}$ : costo de mantenimiento por hora laboral del vehículo  $k \in VEH[k]$  en la ruta desde  $i \in (BA \cup PA) [i, j]$  hacia  $j \in (BA \cup PA) [i, j]$ .

$C_{depr}$ : costo de depreciación del vehículo  $k \in VEH[k]$  en una hora laboral al recorrer la ruta desde  $i \in (BA \cup PA) [i, j]$  hacia  $j \in (BA \cup PA) [i, j]$ .

$V_{veh}$ : velocidad promedio en kilómetros recorridos en una hora.

$DIST_{ij}$ : distancia en kilómetros desde el punto de partida  $i$  hasta el de llegada  $j$ .

$D_j$ : demanda en kilogramos del producto  $p \in PROD[p]$  en el punto de acopio  $j \in (BA \cup PA) [i, j]$ .

$Q_k$ : capacidad en kilogramos del vehículo  $k \in \text{VEH}[k]$

$TR_{ij}$ : tiempo en horas, de recorrido entre  $i \in (\text{BA} \cup \text{PA}) [i, j]$  y  $j \in (\text{BA} \cup \text{PA}) [i, j]$ .

$TS_j$ : tiempo en horas, de servicio en cada punto de acopio  $j \in (\text{BA} \cup \text{PA}) [i, j]$ .

$T_{lab}$ : tiempo laboral, en horas.

$T_{ij}$ : tiempo total de la ruta de recolección, en horas.

### 3.4. Variables de decisión

$Y_{ijk}$ : variable de decisión binaria que toma el valor

de: 1 si se asigna el vehículo  $k \in \text{VEH}[i, j]$  para recorrer el arco del nodo  $\in (\text{BA} \cup \text{PA}) [i, j]$  hacia los puntos de acopio  $j \in (\text{BA} \cup \text{PA}) [i, j]$ . 0 en caso contrario.

$X_{kpijt}$ : variable de decisión binaria que toma el valor de: 1 si se realiza el recorrido en el vehículo  $k \in \text{VEH}[i, j]$  para la recolección del producto  $p \in \text{PROD}[p]$  desde  $\in (\text{BA} \cup \text{PA}) [i, j]$  hacia los puntos de acopio  $j \in (\text{BA} \cup \text{PA}) [i, j]$  en la semana  $t \in \text{PER}$ . 0 en caso contrario.

### 3.5. Función objetivo

El objetivo es encontrar una ruta que opere al mínimo costo total de transporte dependiendo, de la distancia recorrida entre cada nodo, por el vehículo, iniciando la ruta de recolección en la bodega de almacenamiento.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \left( \frac{C_{mo}}{V_{veh}} \right)_{ij} * DIST_{ij} * X_{kpijt} + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \left( \frac{C_{comb}}{V_{veh}} \right)_{ij} * DIST_{ij} * X_{kpijt} \\ & + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \left( \frac{C_{mant}}{V_{veh}} \right)_{ij} * DIST_{ij} * X_{kpijt} + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \left( \frac{C_{depr}}{V_{veh}} \right)_{ij} * DIST_{ij} * X_{kpijt} \end{aligned}$$

### 3.6. Restricciones

El modelo está sujeto a:

- Restricción que hace **obligatoria la asignación** de un vehículo  $k \in \text{VEH}[k]$  a la ruta desde  $\in (\text{BA} \cup \text{PA}) [i, j]$  hacia los puntos de acopio  $j \in (\text{BA} \cup \text{PA}) [i, j]$ , si esta es recorrida.

$$\sum_k Y_{ijk} = X_{kpijt} \quad \forall i, j$$

- Restricción que asegura que el vehículo  $\in \text{VEH}[k]$  **parte** una sola vez de cada origen  $i \in (\text{BA} \cup \text{PA}) [i, j]$ .

$$\sum_{i=0}^n X_{kpijt} = 1 \quad \forall k$$

- Restricción que asegura que el vehículo  $k \in \text{VEH}[k]$  **llega** una sola vez a cada destino  $j \in (\text{BA} \cup \text{PA}) [i, j]$ .

$$\sum_{j=0}^n X_{kpijt} = 1 \quad \forall k$$

- Restricción que asegura que la demanda del producto  $p \in \text{PROD}[p]$  a recolectar debe ser menor o igual a la **capacidad** del vehículo  $k \in \text{VEH}[k]$ .

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n D_i * X_{kpijt} \leq Q_k \quad \forall k$$

- Restricción que asegura que  $Y_{ijk}$  el tiempo total de la ruta de recolección debe ser menor o igual al **tiempo laboral**.

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (TR_{ij} + TS_j) * X_{kpijt} \leq Tlab \quad \forall k$$

- Restricción que **elimina subciclos**, es decir, asegura que el vehículo  $k \in \text{VEH}[k]$  no pase dos veces por la misma ruta.

$$U_i - U_j + nX_{kpijt} \leq n - 1 \quad \forall i \neq j \leq n$$

Donde n: número de nodos y U: variable que representa un entero 1 y n.

- Restricción que asegura que es **binaria**.

$$Y_{ijk} \in \{0,1\} \quad U_i \geq 0$$

- Restricción que asegura que es **binaria**.

$$X_{kpijt} \in \{0,1\} \quad U_i \geq 0$$

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Diseño de rutas por GAMS

La ruta general está integrada por la suma de las dos rutas obtenidas por el software GAMS que recoge 1.120 kg de PET recorriendo una distancia de 250.90 kilómetros y un tiempo de 10 horas y 55 minutos con un costo total de 96,178 USD, como se muestra en la Tabla 5.

TABLA 5.

Resumen de la ruta de recolección arrojada por el software GAMS

Modelo matemático - GAMS	Demanda Kg	Distancia recorrida Km	Tiempo total min	% Promedio de utilización del vehículo	Costo total ruta USD
Ruta 1	700	26,7	316	100	10,235
Ruta 2	420	224,2	439	60	85,943
Totales	1120	250,9	755	80	96,178

### 4.2. Aplicación del método heurístico de barrido

La ruta general está integrada por la suma de las dos rutas arrojadas por el método de barrido y por la secuencia de paradas obtenidas

por el software Logware, que recogen 1.120 kg de PET recorriendo una distancia total de 281.15 kilómetros en un tiempo total 11 horas y 23 minutos con un costo total de 107,774 USD, a continuación, se presentan los datos.

TABLA 6.

Resumen de la ruta de recolección generada por el método de barrido y el software Logware

Heurístico de barrido - Logware	Demanda Kg	Distancia recorrida Km	Tiempo total min	% Promedio de utilización del vehículo	Costo total ruta USD
Ruta 1	595	202,2	454	85	77,51
Ruta 2	525	78,95	339	75	30,26
Totales	1120	281,15	793	80	107,77

### 4.3. Análisis y comparación de resultados

La reducción de la distancia recorrida, porcentaje de utilización y reducción de costos es significativa en comparación a la situación actual de ruteo de la empresa, lo que corrobora que la heurística de barrido es una alternativa válida para este caso. Sin embargo, la

tabla permite identificar que la mejor es la derivada del modelo matemático validado, en la que recorre una distancia de 250.9 km, en un tiempo de 10 horas y 55 minutos, costo de 96,178 USD siendo este 11% al costo de la ruta generada por la heurística de barrido, los resultados son presentados en la Tabla 7.

TABLA 7.

Comparación de la ruta actual y la ruta generada por la modelación propuesta

Descripción	Número de rutas	Demanda Kg	Distancia total recorrida Km	Tiempo total recorrido min	% Promedio utilización del vehículo	Costo total USD	Costo total anual USD
Método de recolección actual	3	1120	307,53	828	53	117,96	6133
Modelo matemático de ruteo vehicular	2	1120	250,9	755	80	96,178	5001
Método heurístico de barrido	2	1120	281,15	793	80	107,774	5604

#### 4.3.1. Análisis de distancia

La distancia de la ruta generada por el modelo en el software GAMS es de 250.9 km, lo que significa una reducción de 19% en la distancia recorrida comparado con la ruta de recolección actual, y un 11% menor a la distancia de la ruta generada por el método heurístico de barrido.

#### 4.3.2. Análisis de tiempo

El tiempo empleado para recorrer la ruta generada por GAMS es de 755 minutos, siendo 9% menor al tiempo empleado en la ruta actual, y un 5% menor al tiempo empleado para recorrer la ruta generada por el método heurístico de barrido.

#### 4.3.3. Análisis de costos de transporte

El costo total de la ruta generada por el modelo en el software GAMS es de 96,178 USD, 19% menor al costo que genera recorrer la ruta actual y 11% menor al costo presentado por la ruta arrojada por el método heurístico de barrido.

La ruta de recolección empírica genera un costo anual de 6.133 USD que, con respecto al costo anual de 5.000 USD de la ruta encontrada por el modelo matemático, representa una reducción de 19% en los costos de transporte.

## CONCLUSIONES

Esto valida que resolver problemas de ruteo vehicular, para establecer la mejor forma de recolección de producto, resulta extremadamente útil no solo en problemas relacionados con el reparto y recogida de productos, sino también en una gran variedad de problemas reales ligados a la logística del transporte y la distribución de bienes teniendo en cuenta que, el costo de productos o servicios depende en gran medida en la forma en las que estos se mueven a través del canal de distribución.

Con la ruta de recolección actual el recurso vehicular es usado al 80% pero, se estima que al modelo se pueden añadir un máximo de cuatro puntos de acopio que representen en conjunto 280 kg de material a recolectar, así la capacidad del vehículo será usada al 100%.

Las propuestas fueron planteadas según la capacidad del vehículo, debido a que este puede transportar como máximo 700 kg de material PET generando así dos rutas que satisfacen la recolección de material en su totalidad.

Se evidencia la necesidad de que la empresa haga un análisis de viabilidad económica para la recolección de material PET en los puntos de acopio 15 y 13 ubicados, pues al ser los puntos más lejanos generan costos

de transporte muy superiores al valor del producto recolectado por lo que se recomienda analizar la posibilidad de buscar nuevos puntos de acopio cercanos a la zona que hagan viable, económicamente, el recorrido hasta ese lugar.

El modelo matemático de ruteo vehicular puede ser modificado dado el caso en que la empresa decida ampliar los puntos de acopio o el número de vehículos manteniendo una flota homogénea; para que en estudios futuros se tomen en cuenta más variables y se evalúen las soluciones que estas generen.

## REFERENCIAS

- Abdel-Basset, M., Mohamed, R., Sallam, K. & Elhoseny, M. (2020). A novel decision-making model for sustainable supply chain finance under uncertainty environment. *Journal of Cleaner Production*, 269(1), 122324. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122324>.
- Baldacci, R., Toth, P. & Vigo, D. (2010). Exact algorithms for routing problems under vehicle capacity constraints. *Annals of Operations Research*, 175, 213-245. <https://doi.org/10.1007/s10479-009-0650-0>
- Banomyong, R., & Supatn, N. (2011). Developing a supply chain performance tool for SMEs in Thailand. *Supply Chain Management*, 16(1), 20-31. <https://doi.org/10.1108/135985411111103476>
- Bektas, T. & Laporte, G. (2011). The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1235-1250. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.02.004>
- Bimpikis, K., Candogan, O. & Ehsani, S. (2019). Supply Disruptions and optimal network structures. *Management Science*, 65(12), 23-24. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2018.3217>
- Braekers, K., Ramaekers, K. & Nieuwenhuyse, I. V. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300-313. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>
- Bussieck, M. (2004). Sistema de modelado algebraico general (GAMS). En: Kallrath J. (ed.). *Modelado de lenguajes en optimización matemática. Optimización Aplicada, vol. 88*. Boston, MA: Springer.
- Clarke, G. & Wright, J. W. (1964). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, 12, 561-568.
- Chacón Rangel, J. G., Flórez Fuentes, A. S. & Rodríguez Fernández, J. E. (2015). La inteligencia artificial y sus contribuciones a la física médica y la bioingeniería. *Mundo FESC*, 5(9), 60-63. <https://www.fesc.edu.co/Revistas/OJS/index.php/mundofesc/article/view/59>
- Galindres Guancha, L. F., Toro Ocampo, E. M., & Escobar Zuluaga, A. (2015). Solución del problema de ruteo capacitado considerando efectos ambientales mediante una técnica híbrida. *Scientia Et Technica*, 20(3), 207-216. <https://www.redalyc.org/pdf/849/84943818002.pdf>
- García Cáceres, R. G. & Escobar, J. W. (2016). Caracterización de las problemáticas de la cadena de abastecimiento. *DYNA*, 83(198), 68-78. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n198.44532>
- Gayialis S.P., Konstantakopoulos, G. D. & Tatsiopoulos, I. P. (2019). Vehicle Routing Problem for Urban Freight Transportation: A Review of the Recent Literature. *Semantic Scholar*, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95666-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95666-4_7)
- Golden, B. L., Magnanti, T. L., & Nguyen, H. Q. (1977). Implementing vehicle routing algorithms. *Networks*, 7(2), 113-148. <https://doi.org/10.1002/net.3230070203>
- Hoyt, J., Huq, F. & Kreiser, P. (2007). Measuring organizational responsiveness: The development of a validated survey instrument. *Management Decision*, 45(10), 1573-1594. <https://doi.org/10.1108/00251740710837979>
- Huff, A. G., Hodges, J. S., Kennedy, S. P. & Kircher, A. (2015). Evaluation of the Food and Agriculture Sector Criticality Assessment Tool (FASCAT) and the Collected Data. *Risk Analysis*, 35(8), 1448-1467. <https://doi.org/10.1111/risa.12377>
- Oncioiu, I., Bunget, O. C., Türkeş, M. C., Căpuşneanu, S., Topor, D. I., Tamaş, A. S., Rakos, I-S. & Hint, M. Ş. (2019). The impact of Big Data Analytics on Company Performance in Supply Chain Management. *Sustainability*, 11(18), 4864. <https://doi.org/10.3390/su11184864>
- PetStar (2018). Planta de Reciclaje PetStar. *Wikipedia*. [https://es.wikipedia.org/wiki/Planta\\_de\\_reciclaje\\_PetStar](https://es.wikipedia.org/wiki/Planta_de_reciclaje_PetStar)
- Ramanujan, D. Bernstein, W., Chandrasegaran, S. K. & Ramani, K. (2017). Visual Analytics Tools For Sustainable Lifecycle Design: Current Status, Challenges and Future Opportunities. *Journal of Mechanical Design*, 139(11), 111-145. <https://doi.org/10.1115/1.4037479>
- Sharma, S. K. Routroy, S. & Yadav, U. (2018). Vehicle routing problem: recent literature review of its variants. *International Journal of Operational Research*, 33(1), 1-31. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2018.094229>
- Tavasszy, L. & Friedrich, H. (2019). Supply Chain elements in freight transport modelling. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 121, 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.11.009>
- Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I. & Xu, Y. (2012). Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 39(7), 1419-1431. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.08.013>
- Zhang, J., Zhao, Y., Xue, W. & Li, J. (2015). Vehicle Routing Problem with Fuel Consumption and Carbon Emission. *International Journal of Production Economics*, 179(part A), 234-242. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.09.031>

