

Optimization of used vehicle oil collection networks

Elio Beltran¹, Pablo Jeger¹, Teresa Unzaga¹, Aníbal M. Blanco² y Humberto Heluane¹

¹ Departamento de Ingeniería de Procesos y Gestión Industrial-FACET-UNT, Av. Independencia 1800, San Miguel de Tucumán, 4000, Argentina. Email addresses: {pjejer, tunzaga; hheluane@herrera.unt.edu.ar}

² Planta Piloto de Ingeniería Química (CONICET), Camino La Carrindanga Km. 7, Bahía Blanca, 8000, Argentina. Email address: ablanco@plapiqui.edu.ar

Abstract. Unlike traditional logistics, which focuses on the delivery of products to customers, reverse logistics involves the return and proper management of products after their use or consumption. Essentially, it refers to the recovery of waste generated by production activities. Used vehicle oil, for instance, has become one of the most abundant liquid pollutants, following wastewater. Improper handling or disposal of this oil is highly dangerous, as even small amounts can contaminate large volumes of water and cause significant environmental harm. To address the uncontrolled disposal of this hazardous waste, this paper proposes a mixed-integer linear optimization model designed to plan the logistics of collecting used vehicle oil from its points of origin, thereby minimizing associated operational costs. The model is tested with a small-scale example to confirm that the optimal routes comply with load and time constraints.

Keywords: Optimization, Reverse Logistics, Used Oil.

Optimización de redes de recolección de aceite vehicular usado

Resumen. A diferencia de la logística tradicional, que se enfoca en el flujo de productos hacia los clientes, la logística inversa se ocupa del retorno y la gestión adecuada de los productos después de su uso o consumo, es decir consiste en la recuperación de los residuos originados por una actividad productiva. El aceite vehicular usado se ha convertido en el contaminante líquido más abundante después de las aguas residuales y si se maneja o se dispone incorrectamente es altamente peligroso, ya que pequeñas cantidades tiene el potencial de contaminar grandes volúmenes de agua potable y además puede causar daños ambientales significativos si se libera al medio ambiente sin la debida gestión. Con el propósito de disminuir la cantidad de este residuo peligroso que queda fuera de control, se plantea en este trabajo un modelo de optimización lineal mixto entero para planificar la logística de recolección del mismo desde los puntos generadores con el fin de minimizar los costos asociados con esta operación. El modelo se testea en este trabajo con una instancia pequeña que permite verificar que las rutas óptimas cumplen las restricciones de carga y tiempos establecidos.

Palabras claves: Optimización, Logística inversa, Aceite usado.

1 Introducción

A diferencia de la logística tradicional, que se enfoca en el flujo de productos hacia los clientes, la logística inversa se ocupa del retorno y la gestión adecuada de los productos después de su uso o consumo, es decir consiste en la recuperación de los residuos originados por una actividad productiva. La logística inversa ha recibido mucha atención recientemente, con aplicaciones de modelado matemático a todo tipo de redes de recolección (Agrawal *et al.*, 2014; Alumur *et al.*, 2012; Chiou *et al.*, 2012; Dat *et al.*, 2012).

La logística inversa desempeña un rol fundamental ya que permite la recuperación y el reciclaje de productos, evitando su disposición inapropiada, especialmente si estos son potencialmente peligrosos, al fomentar la reutilización, el reciclaje y el adecuado manejo de residuos, contribuyendo a la conservación de los recursos naturales y a la reducción del impacto ambiental (Ahluwalia *et al.*, 2006; Ardjmand *et al.*, 2015; Gomes *et al.*, 2008; Matar *et al.*, 2014). Su utilización es ampliamente difundida en países donde existen regulaciones o leyes específicas sobre el manejo de residuos. Otro aporte de la logística inversa es la posibilidad de dar valor económico a productos o materiales después de su uso y así integrarlos nuevamente a la cadena de valor (Clottey *et al.*, 2012; Giannetti *et al.*, 2013; Park, 2014).

El aceite vehicular usado de origen mineral es un contaminante cuyo manejo y disposición inadecuada representan un grave riesgo ambiental, ya que incluso pequeñas cantidades tienen el potencial de contaminar grandes volúmenes de agua como ríos, lagos y acuíferos. Además, los aceites que han sido usados en motores generalmente contienen aditivos y compuestos tóxicos generados en la combustión, que si se derraman o se disponen en el suelo, pueden afectar su calidad y fertilidad, perjudicando la agricultura y los ecosistemas terrestres. Por otra parte, su incineración, una práctica común en varias actividades industriales, produce emisiones de gases de efecto invernadero.

Minimizar el impacto ambiental causado por el aceite vehicular usado es posible mediante la aplicación de estrategias de logística inversa que permitan una gestión eficiente de su recolección y disposición final, evitando de este modo que el residuo sea utilizado inapropiadamente, ya que es practica usual de los nodos generadores de aceite usado entregarlo por ejemplo para ser incinerado o verterlo en caminos de tierra en reemplazo de asfalto sin ningún control. Para asistir en la gestión de estos sistemas, se pueden implementar herramientas de optimización, que permiten modelar y resolver problemas logísticos y de ruteo óptimo. Dada la gran importancia práctica que tienen estas técnicas, existen numerosas publicaciones que abordan una amplia variedad de aplicaciones, modelos y métodos de resolución. (Toth *et al.*, 2014; Baldacci *et al.*, 2012; Golden *et al.*, 2008; Laporte *et al.*, 2013).

En este trabajo, utilizando como herramienta la programación matemática, se estudia la logística de recolección de aceite vehicular usado desde diferentes puntos generadores para almacenarlos en un depósito con el fin de tenerlo disponible para un posterior reciclaje. El objetivo del modelo de optimización es determinar las rutas óptimas que permitan recolectar el residuo a un costo mínimo. Ya que los sistemas de

transporte que utilizan combustibles fósiles son uno de los principales generadores de gases de efecto invernadero, se contemplan en la función objetivo tanto los costos de combustible como los asociados a las emisiones de carbono, de manera de incentivar una toma de decisión más responsable en la gestión de transporte.

2 Planteamiento del Problema

La recolección de residuos requiere el uso de camiones que cumplan con la normativa vigente con respecto a la circulación en ciudades, respetando tamaño y peso de la carga. Además, se necesita conocer la ubicación de todos los puntos generadores y la cantidad promedio de aceite usado generado por semana o mes para poder planificar la logística. Por otro lado, también se debe establecer la ubicación del depósito donde se acopiará el residuo y determinar las distancias de ida y vuelta entre dicho depósito y los puntos generadores, como así también entre todos los puntos generadores entre sí.

El problema que se quiere resolver se puede resumir de la siguiente manera.

Dados:

- Los puntos generadores de aceite usado
- La cantidad de aceite generado por cada uno de los puntos
- La ubicación del centro de acopio del residuo
- Las distancias entre todos los nodos
- La flota de camiones disponible que realizará la recolección, capacidad máxima y características de los mismos.
- El costo unitario de transporte
- El costo de C en CO₂ equivalente

Se quiere determinar:

- La cantidad de viajes de recolección que deben realizarse
- El recorrido que debe realizarse en cada viaje
- la distancia recorrida en cada viaje
- El tiempo de duración de cada viaje
- La carga recolectada en cada viaje
- Los costos de operación y ambientales

3 Formulación matemática

3.1 Función objetivo

El objetivo es minimizar los costos variables de recolección del aceite vehicular usado generado en estaciones de servicio o lubricentros y el costo de las emisiones de carbono. La Ecuación (1) se usa como función objetivo.

$$C = C_u \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M D_{ij} x_{ijk} + (C_d + w C_c) \left(\sum_{i=1}^N Cmo1_i + \sum_{j=1}^N Cmo2_j + \sum_{k=1}^M Cmo3_k \right) \quad (1)$$

Donde N es el número de total de nodos de la red que incluye los puntos generadores de residuo y el depósito de aceite. El depósito se define como nodo 1. El parámetro M corresponde al número máximo de viajes de recolección permitidos. La variable binaria x_{ijk} toma el valor 1 cuando el tramo de ruta entre el nodo i y el nodo j se realiza en el viaje k .

El primer término corresponde a los costos variables del transporte los cuales contemplan gastos en lubricantes, filtros, neumáticos y mantenimiento general de los vehículos. Estos gastos se asumen proporcionales a las distancias recorridas. El segundo término permite modelar el costo de combustible y el costo de carbono, el cual evalúa el impacto ambiental generado por las emisiones de CO_2 producido por vehículos que utilizan combustibles fósiles durante el transporte.

Se asume que el consumo de combustible por unidad de distancia varía con la carga transportada de manera lineal (Kang *et al.*, 2019) como se muestra en la Ecuación (2).

$$\rho = \rho_o + \frac{\rho_f - \rho_o}{Q_T} G \quad (2)$$

donde:

ρ : consumo específico correspondiente a una carga G [L de combustible/km].

ρ_o : consumo específico cuando el camión está vacío [L de combustible/km].

ρ_f : consumo específico cuando el camión transporta la carga máxima [L de combustible/km].

Q_T : carga máxima admitida por el vehículo [L de aceite].

G : carga transportada [L de aceite].

Para modelar los costos asociados al consumo de combustible y emisión de carbono se clasificaron los tramos de las rutas en tres grupos, considerando que estos dependen de la distancia recorrida y de la carga transportada.

a) Tramos desde el depósito hacia el primer nodo

En cada viaje k , el tramo de ruta que va desde el nodo 1 al nodo i (primer nodo de la ruta k), la carga transportada por el camión es nula ($G_i = 0$), esta condición se expresa mediante la siguiente ecuación.

$$G_i \leq BIGM (1 - x_{1ik}) \quad \forall i, k \quad (3)$$

En estos tramos de ruta, el consumo de combustible ($Cmo1_i$) se calcula con las Ecuaciones (4) y (5) y tendrá valor distinto de cero solamente cuando la variable binaria x_{1ik} tome el valor 1.

$$Cmo1_i - \rho_o D_{1i} \leq BIGM (1 - \sum_{k=1}^M x_{1ik}) \quad \forall i \quad (4)$$

$$\rho_o D_{1i} - Cmo1_i \leq BIGM (1 - \sum_{k=1}^M x_{1ik}) \quad \forall i \quad (5)$$

b) Tramos entre dos nodos de generación cualesquiera

En un viaje k , para cualquier tramo de ruta entre dos nodos i y j tal que $i \neq 1$ y $j \neq 1$, con lo cual x_{ijk} toma el valor 1, la cantidad de aceite recolectada hasta llegar al nodo j inclusive se calcula mediante la Ecuación (6).

$$G_j = G_i + Q_i \quad (6)$$

donde:

G_j : es la carga del camión que llega al nodo j

G_i : es la carga del camión que llega al nodo i

Q_i : es la carga recolectada en el nodo i

La Ecuación (6) se modela mediante las Ecuaciones (7) y (8), donde $i \neq 1$ y $j \neq 1$.

$$G_j - G_i - Q_i \leq BIGM (1 - x_{ijk}) \quad \forall i, j, k \quad (7)$$

$$G_i + Q_i - G_j \leq BIGM (1 - x_{ijk}) \quad \forall i, j, k \quad (8)$$

Las expresiones para el cálculo del consumo de combustible correspondiente a estos tramos, ($Cmo2_j$) son las Ecuaciones (9) y (10).

$$Cmo2_j - \left(\rho_o + \frac{\rho_f - \rho_o}{Q_T} G_j \right) D_{ij} \leq BIGM (1 - \sum_{k=1}^M x_{ijk}) \quad \forall i, j \quad (9)$$

$$\left(\rho_o + \frac{\rho_f - \rho_o}{Q_T} G_j \right) D_{ij} - Cmo2_j \leq BIGM (1 - \sum_{k=1}^M x_{ijk}) \quad \forall i, j \quad (10)$$

c) Tramos de regreso al depósito

Cuando el camión recolector que realizó el viaje k vuelve a dejar la carga en el depósito ($j=1$) desde el último nodo i visitado, $x_{i1k}=1$, existe un consumo de combustible asociado a ese último tramo del recorrido, denominado $Cmo3_k$.

El cálculo de dicho consumo se realiza mediante las siguientes ecuaciones.

$$Cmo3_k - \left[\rho_o + \frac{\rho_f - \rho_o}{Q_T} (G_i + Q_i) \right] D_{i1} \leq BIGM (1 - x_{i1k}) \quad \forall i, k \quad (11)$$

$$\left[\rho_o + \frac{\rho_f - \rho_o}{Q_T} (G_i + Q_i) \right] D_{i1} - Cmo3_k \leq BIGM (1 - x_{i1k}) \quad \forall i, k \quad (12)$$

3.2 Restricciones del modelo

Mediante la Ecuación (13), se anula la posibilidad que el nodo origen y destino sean el mismo.

$$x_{ijk} = 0 \quad \forall i = j, \forall k \quad (13)$$

La Ecuación (14) obliga a que el camión recolector que ingresa a un nodo, debe salir de dicho nodo.

$$\sum_{i=1}^N x_{ijk} = \sum_{i=1}^N x_{jik} \quad \forall j, k \quad (14)$$

La Ecuación (15) obliga a que cada nodo sea visitado una única vez.

$$\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N x_{ijk} = 1 \quad \forall j \geq 2 \quad (15)$$

Se debe cumplir la condición de que la cantidad máxima de viajes que se inician en el nodo 1 debe ser a lo sumo M y ello se expresa mediante la Ecuación (16).

$$\sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^N x_{1jk} \leq M \quad (16)$$

En cada viaje, cada tramo debe ser único, es decir, desde cada nodo sólo debe existir un único nodo destino, esta condición se logra mediante la Ecuación (17).

$$\sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ijk} = 1 \quad \forall i \geq 2 \quad (17)$$

La Ecuación (18) evita que las distintas rutas k que parten del depósito puedan tener el mismo destino.

$$\sum_{j=1}^N x_{1jk} \leq 1 \quad \forall k \quad (18)$$

Se utiliza la formulación de Miller-Tucker-Zemlin para generar las rutas para cada uno de los k viajes eliminando las rutas que no salgan y vuelvan al depósito. Esto se logra mediante las Ecuaciones (19) a (21) (Miller *et al.*, 1960).

$$u_{ik} - u_{jk} + (N - 1) x_{ijk} \leq N - 2 \quad \forall k \quad \forall i, j > 1, i \neq j \quad (19)$$

$$u_{ik} \geq 1 \quad \forall k \quad \forall i > 1 \quad (20)$$

$$u_{ik} \leq N - 1 \quad \forall k \quad \forall i > 1 \quad (21)$$

Donde u_{ik} es una variable entera auxiliar para formar ciclo de la ruta de cada camión.

Las Ecuaciones (22) y (23) representan la carga máxima admitida del camión a utilizar en cada viaje, que, para evitar derrames, debe ser inferior al 95% de la capacidad nominal del mismo.

$$UP_k = 0,95 P_k \quad \forall k \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N Q_j x_{ijk} \leq UP_k \quad \forall k \quad (23)$$

La Ecuación (24) representa el tiempo necesario para realizar cada viaje k , el cual no debe superar el tiempo de operación establecido.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[\left(\frac{Q_j}{q_p} + t_m + \frac{D_{ij}}{S_T} \right) x_{ijk} \right] + \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N Q_j x_{ijk}}{q_p} \leq t_{op} \quad \forall k \quad (24)$$

donde:

$\frac{Q_j}{q_p}$: tiempo necesario para cargar el camión en cada nodo.

$\frac{D_{ij}}{s_T}$: tiempo necesario para realizar el recorrido entre los nodos i y j .

t_m : tiempo muerto necesario para realizar las gestiones administrativas en cada nodo donde se colecta aceite.

$\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N Q_j x_{ijk}}{q_p}$: tiempo de descarga del aceite en el depósito.

El modelo de optimización descrito mediante las variables y ecuaciones arriba definidas es lineal mixto entero (MILP).

4 Caso de estudio

A modo de ejemplo, se propuso un número acotado de centros de generación de aceite vehicular usado para comprobar el funcionamiento del modelo desarrollado. En particular se analiza un sistema de 10 centros de generación de aceite y un depósito de almacenamiento. Las distancias de todos los puntos considerados se muestran en la Tabla 1, donde el punto 1 corresponde al depósito o centro de acopio. En la Tabla 1 también se detalla la cantidad de aceite a recolectar en cada nodo generador.

El costo variable unitario es de 0,173 U\$/km, el asociado al combustible es de 0,915 U\$/L. El costo de C en emisión de CO₂ es de 2 U\$/ton de CO₂ equivalente (<http://www.carbonneutralplus.com>).

Se propone utilizar camiones de 5000 L de capacidad nominal con lo cual se cumple con la legislación vigente para la ciudad con respecto a la carga admisible para la circulación de vehículos. Se considera que los camiones estarán provistos de bombas de succión de 50 L/min, y operarán a lo largo de una jornada laboral de 8 horas. Se considera un tiempo muerto, necesario para maniobrar el vehículo y realizar tareas administrativas necesarias para poder retirar el aceite de 20 min en cada nodo. La velocidad promedio de circulación del camión se estima en 30 km/h.

Como se puede ver en la Tabla 1, la distancia desde un nodo i a otro j no es necesariamente igual que la distancia para ir desde j a i , debido al sentido de circulación de las calles de la ciudad. Por ejemplo, la distancia para ir desde el centro de acopio (nodo 1) al nodo generador 2 es de 4,4 km, mientras que para ir desde el nodo 2 al 1 es de 3,8 km.

Solución

El valor de la función objetivo para la instancia proporcionada es de U\$D 16,38, distribuidos de la siguiente manera: U\$D 8,30 en combustible, U\$D 8,03 en otros costos variables y U\$D 0,047 en costo de C en emisiones de CO₂ equivalente.

Las rutas óptimas obtenidas se pueden visualizar en la Figura 1. En la Tabla 2 se detallan el volumen de aceite recolectado, distancia recorrida y tiempo utilizado en cada ruta óptima.

Tabla 1. Distancias entre nodos [km] y cantidad de aceite a recolectar en cada nodo [l/semana]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	4,4	3,2	3,5	5,4	1,2	2,7	5,3	3,5	6,7	5,1
2	3,8	0	2,2	6,1	7,5	5,6	2,7	5,6	8,2	3,5	2,5
3	2,9	1,2	0	4,7	6,8	3,4	1,9	6,6	6,3	3,6	3,6
4	3,7	6,3	5,7	0	2,0	4,9	4,7	4,4	6,1	8,6	4,3
5	5,5	7,1	7,4	2,4	0	6,6	5,5	5,2	7,5	8,8	5,2
6	1,7	5,6	2,9	4,6	6,8	0	2,6	6,8	3,5	6,5	6,9
7	2,8	3,0	2,3	4,1	4,8	3,0	0	6,0	6,2	3,9	1,7
8	5,1	6,1	7,0	4,1	5,3	6,3	5,1	0	7,4	10,0	3,2
9	3,8	8,9	6,1	5,7	6,7	3,2	5,9	7,6	0	9,8	7,4
10	5,9	3,3	3,3	7,2	9,3	6,1	4,4	10,9	9,4	0	5,3
11	4,7	2,4	4,3	4,3	5,5	5,3	2,9	3,0	7,7	5,8	0
Q	–	1000	800	800	800	1000	2500	1500	2500	1500	1500

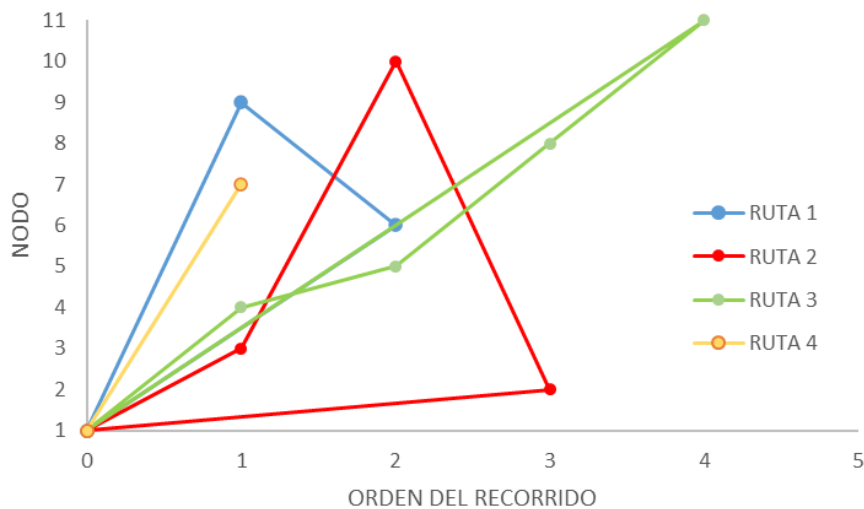


Fig. 1: Rutas óptimas del Caso de Estudio

Tabla 2: Volumen de aceite recolectado, tiempo y distancia recorrida en cada ruta

Ruta	Vol. de aceite recolectado [L]	Tiempo usado [h]	Distancia [km]
1	3500	3,61	8,4
2	3300	3,99	13,9
3	4600	5,35	18,6
4	2500	2,52	5,5

Nótese que todos los nodos son visitados sólo una vez, cada ruta comienza y termina en el centro de acopio (nodo 1) y en cada ruta el vehículo carga un volumen inferior a la capacidad permitida, de acuerdo a la restricción impuesta ($0.95 \times 5000 \text{ l} = 4750 \text{ l}$). Así también se puede observar que el tiempo invertido en realizar cada viaje es inferior a la jornada laboral establecida de 8 h.

De acuerdo a la solución óptima obtenida, se necesitan realizar 4 viajes. Por lo que esta tarea podría realizarse utilizando un único camión recolector, trabajando dos días a la semana, haciendo dos viajes cada día, o dos camiones trabajando un día a la semana, realizando dos viajes cada uno. Otra alternativa de recolección es utilizar cuatro camiones que realicen un único recorrido a la semana.

La solución óptima (Gap=0.099%) fue obtenida en 3219 segundos en un procesador Intel Core i3-5005 U y 8 Gb de memoria RAM. El modelo para el Caso de Estudio tiene 1640 ecuaciones, 570 variables de las cuales 524 son binarias y fue implementado en GAMS (Brooke *et al.*, 1992) usando CPLEX como optimizador.

5 Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un modelo matemático para optimizar la logística de recolección de aceite vehicular usado en ciudades, para ser almacenado en depósitos para su posterior reciclado o disposición de manera adecuada. El modelo de optimización resultó ser lineal mixto entero (MILP).

El objetivo es determinar las rutas óptimas para la recolección del residuo, minimizando los costos operativos y ambientales. Dado que los sistemas de transporte basados en combustibles fósiles son una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero, se consideran tanto los gastos asociados al transporte como a las emisiones de carbono como CO_2 equivalente. Esta integración permite incentivar una toma de decisiones más responsable en la gestión del transporte buscando no solo minimizar los costos económicos, sino también reducir el impacto ambiental del sistema de recolección, contribuyendo a la sostenibilidad y cumplimiento de compromisos climáticos. La resolución del modelo permite, además, determinar el tiempo consumido para realizar cada viaje, las distancias recorridas y el volumen de aceite recolectado en cada ruta.

A modo de ejemplo y para poder mostrar el desempeño del modelo, se consideró un sistema pequeño con 10 nodos de generación. La solución obtenida muestra que se deben realizar cuatro viajes para recolectar la totalidad del aceite disponible. En todos

ellos se invierte menos tiempo que el correspondiente a la jornada laboral y los camiones regresan al depósito sin colmar su capacidad total.

Cabe notar que el costo de carbono resultante es significativamente inferior a los costos asociados al transporte, pero en el futuro el precio del carbono podría aumentar para poder alcanzar las metas actuales de descarbonización definidas en el acuerdo de París.

Como trabajo futuro se prevé aplicar el modelo desarrollado al sistema completo de generación de aceite de la ciudad de San Miguel de Tucumán consistente en 69 nodos de generación de residuo. Además, se incluirá en el modelo la condición de que cada camión alcance su capacidad máxima antes de regresar al depósito, aunque algunos nodos deban ser visitados más de una vez, con el objetivo de determinar si esta estrategia es más eficiente económica y ambientalmente. En paralelo a estos trabajos, se utilizarán metaheurísticas para encontrar soluciones al caso que involucra la totalidad de los nodos.

Nomenclatura

C	Costo de operación total [€]
C_c	Costo de C en emisiones de CO ₂ [€]
C_u	Costo variable unitario sin tener en cuenta el combustible [€/km]
C_d	Costo del combustible [€/L]
$Cmo1$	Consumo de combustible para ir del nodo 1 al nodo i con $i \neq 1$ [L]
$Cmo2$	Consumo de combustible para ir del nodo i al nodo j , $i \neq 1$ y $j \neq 1$ [L]
$Cmo3$	Consumo de combustible para ir del nodo i al nodo 1 [L]
ρ	Consumo específico de combustible [L/km]
D	Distancia entre dos nodos [km]
M	Número máximo de viajes permitidos
N	Número total de puntos generadores de aceite más el depósito
P	Capacidad máxima de carga de cada camión [L]
Q	Cantidad de residuo a recolectar en cada nodo [L]
q_p	Capacidad de succión de bomba [L/min]
t_m	Tiempo muerto de cada camión [min]
t_{op}	Jornada laboral [h]
ST	Velocidad media del camión [km/h]
UP	Capacidad utilizada de la cisterna del camión [L]
w	Costo de C en emisiones de CO ₂ [t CO ₂ /L]

Variable binaria

x_{ijk} =1 si la viaje k incluye el recorrido desde el nodo i al nodo j

Variable entera

u Variable entera auxiliar para formar ciclo de la ruta de cada camión

Indices

i	Nodo de partida
j	Nodo de llegada
k	Viaje de recolección de aceite usado

Agradecimientos. Este trabajo fue parcialmente financiado por la U. Nacional de Tucumán a través del Proyecto PIUNT 723 (2023-2026) y Conicet PIP 0308.

Bibliografía

- Agrawal S., Singh R.K., Murtaza Q. (2014). Forecasting product returns for recycling in Indian electronics industry. *J Adv Manag Res* 11(1):102–14.
- Ahluwalia P.K., Nema A.K. (2006). Multi objective reverse logistics model for integrated computer waste management. *Waste Manag Res* 24(6):514–27.
- Alumur S.A., Nickel S., Saldanha-da-Gama F., Verter V. (2012). Multi-period reverse logistics network design. *Eur J Oper Res* 220(1):67–78.
- Ardjmand E., Weckman Z., Park N., Taherkhani P., Singh M. (2015). Applying genetic algorithm to a new location and routing model of hazardous materials. *Int J Prod Res* 53(3):916–28.
- Baldacci R., Mingozzi A., Roberti R. (2012). Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints. *European J. Operational Res.* 218(1):1-6.
- Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A. A. (1992). *GAMS- A User's Guide* (Release 2.25). The Scientific Press. San Francisco, CA, EEUU.
- Carbon Neutral Homepage, <http://www.carbonneutralplus.com>
- Chiou Y.C., Chen H.C., Yu H.C., Yeha C.Y. (2012). Consideration factors of reverse logistics implementation – a case study of Taiwan's electronics industry. *Procedia Soc BehavSci* 40:375–81.
- Clotey T., Benton W.C. Jr, Srivastava R. (2012). Forecasting product returns for remanufacturing operations. *Decis Sci* 43(4):589–614.
- Dat L.Q., Linh D.T., Chou S.Y., Yu V.F. (2012). Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products. *Expert Syst Appl* 39(7):6380–7.
- Giannetti B.F., Bonilla S.H., Almeida C.M. (2013). An emergy-based evaluation of a reverse logistics network for steel recycling. *J Clean Prod* 46:48–57.
- Golden B. L., Raghavan S., Wasil, E.A. (2008). *The vehicle routing problem: latest advances and new challenges*, Vol.43. Springer New York, NY, EEUU.
- Gomes C.S., Nunes K.R., Xavier L.H., Cardoso R., Valle R. (2008). Multi criteria decision making applied to waste recycling in Brazil. *Omega* 36(3):395–404.
- Kang, K., Han J., Pu W. , Ma Y. (2019). Research on the optimization of low-carbon distribution path of cold chain logistics of fresh agricultural products, *Comp Engn Applic* 55 (2), 259-265.
- Laporte G., Toth P., Vigo D. (2013). Vehicle routing: historical perspective and recent contributions. *EURO J Transp Logist* 2(1-2):1-4.
- Matar N., Jaber M.Y., Searcy C. (2014). A reverse logistics inventory model for plastic bottles. *Int J Logist Manag* 25(2):315–33.
- Miller C.E., Tucker A.W., Zemlin R.A. (1960). Integer programming formulations and traveling salesman problems, *J Assoc Comp Machinery* 7, 326–329.
- Park J.Y. (2014). Assessing determinants of industrial waste reuse: the case of coal ash in the United States. *Resour Conserv Recycl* 92:116–27.
- Toth P., Vigo D. (2014). *Vehicle Routing: Problems, Methods and Applications*. Second edition. MOS-SIAM. Series in Optimization, Siam.