

2. Estrategias para la reducción del impacto ambiental: Caso ruteo de vehículos

BRYAN FERNANDO SALCEDO MONCADA*



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.348.02>

Resumen

El sector transporte es responsable del 79 % de las emisiones mundiales de CO₂ del total de gases contaminantes de la atmósfera. Tomando en cuenta esta preocupación mundial, este proyecto aborda una extensión de Flota Heterogénea del problema de contaminación de ruteo de vehículos (PRP). El problema consiste en el enrutamiento de una flota fija de vehículos de diferentes capacidades, para entregar la mercancía requerida por un conjunto de clientes. De tal forma, se busca reducir los costos asociados al transporte y la emisión de gases contaminantes como el dióxido de carbono (CO₂), el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el monóxido de carbono (CO), dadas las afectaciones en la salud humana. A pesar del aumento en las investigaciones acerca del PRP en los últimos años, no todas contemplan la extensión de flota heterogénea, velocidad discretizada, capacidad de los vehículos, ventanas de tiempo e inclinación de las rutas de esta investigación. Además, se propone una metodología de solución novedosa mediante una metaheurística de búsqueda tabú. Finalmente se puede evidenciar cómo se logra la reducción de los costos logísticos, la disminución de emisiones de efecto invernadero y el uso de vehículos favoreciendo la congestión vehicular de las carreteras. Se obtienen estos resultados computacionales en

* Magíster en Ingeniería con énfasis en Industrial. Profesor-investigador de la Universidad Pontificia Bolivariana, Palmira, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4240-8971> ; correo electrónico: bryan.salcedo@upb.edu.co

150 segundos en casos de prueba de tamaño considerable; 50 clientes. Confiando así la eficiencia y eficacia del algoritmo.

Palabras clave: *PRP, flota heterogénea, ventanas de tiempo, búsqueda tabú.*

Introducción

El hombre, desde las primeras fases de la humanidad, requiere satisfacer sus necesidades, y por ello acude al trueque; intercambiando cosechas, armas, utensilios, pieles, etc. El comercio entonces, desde la antigüedad, ha sido un motor de crecimiento económico. La necesidad de transportar los diferentes objetos y mercancías para conectar diferentes sociedades existe desde entonces.

La carga y distribución de mercancías dio origen al transporte terrestre. En principio, a pie o a lomos de animales de carga, con la desventaja de transportar cantidades poco voluminosas, pues los burros, camellos u otros animales de carga soportaban reducidos pesos. Con la revolución industrial, en el siglo XVII, el intercambio de mercancías se hizo más sencillo al reducir las distancias dentro o fuera de las naciones, lo que llevó a la creación de un mayor número de carreteras, vías de comunicación y desarrollo de las regiones. En 1882 se descubrió el petróleo y el uso del combustible como fuerza impulsadora, lo que llevó a la creación el automóvil como aparato de transporte rápido y cómodo. Su evolución fue fundamental para garantizar el suministro de alimentos y todo tipo de bienes y servicios. Fue indispensable para el avance de la propia humanidad.

Hoy en día el transporte es uno de los pilares de la logística industrial, pues el problema de distribuir productos desde un origen a un destino final con una adecuada planificación puede significar ahorros considerables y así mismo generar ventajas competitivas a las organizaciones. En ese mismo orden de ideas, la toma de decisiones sobre el ruteo de vehículos es esencial para la reducción de costos operativos e índices de competitividad de las empresas y naciones (Aithor, 2023).

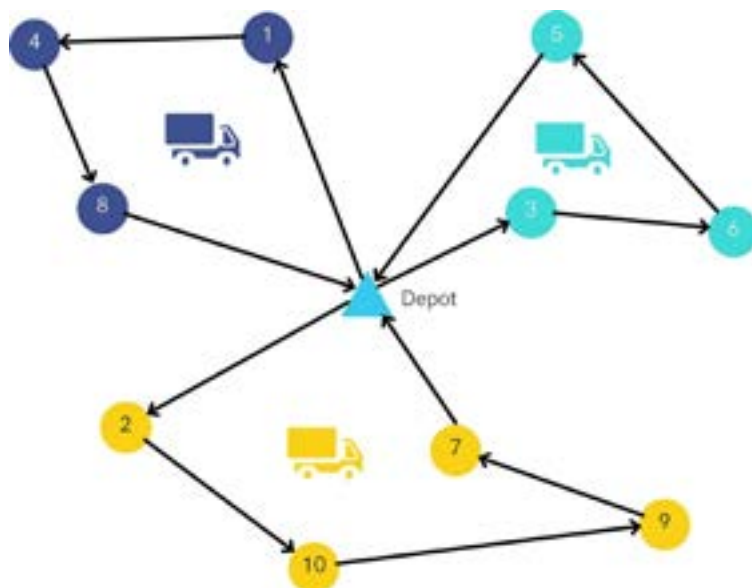
No obstante, Fukasawa et al. (2016) señalan al sector transporte como uno de los principales responsables de la contaminación atmosférica a par-

tir del consumo de combustibles fósiles. United States Environmental Protection Agency (EPA), a través de su inventario de emisiones y disipadores de gases de efecto invernadero en USA, en el 2020 ubica al transporte como el sector de mayor consumo energético, porque libera a la atmosfera 1565 millones de toneladas métricas (MMT) de CO₂, que representa el 79 % del total de GEI liberados (EPA, 2022). Así entonces, al tener en cuenta la mitigación del impacto ambiental, la búsqueda de mejora del servicio y distribución del transporte, se ha planteado el problema de enrutamiento de vehículos (*vehicle routing problem*, VRP) (Naderipour y Alinaghian, 2016). El VRP supone el costo de viaje y el tiempo empleado entre dos nodos (clientes), sin embargo, el consumo de combustible y los GEI emitidos dependen de las decisiones de enrutamiento tomadas (Fukasawa et al., 2016). En ese sentido, el VRP se ha visto en la necesidad de evolucionar con un enfoque que cubra las preocupaciones medioambientales mundiales, como la contaminación y el uso de combustibles alternativos (Kramer et al., 2015). No obstante, son pocos los estudios que han abordado el componente ambiental en el ruteo, adicional a la implementación de un modelo de emisión de contaminantes efectivo (Moryadee et al., 2019).

El VRP parte de una flota de vehículos, respetando la capacidad de cada uno, puede atender la demanda de un conjunto de clientes geográficamente dispersos, con el objetivo de encontrar la distancia más corta. Además, considera una sola visita a cada cliente (Abdi et al., 2020). En la figura 2.1 se muestra una representación del problema, las flechas indican el orden de las rutas de los vehículos (arcos), los círculos la ubicación de los clientes (nodos) y, por último, el depósito en el centro. Los colores obedecen a la identificación de las tres diferentes rutas.

El VRP proviene del problema de agente viajero conocido por las siglas TSP (*traveling salesman problem*). Este consiste en que un vendedor viajero debe visitar una lista de ciudades, donde las distancias entre todas estas son conocidas y cada una debe ser visitada sola una vez, iniciando y finalizando en un punto de origen (depósito). El objetivo del problema es encontrar el mínimo costo, el cual puede estar dado por distancia o tiempo.

Figura 2.1. Forma gráfica del vehicle routing problem (VRP)



Fuente: Elaboración propia.

El crecimiento de las investigaciones en torno al VRP ha sido exponencial. En los últimos años han aparecido nuevos estudios que intentan incluir un número mayor de parámetros y variables para hacer más real el problema (Braekers et al., 2016). Los componentes fundamentales del VRP son red de carreteras, clientes, depósitos, vehículos y conductores. Para hacer diferentes versiones de este problema, diferentes restricciones y situaciones pueden imponerse e interrelacionarse para lograr los objetivos particulares, las versiones más comunes del VRP son limitación básica de capacidad (CVRP), limitación de ventanas de tiempo (VRPTW), limitación de flota vehicular heterogénea (HFVRP), VRP con viajes de regreso (VRPB), recogida y entrega (VRPPD) y cualquier otra combinación de estas variantes (Arboleda et al., 2018).

De acuerdo con lo anterior, se han desarrollado modelos más completos para la distribución de mercancías en entornos urbanos dependiendo de las variaciones del VRP según las características incluidas. Esto se puede apreciar en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. *Siglas por tipo de VRP*

<i>Sigla</i>	<i>Significado</i>
CVRP	Capacitated vehicle routing problem (VRP con limitación básica de capacidad)
DCVRP	Distance and capacitated vehicle routing problem (VRP con distancia y capacidad limitada)
VRPTW	Vehicle routing problem with time windows (VRP con ventanas de tiempo)
VRPB	Vehicle routing problem with backhauls (VRP con viajes de regreso)
VRPPD	Vehicle routing problem pickup and delivery (VRP con recogida y entrega)
OVRP	Open vehicle routing problem (VRP abierto)
MDVRP	Multiple-depot vehicle routing problem (VRP con múltiples depósitos)
VRPFH	Vehicle routing problem heterogeneous fleet (VRP con flota heterogénea)
PVRP	Periodic vehicle routing problem (VRP periódico)
SVRP	Stochastic vehicle routing problem (VRP estocástico)

Fuente: Elaboración propia.

En vista de las preocupaciones ambientales, las investigaciones buscan alternativas para el enrutamiento han propuesto el denominado *Green-Vehicle Routing Problem* (GVRP) con la intención de minimizar el consumo de combustible a partir de las decisiones escogidas en la distribución de mercancía (Li et al., 2018). Mientras que el GVRP busca la minimización de la distancia total de vehículos de combustible alternativo en vez de vehículos convencionales para la reducción del consumo de combustible (Lin et al., 2014), el PRP tiene como objetivo reducir las emisiones de carbono (Bektaş y Laporte, 2011).

El PRP, al igual que sus antecesores, ha sido demostrado como NP-hard. Se ocupa de determinar el conjunto de rutas de vehículos y velocidad en cada tramo para reducir simultáneamente, al mínimo, los costos operacionales y ambientales totales (Fukasawa et al., 2016). El costo ambiental se traduce en la huella ambiental causada por los GEI.

Considerando lo anterior, este estudio presenta el problema de contaminación de ruteo de vehículos (PRP, por sus siglas en inglés) con la implementación de una flota heterogénea, velocidades discretas y un modelo de medición de contaminantes. El objetivo de esta investigación es desarrollar una metodología de solución novedosa a partir de una meta-heurística de búsqueda tabú, que logre reducir los costos incurridos en el uso de los diferentes vehículos y la contaminación generada de estos a través de las emisiones de CO₂, NO₂ y CO. El PRP se ha centrado en la combinación de características diferenciadoras de otras investigaciones: una flota

heterogénea, un único depósito, velocidad discretizada entre rutas, la dependencia de la entrega según las ventanas de tiempo de los clientes, el gradiente entre rutas y la carga llevada entre nodos. Se espera que el modelo propuesto sirva para la toma de decisiones en las organizaciones para la planificación y gestión de la logística de distribución, para convertirse en una estrategia empresarial que reduzca costos y a la vez sea socialmente responsable.

Metodología

El presente trabajo tiene como objetivo principal diseñar una metaheurística de búsqueda tabú (Glover, 1989) para resolver el problema de contaminación de ruteo de vehículos (PRP) teniendo en cuenta una flota heterogénea, ventanas de tiempo y velocidades discretas para minimizar los costos de uso del vehículo y de contaminación de CO_2 , NO_2 y CO .

Introducción a la metodología

De tal modo, los objetivos específicos se detallan a continuación:

- Determinar los principales gases contaminantes generados en problemas de ruteo de vehículos y su modelo de medición para su incorporación a la metaheurística.
- Diseñar una metaheurística de búsqueda tabú, en un tiempo computacional eficiente, para solucionar el problema de contaminación de ruteo de vehículos (PRP).
- Validar los resultados de la metodología de solución mediante la experimentación computacional.

Diseño del estudio

Las principales contribuciones de este proyecto en relación con la extensión de flota heterogénea y velocidades discretas del problema de contamina-

ción de ruteo de vehículos (PRP, *pollution routing problem*) consisten en diseñar una metodología de solución que permita la integración de diversas características realísticas del PRP original. Estas corresponden a velocidades discretas que atiendan a las regulaciones de transporte urbano del territorio colombiano; el uso de una flota heterogénea a partir de vehículos de diferentes capacidades, la inclinación de las vías entre los nodos (clientes) a visitar; la demanda a satisfacer y las ventanas de tiempo de estos como restricciones temporales.

Métodos utilizados

La metodología de solución propuesta busca el balance entre la explotación y exploración del espacio de solución, el cual se obtiene a partir de la metaheurística de búsqueda tabú con múltiples niveles de decisión. La búsqueda tabú ha sido destacada por su éxito en problemas de optimización NP-hard como el ruteo de vehículos. Su éxito radica en la incorporación de una memoria adaptativa y una exploración responsiva, permitiendo alcanzar la efectividad entre la calidad de las soluciones y el tiempo computacional. Para el caso de estudio se plantean diversos niveles de decisión: la secuencia de clientes a visitar por los vehículos disponibles, las velocidades asignadas a estos vehículos y el tipo de vehículo a utilizar.

Limitaciones del estudio

Variables de decisión

El modelo presentado no obedece a un modelo exacto en donde se alcance la optimalidad del problema, pues ya se ha demostrado en otros trabajos cómo no es posible encontrar un óptimo en instancias realistas (Gutiérrez-Padilla et al., 2021). En ese sentido, el modelo obedece a un algoritmo de búsqueda tabú con múltiples niveles de decisión. A continuación, se formulan verbalmente las variables de decisión:

- Rutas construidas como secuencia de nodos a visitar por cada tipo de vehículo k .
- Cantidad y tipo de vehículos k elegidos por ruta.
- Selección de velocidad Vel_v del vehículo en cada arco E .

Las anteriores variables de decisión son la base fundamental para el desarrollo del algoritmo de búsqueda tabú, dado que cada una de ellas representa un nivel de decisión. A continuación, se relacionan otras variables de decisión dependientes de estas. Es decir, son variables que pueden ser calculadas o estimadas de acuerdo con los resultados de las primeras.

- Carga actual de cada vehículo k en cada cliente C_j .
- Cantidad de emisiones liberadas en cada ruta por cada gas contaminante seleccionado: CO_2 , NO_2 y CO (g).
- Cantidad de emisiones totales liberadas en cada ruta (g/km).
- Distancia total recorrida por cada ruta (km).
- Costo total como suma del costo fijo de usar un vehículo, costo variable por el pago de los conductores y costo por las emisiones liberadas (\$).

Función objetivo

El objetivo del algoritmo es encontrar la ruta para cada tipo de vehículo, con su respectiva asignación de velocidad en cada arco y la secuencia de clientes (nodos) a visitar para satisfacer plenamente la demanda y las ventanas de tiempo. De tal manera que se reduzcan los costos del uso de los diferentes vehículos, el pago de los conductores y los costos de emisiones incurridos.

Restricciones

- Los vehículos k no pueden exceder su capacidad de carga en cada una de las rutas.
- Los clientes C_j solo son visitados una vez, cada nodo tiene un arco de entrada y uno de salida.

- Existe equilibrio entre cada cliente, se garantiza que si un vehículo k entra a un nodo sale el mismo vehículo k .
- Los vehículos k salen del depósito y regresan al mismo.
- Se debe establecer la viabilidad de atención entre nodos con respecto a sus ventanas de tiempo y la dinámica de los tiempos de viaje.
- Se debe distinguir entre el depósito y los clientes. Para el depósito, los vehículos k salen con una carga igual a la suma de todas las demandas de los clientes en una ruta. En el caso de los clientes, la carga cambiará a medida que sean atendidos.

Resultados y discusión

Determinación de gases

Una vez seleccionados los gases a medir, dióxido de carbono (CO_2), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el monóxido de carbono (CO), es necesario calcular su costo ambiental y sumarlo a los costos propios de la logística de distribución por carretera. En ese sentido, la metodología MEET permite hallar este valor (Hitckman et al., 1999).

La ecuación (1) representa el total de emisiones (g) generados en una ruta.

Donde:

- e_i es el factor de emisión i (g/km).
- D es la distancia recorrida (km) por los vehículos en una ruta.

Las ecuaciones (2), (3) y (4) expresan la relación entre los factores de emisión de CO_2 , NO_2 y CO respectivamente.

En estas ecuaciones, GC_i indica el coeficiente de corrección del gradiente de la carretera y LC_i la corrección del coeficiente de la carga del vehículo entre nodos para CO_2 , NO_2 y CO respectivamente. Por su parte, v indica la velocidad del vehículo (km/h), y indica el gradiente de la carretera (%) y, finalmente, x indica la relación entre la carga del vehículo y su capacidad entre nodos $[0, 1]$. El costo monetario de los tres contaminantes es calcula-

do con base en donde un gramo de emisión equivale a 0.000027 dólares (Bektaş y Laporte, 2011).

En la tabla 2.2 se aprecia el promedio de emisiones emitidas en gramos para cada tipo de contaminante y el promedio total sumado de todos según las ecuaciones anteriores. Las instancias se refieren al número de clientes en cada fila. En donde a medida que aumenta el número de clientes las emisiones crecen proporcionalmente. Para consultar más información de estas instancias véase https://github.com/dmorill/HPRP_instances

Tabla 2.2. Emisiones calculadas para cada conjunto de instancias

Instancia	Promedio de CO ₂	Promedio de NO ₂	Promedio de CO	Promedio de emisiones totales
15C	4554.72	41.14	27.03	980268.77
50C	15083.34	136.38	88.25	3289893.62
75C	25083.23	227.97	141.64	5536150.14
100C	36551.91	334.89	197.79	8283892.02
150C	56209.59	516.11	300.62	12893951.01

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 2.2 permite evidenciar la relación de kilogramos del tipo de GEI por cada kilómetro recorrido, el cual es notoriamente mayor para el CO₂, alcanzando el 98.6 % de los gases totales medidos.

Diseño y resultados de la metaheurística

Para la solución del PRP la búsqueda tabú (Ts) ha resultado ser de las más efectivas, proporcionando un buen compromiso entre la calidad de la solución y el tiempo de computación (Nguyen et al., 2013).

La secuenciación de las rutas evalúa n configuraciones, donde n es el número de clientes y el algoritmo encuentra la mejor solución inicial S_0 . Una vez desarrollada la S_0 , se implementa el algoritmo de la búsqueda tabú. En cada iteración de la búsqueda tabú se hace un cambio o actualización en la estructura de la solución que reestablecerá la solución inicial de la siguiente iteración en cada nivel de decisión propuesto, generando variaciones en el *fitness* a evaluar con el fin de encontrar mejoras en estos (Michalewicz y Fogel, 1999). El *fitness* se define como la suma de los costos de usar los di-

ferentes tipos de vehículos, costos de los conductores y de las emisiones liberadas al medioambiente, calculados en la sección anterior.

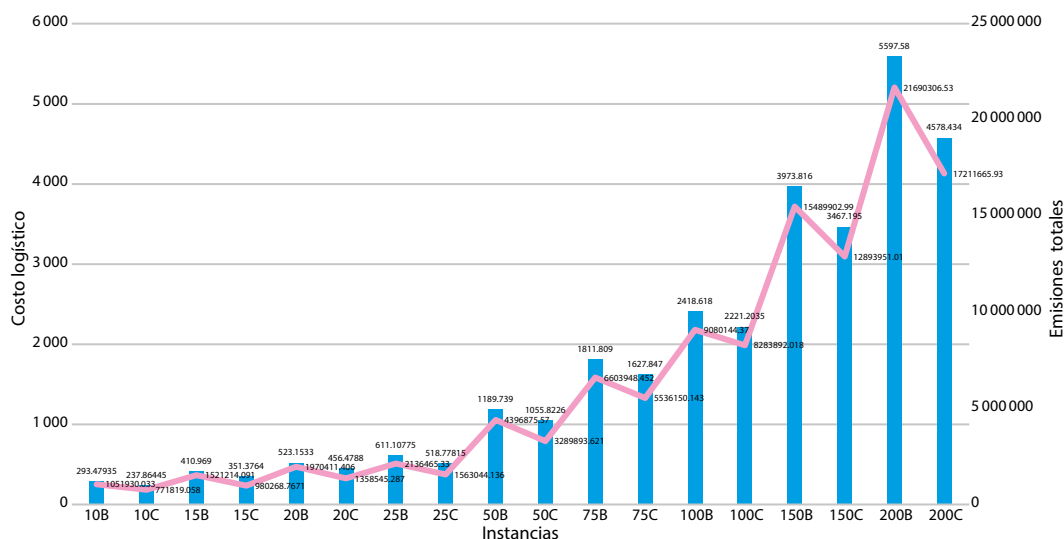
La solución generada describe la secuencia de visitas a los clientes, en donde se evidencia el número de vehículos utilizados. El costo total generado en la ruta toma en cuenta el pago a conductores, los costos fijos de uso de los vehículos, el costo de emisión de los contaminantes medidos y el tiempo promedio para ejecutar el algoritmo. En la tabla 2.3 se pueden apreciar estos resultados.

Tabla 2.3. Resultados de la metaheurística para cada conjunto de instancias

Instancia	Promedio de costo total (USD)	Promedio de distancia (km)	Promedio de total vehículos (unidades)	Promedio de tiempo total (s)
15C	351.38	948.18	4.00	9.15
50C	1 055.82	2 656.17	12.00	150.34
75C	1 627.85	4 047.58	18.00	416.40
100C	2 221.20	5 444.53	24.00	987.33
150C	3 467.20	8 353.22	40.00	3 134.58

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.2. Emisiones totales y costo logístico por instancia

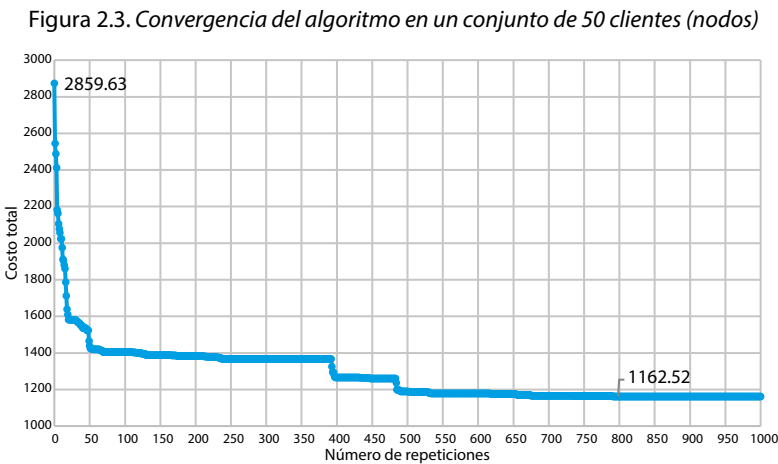


Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla 2.3, la TS diseñada logra obtener los costos totales de las rutas. Asimismo, y teniendo en cuenta las distancias recorridas en las rutas para el total de gases, se pueden contabilizar los vehículos usados y el tiempo computacional para lograr la mejor solución final, se evidencia como al incrementar los nodos a visitar, el tiempo computacional se incrementa exponencialmente. Finalmente, en la figura 2.2 se pueden comparar los costos totales según el conjunto de instancia y el total de emisiones liberadas a la atmósfera.

Validación de resultados

La TS tiene el objetivo de encontrar los menores costos totales de las rutas. En ese sentido, para validar la convergencia del algoritmo se realizaron experimentos con instancias pequeñas (15 nodos), medianas (50 nodos) y grandes (100 nodos). Tomando en cuenta un total de 1 000 repeticiones, en la figura 2.3 se identifica la curva descrita por los resultados del algoritmo en una instancia de 50 clientes. En donde se puede visualizar un decrecimiento paulatino, desde un costo inicial de \$2 860 al mínimo posible, \$1 163, en la iteración 791. La curva dibujada permite corroborar como el algoritmo a medida que realiza cada iteración encuentra un mejor resultado final.



Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Si bien la literatura destaca como principal gas de efecto invernadero el CO_2 , causado por el sector transporte aproximadamente con un 79 % de las emisiones del total de GEI liberados. Este estudio añade otros gases como el NO_2 y el CO para su respectiva medición de emisiones seleccionado considerando la distancia recorrida por los vehículos, inclinación de las carreteras, carga transportada en la ruta y velocidad de circulación.

En cuanto a la metodología para solucionar el PRP, debido al alto nivel de complejidad (NP-Hard) con la extensión de las características seleccionadas en esta investigación, se utiliza como método la metaheurística de búsqueda tabú, que realiza una búsqueda más robusta en el espacio de solución, incorporando mecánicas para escapar de los óptimos locales. Es de las más usadas y recomendadas en la literatura, dado que mediante su memoria adaptativa permite guiar la exploración eficaz y eficientemente gracias a la información obtenida a lo largo del proceso de búsqueda y mediante su exploración responsiva. También considera la suposición de que una mala decisión estratégica puede generar pistas que conduzcan a una zona prometedora del espacio de solución

Del mismo modo para la validación de la solución de la metaheurística elegida se usó el conjunto de instancias referencia en la literatura, alcanzado para todas las instancias la eficiencia del algoritmo en relación con la contaminación, los costos logísticos y el uso de vehículos. Los resultados contribuyen a proporcionar una solución que requiera menos vehículos para realizar eficientemente la misma cantidad de trabajo. Esto es importante en los sistemas de logística urbana, ya que aporta a la reducción de la presencia de vehículos en las calles de la ciudad y, por tanto, de su impacto negativo en la congestión y el medio ambiente.

A pesar de que el algoritmo desarrollado permite alcanzar una mejora significativa en un tiempo computacional aceptable, es sabido que la escalabilidad del algoritmo podría mejorarse. El operador propuesto para la secuencia de nodos realiza una búsqueda exhaustiva que abarca la mayoría del tiempo de computación. Por tal motivo, como trabajo futuro se piensa modificar este aspecto para hacer más atractiva la metodología de solución.

Referencias

- Abdi, A., Abdi, A., Akbarpour, N., Amiri, A. S. y Hajiaghaei-Keshteli, M. (2020). Innovative approaches to design and address green supply chain network with simultaneous pick-up and split delivery. *Journal of Cleaner Production*, 250, 119437. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119437>
- Aithor. (2023). *La influencia de los vehículos en el desarrollo económico de las ciudades*. <https://aithor.com/essay-examples/la-influencia-de-los-vehiculos-en-el-desarrollo-economico-de-las-ciudades>
- Arboleda Zúñiga, J., Gaviria-Gómez, J. A. y Álvarez-Romero, J. A. (2018). Propuesta de ruteo de vehículos con flota heterogénea y ventanas de tiempo (HFVRPTW) aplicada a una comercializadora pyme de la ciudad de Cali. *Revista de Investigación*, 11(1), 39-55. <https://doi.org/10.29097/2011-639x.178>
- Bektaş, T. y Laporte, G. (2011). The pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1232-1250. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.02.004>
- Braekers, K., Ramaekers, K. y Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers and Industrial Engineering*, 99, 300-313. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>
- Departamento Nacional de Planeación. (2020). *Encuesta Nacional Logística*. Gobierno Nacional de Colombia.
- Erdoğan, S. y Miller-Hooks, E. (2012). A green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), 100-114. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.08.001>
- Fukasawa, R., He, Q. y Song, Y. (2016). A disjunctive convex programming approach to the pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 94, 61-79. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.09.006>
- Glover, F. (1989, 1 de agosto). Tabu search: Part I. *ORSA Journal on Computing*, 1(3), 190-206. <https://doi.org/10.1287/ijoc.1.3.190>
- Gutiérrez-Padilla, M. V., Morillo-Torres, D. y Gatica, G. (2021). A novel mathematical model for a discrete speed pollution routing problem with time windows in a Colombian context. *IFAC-PapersOnLine*, 54(1), 229-235. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.027>
- Hickman, A. J., Hassel, D., Jourmard, R., Samaras, Z. y Sorenson, S. C. (1999). *Methodology for calculating transport emissions* (Project Report Se/491/98). Commission of the European Communities. <https://trimis.ec.europa.eu/system/files/project/documents/meet.pdf>
- Kramer, R., Subramanian, A., Vidal, T. y Cabral, L. D. A. F. (2015). A matheuristic approach for the Pollution-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 243(2), 523-539. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.009>
- Li, J., Wang, D. y Zhang, J. (2018). Heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem based on fuel and carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, 201, 896-908. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.075>

- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T. S., Chung, S. H. y Lam, H. Y. (2014). Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 41(4 part 1), 1118-1138. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.107>
- Liu, C., Kou, G., Zhou, X., Peng, Y., Sheng, H. y Alsaadi, F. E. (2020). Time-dependent vehicle routing problem with time windows of city logistics with a congestion avoidance approach. *Knowledge-Based Systems*, 188, 104813. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.06.021>
- Marecek, J. (2010). Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics. *The Computer Journal*, 53(8). <https://doi.org/10.1093/comjnl/bxp121>
- Michalewicz, Z. y Fogel, D. B. (1999). *How to solve it*. Modern Heuristics.
- Moryadee, C., Aunyawong, W. y Shaharudin, M. R. (2019). Congestion and pollution, vehicle routing problem of a logistics provider in Thailand. *The Open Transportation Journal*, 13(1), 203-212. <https://doi.org/10.2174/1874447801913010203>
- Naderipour, M. y Alinaghian, M. (2016). Measurement, evaluation and minimization of CO₂, NO_x and CO emissions in the open time dependent vehicle routing problem. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 90, 443-452. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.043>
- Nguyen, P. K., Crainic, T. G. y Toulouse, M. (2013). A tabu search for time-dependent multi-zone multi-trip vehicle routing problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 231(1), 43-56. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.05.026>
- Puenayán, D. E., Londoño, J. C., Escobar, J. W. y Linfati, R. (2014). Un algoritmo basado en búsqueda tabú granular para la solución de un problema de ruteo de vehículos considerando flota heterogénea. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(25), 81-98. <https://doi.org/10.22395/rium.v13n25a6>
- Santana, J. B., Rodríguez, C. C., García López, F. C., García Torres, M., Batista, B. M., Moreno Pérez, J. A. y Moreno Vega, J. M. (2004). *Metaheurísticas: Una revisión actualizada*. Universidad de La Laguna, Departamento de Estadística, Investigación Operativa y Computación.
- United States Environmental Protection Agency. (2022). *Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2020*.