

Problema de ruteo de vehículos. Importancia para la logística y métodos de solución

Vehicle routing problem. Importance in logistics and solutions methods

Nelson Javier Tovar Perilla¹

Luz Adriana Sánchez Echeverri²

Laura Patricia Carranza Murillo³

*Universidad de Ibagué / Universidad Nacional Abierta y a Distancia,
Colombia*

Resumen

Uno de los principales problemas en las organizaciones es la programación de entregas de los pedidos a sus clientes debido al alto número de restricciones que se deben tener en cuenta al momento de programar las rutas de entrega. Para estudiar este fenómeno surgió el problema de ruteo de vehículos (VRP por sus siglas en inglés) el cual ha captado el interés de la comunidad científica asociada a la gestión logística y asignación de rutas dada su adaptabilidad a diversos casos de estudio. Desde su concepción, el VRP ha ido evolucionando en función de las necesidades de diversos sectores y las dinámicas de las organizaciones, derivando en distintas variantes, metodologías para su aplicación y métodos de solución. El objetivo de esta investigación es resaltar las variantes y metodologías usadas con mayor frecuencia y las diferencias existentes entre cada una de ellas.

Palabras clave: logística, ruteo de vehículos, programación.

Abstract

¹ Ingeniero industrial, especialista en Ingeniería de la Producción; M.Sc. en Gestión Industrial, Ph.D. en Ingeniería, Universidad de Ibagué. <https://orcid.org/0000-0001-6330-4181> / nelson.tovar@unibague.edu.co

² Ingeniera física, M.Sc. en Ciencia e Ingeniería de Materiales, Ph.D. en Ingeniería, Universidad de Ibagué. <https://orcid.org/0000-0003-1968-3449> / luz.sanchez@unibague.edu.co

³ Ingeniera industrial, M.Sc. en Gestión Industrial, Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD. <https://orcid.org/0000-0002-7025-1417> / laura.carranza@unad.edu.co

One of the organization's major problems is related with programming of the deliveries to their customers due to the high number of restrictions that must be considered when scheduling delivery routes. To study this phenomenon, the vehicle route problem (VRP) emerged, which has captured the interest of the scientific community associated with logistics management and route assignment given its adaptability to various case studies. Since its conception, the VRP has evolved based on the needs of various sectors and the dynamics of organizations, resulting in different variants, methodologies for its application and solution methods. The objective of this research is to highlight the most frequently used variants and methodologies and the differences between each of them.

Keywords: Logistics, Vehicle Routing, Scheduling.

1. Introducción

Gestionar el movimiento de mercancía o productos para atender las necesidades de los clientes de manera eficiente y efectiva es un reto para las compañías (Kyriakakis *et al.*, 2021). Generalmente los recursos son escasos y el costo asociado a la logística de distribución representa un alto porcentaje del precio de venta de los productos, entre el 3 % y 10 % dependiendo de la actividad económica (Departamento Nacional de Planeación, 2018). Por lo cual es necesario formular metodologías que permitan planear la gestión del transporte de la mejor manera.

Un problema de gran interés para la comunidad científica asociado a la gestión del transporte es la asignación de rutas a una flota de vehículos, esta problemática es comúnmente conocida como el problema de ruteo de vehículos –vehicle routing problema– (VRP, por sus siglas en inglés) (Koç & Laporte, 2018). Este problema ha sido ampliamente estudiado y aplicado a diferentes casos de estudio. Los estudios más recientes se enfocan en situaciones reales con una alta complejidad en la que contemplan variantes del método clásico de VRP para lograr un mayor acercamiento al problema real (Buluc *et al.*, 2022; Dutta *et al.*, 2021; Rezaei Kallaj *et al.*, 2021; Sánchez *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2021). Sin embargo, a pesar de estos esfuerzos aún no se ha alcanzado una solución general al VRP debido a su complejidad (Asghari & Mirzapour Al-hashem, 2021).

2. Metodología

Se realizó una revisión sistemática de literatura analizando la información obtenida de diferentes bases de datos con el fin de identificar las variantes más utilizadas del problema de ruteo. Se definieron los conceptos básicos de esta metodología, las principales restricciones presentes en las diferentes organizaciones y con la relación de restricciones y conceptos básicos; finalmente, se presentan los métodos de solución mayormente aplicados en esta problemática.

3. Discusión

3.1 Conceptos básicos del VRP

El VRP es un problema donde un conjunto de nodos origen (almacenes) buscan abastecer o satisfacer las demandas de un conjunto de nodos destino (clientes) haciendo uso de una flota de vehículos que en la medida de lo posible deben aprovecharse al máximo propendiendo por la minimización, bien sea de costos, distancias o tiempos y satisfacer los requerimientos del cliente en tiempo y cantidades. Un problema clásico de VRP es ejemplificado en la Figura 1 (Rangel Valdez, 2005).

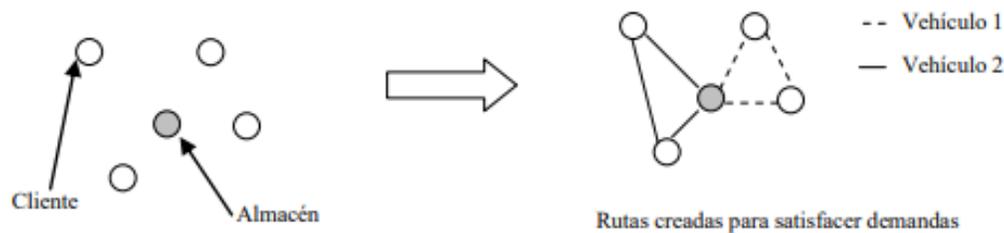


Figura 1 Esquematización del VRP

Fuente: Rangel Valdez (2005)

Una de las primeras aplicaciones del VRP se dio en el año 1959, tomando como caso de estudio el proceso de distribución de combustible desde un centro de acopio hasta diferentes estaciones de servicio (Braekers *et al.*, 2016). Al ser uno de los primeros problemas que abordaba formalmente el problema VRP, se pretendía construir rutas para un conjunto de vehículos que contaban con igual capacidad (flota homogénea), para satisfacer el requerimiento de combustible de una red de clientes recorriendo una distancia total mínima. Por ese entonces, ya se advertía una de las principales características del VRP; al aumentar el número de clientes (estaciones de servicio) la combinación de rutas factibles crece de manera exponencial, esta condición hace que el VRP sea un problema NP-Duro (Qin *et al.*, 2021).

Los principios del VRP parten de un problema clásico de la investigación operativa como lo es el problema del agente viajero – travelling salesman problem (TSP). El TSP pretende dar solución al problema donde un repartidor debe visitar una cantidad de clientes en diferentes ciudades, con la particularidad que el punto de partida debe ser también el destino final del repartidor luego de visitar todos los clientes. El objetivo del TSP es determinar la ruta que le permita al repartidor visitar a todos los clientes una única vez recorriendo la mínima distancia. La diferencia entre estos dos problemas radica en que el TSP arroja una única ruta, mientras que el VRP generaliza el problema y permite encontrar n rutas. Dicho de otra manera, el TSP no es más que un VRP con una flota de un solo vehículo con capacidad ilimitada (Medina *et al.*, 2011).

3.2 VRP y sus variantes

Con el paso de los años el VRP clásico ha venido incorporando variantes para adaptarse a las particularidades de los casos de estudio en contextos reales (Dutta *et al.*, 2021; Rezaei Kallaj *et al.*, 2021; Sánchez *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2021). Básicamente, estas extensiones del problema estándar incorporan nuevas restricciones o modifican la naturaleza de los parámetros (especialmente de deterministas a estocásticos) para solucionar problemas de mayor complejidad. A continuación, se abordarán diferentes variantes del problema estándar (Froger *et al.*, 2019).

3.2.1 VRP con restricción de capacidad

Esta es la variante más común y es casi una obviedad que se incorpore en las investigaciones de VRP. Esta variante propone que la flota de vehículos posee una capacidad limitada y fija la cual no debe ser superada en cada una de las rutas que le es asignada a un vehículo (Medina *et al.*, 2011).

3.2.2 VRP con restricciones de capacidad heterogénea

A diferencia de la variante anterior, en esta se considera que la flota de vehículos posee limitaciones de capacidad diferentes. Esta variante es de gran aplicación en entornos reales porque en la industria, en la mayoría de los casos las especificaciones de la flota de vehículos son heterogeneas (Hoff *et al.*, 2010).

Esta heterogeneidad puede no presentarse únicamente en la capacidad del vehículo, con frecuencia debido al acelerado desarrollo tecnológico se encuentra con que las empresas cuentan con flotas de

vehículos con diferentes grados de obsolescencia. Esto hace que cada que difieran los unos de otros en cuanto al costo de transporte debido a: la eficiencia en el consumo de combustible, costos de mantenimiento, probabilidad de fallas, autonomía del vehículo, lo anterior solo por mencionar algunos factores. Esta situación se presenta en el caso de estudio de esta investigación, la empresa cuenta con una flota de vehículos con diferentes características (Hoff *et al.*, 2010).

3.2.3 VRP con ventanas de tiempo

En esta variante se contempla que los clientes deben ser atendidos dentro de un rango de tiempo. Las ventanas de tiempo requieren de restricciones que establezcan la hora de inicio y la hora final en la que debe ser servido el cliente. Así mismo una generalización establece que esta variante contempló la asignación de múltiples ventanas de tiempo por cliente (Desrochers *et al.*, 1992).

Así mismo, las ventanas de tiempo pueden ser modeladas como ventanas de tiempo suaves. En este caso el vehículo puede violar la restricción asociada a la ventana de tiempo a cambio de una penalización en la función objetivo del problema por la tardanza o el adelanto. La otra forma de modelación son las ventanas de tiempo rígidas, en este caso se prohíbe radicalmente la tardanza o el adelanto, toda vez que en la formulación del modelo matemático no forman parte de área de soluciones factibles (Yuan *et al.*, 2021).

3.2.4 VRP periódico

Un conjunto de clientes en un horizonte temporal debe ser visitado al menos una vez, la diferencia entre esta variante y las demás es que establece que un cliente puede ser visitado en más de una ocasión en el horizonte de planeación de la logística de distribución.

VRP con servicio, esta variante establece que al momento de visitar a cada uno de los clientes de la red se debe realizar alguna actividad o proceso que demanda un tiempo de servicio. Durante este tiempo de servicio el vehículo debe permanecer en la ubicación del cliente y representa un tiempo de inactividad para el vehículo. Este tiempo de servicio puede variar dependiendo del cliente o se puede simplificar el problema haciendo que el tiempo de servicio sea igual para todos los clientes.

3.2.5 VRP con múltiples depósitos

Esta variante establece que para cumplir con la demanda de los clientes se cuenta con un conjunto de depósitos. Esto aumenta la complejidad del problema porque ahora los vehículos pueden arrancar (y

terminar) su trayecto desde diferentes orígenes (destinos). En ocasiones para no implementar esta variante algunos estudios optan por agrupar un conjunto específico de clientes a cada depósito basados especialmente en la cercanía y formular cada depósito como un problema de VRP independiente (Montoya-Torres *et al.*, 2015). Sin embargo, los resultados demuestran que, de no existir una marcada cercanía entre los clientes a un depósito, el formular problemas independientes no arroja la mejor solución al problema global (ver Figura 2).

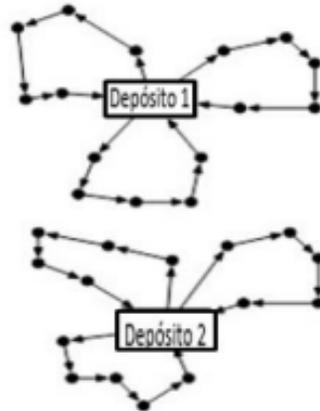


Figura 2 Esquematización del VRP con múltiples depósitos

Fuente: Tomado de Montoya-Torres *et al.* (2015)

3.2.6 VRP con múltiples viajes

Esta variante nace para afrontar los casos de estudio donde la capacidad de la flota de vehículos no es suficiente para satisfacer los requerimientos de los clientes en un único viaje o cuando los periodos de planificación de la logística de distribución son muy largos. En ambos casos la solución que resulta más práctica es aplicar un VRP con viajes múltiples. Este enfoque es considerado uno de los más realistas porque en la mayoría de los casos la flota de vehículos es un recurso limitado y que debe ser usado de manera eficiente (Olivera & Viera, 2007).

En la Figura 3 contrasta la solución dada por el VRP clásico frente a la solución del VRP con múltiples viajes. En el caso de la izquierda se evidencia una situación ideal donde la flota de vehículos es suficiente para cumplir con los requerimientos de los clientes, mientras que el caso de la derecha es un caso más realista donde el VRP es sometido a limitaciones de capacidad y ventanas de tiempo que no permite que se cumpla con la mejor solución encontrada por el VRP clásico (Olivera & Viera, 2007).

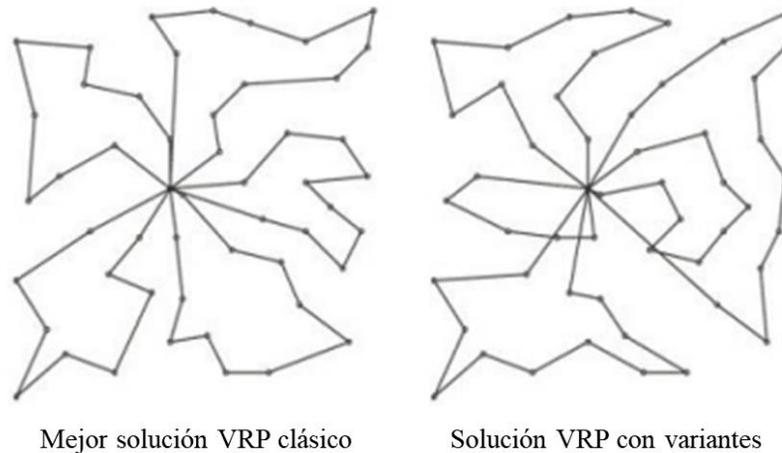


Figura 3. Comparación VRP clásico y VRP con variantes
Fuente: Tomado de Olivera & Viera (2007).

3.2.7 VRP con recolección y entrega

En esta variante, se plantea la posibilidad de realizar dos procesos análogamente: hacer el proceso de abastecimiento de los clientes, al mismo tiempo que se recogen los productos (Ballesteros & Escobar, 2016) que son retornados al fabricante. En esta variante del VRP la capacidad del vehículo es de especial cuidado y atención para el formulador del modelo matemático, porque a diferencia de las variantes anteriores es posible que estén entrando y saliendo productos del camión y se debe garantizar que durante toda la ruta la carga del vehículo no supere la capacidad del camión.

3.3 Metodologías de solución del VRP

Para solucionar problemas de VRP son múltiples las estrategias de solución que se han implementado en el estado del arte. Cada autor elige la metodología de solución que mejor se adapte al caso de estudio o en su defecto implementa métodos de solución que pretenden ser innovadores y que mejora las medidas de desempeño de los métodos que se han abordado previamente. A grandes rasgos se logran identificar cuatro (4) grupos de métodos de solución para el VRP:

3.3.1 Métodos exactos

Estos métodos se caracterizan porque encuentran la mejor respuesta al problema formulado. Es decir, permiten obtener un resultado óptimo, pero en muchos casos resulta imposible de implementar debido al nivel de complejidad que conlleva la modelación de algunos problemas especialmente los llamados NP-Hard.

La debilidad principal que presentan los métodos exactos es que el costo computacional aumenta abruptamente en la medida que el problema crece dimensionalmente. Sin embargo, en algunas investigaciones, este obstáculo es sorteado mediante la implementación de estrategias complementarias para reducir ese costo computacional. Para ser puntual, implementan la estrategia Branch and Price.

3.3.2 Métodos multicriterio

Los métodos multicriterio establecen un grupo de métodos y/o metodologías que apoyan la toma de decisiones considerando múltiples objetivos o metas (cualitativos y cuantitativos) en la búsqueda de la mejor solución (Bustos, 2010). En estos métodos, el concepto de criterio se establece tomando en consideración tres pilares que resultan indispensables: los atributos, que se refieren a valores en consideración para tomar la decisión respecto al contexto estudiado; el objetivo, que representa las direcciones de mejora de los atributos; y las metas, las cuales indican un valor esperado o un nivel de aspiración en relación con el atributo.

Son extensas las clasificaciones que han recibido los métodos multicriterio. Sin embargo, algunos autores concuerdan que pueden ser agrupados en dos grandes grupos:

- *Discretos*, estos se utilizan cuando se establece un número conocido y finito de alternativas de solución. Algunos ejemplos, son los métodos analíticos jerárquicos, método sinérgico. Relajación de sobre-calificación.
- *Continuos*, estos abordan problemas con un número infinito de alternativas de solución que no pueden ser especificados directamente, sino que para su definición se utilizan variables de decisión, que de manera general suelen ser manejados como problemas multiobjetivo dentro de los métodos exactos o heurísticos.

3.3.3 Métodos heurísticos

Estos tipos de métodos son los que han ganado mayor participación y atención de la comunidad científica en los últimos años. Antes que nada, es importante definir que es una heurística:

Una heurística es un procedimiento secuencial que pretende encontrar una solución inicial o una mejorada para un problema de optimización matemática. Generalmente, estos algoritmos se basan en el sentido común y buscan proveer soluciones de calidad en tiempos computacionales razonables. Sin embargo, no pueden garantizar que las

soluciones encontradas sean óptimas. Algunos autores establecen que una heurística “es un procedimiento sencillo, frecuentemente guiados por el sentido común, que se supone proveen buenas soluciones, mas no necesariamente óptimas a problemas difíciles de resolver, fácil y rápidamente”. Los mismos autores, recomiendan usar las heurísticas en las siguientes situaciones:

- Los métodos exactos no son atractivos computacionalmente.
- No se necesita la solución óptima.
- Los datos son inexactos o limitados.
- Hay limitantes de recursos como tiempo o presupuesto.
- Son pasos intermedios para otros algoritmos.

3.3.4 Métodos metaheurísticos

Las metaheurísticas son algoritmos pensados para superar o huir de óptimos locales, donde las heurísticas clásicas con frecuencia deben cumplir con su criterio de parada. La ventaja que destaca en las metaheurísticas es encontrar un punto de mediación entre dos procedimientos que son típicos de estos métodos: intensificación y diversificación. En la intensificación, zonas que se prevén como atractivas dentro del espacio de solución son exploradas con mayor rigor con la esperanza de encontrar soluciones más cercanas al óptimo o simplemente mejores soluciones. Por el contrario, en la diversificación se orienta la búsqueda hacia zonas que han sido poco o nada exploradas de la región factible, de tal manera que se explore una mayor proporción del área de solución factible (Talbi, 2009).

Dentro de las metaheurísticas surge una subclasificación de acuerdo con algunos autores, así:

Algoritmos de trayectoria, este grupo de algoritmos establecen una única solución en cada una de sus iteraciones. Sobre esta solución trabaja el algoritmo e intenta mejorarla con cada iteración mediante la exploración de soluciones cercanas a la establecida a esto se le conoce comúnmente en el ámbito investigativo como búsqueda de vecindario. Algunos ejemplos de metaheurísticas de este segmento son: Búsqueda tabú, Recocido simulado o Búsqueda local.

Algoritmos poblacionales, normalmente estos algoritmos comienzan con un conjunto de soluciones como población inicial y posteriormente intentan encontrar buenas soluciones mediante la elección de los “mejores” miembros de la solución y la aplicación de un proceso sobre ellos que varía dependiendo del algoritmo que se implemente. Algunos

ejemplos de este grupo son: Algoritmo genético (Rabbouch et al., 2021) y Colonia de hormigas (Wang et al., 2019).

4. Conclusiones

La búsqueda de soluciones aplicables a la realidad en materia de logística de distribución ha permitido al VRP evolucionar y hacerse más complejo en la medida que los casos de estudio así lo requieren. Las diferentes variantes del VRP y las metodologías utilizadas en su aplicación responden a las distintas necesidades de las empresas y proyectos que buscan mejorar sus servicios y alcanzar sus objetivos. Aun así, escoger la variante y método adecuado para aplicar un VRP es un ejercicio que requiere de un análisis riguroso de las capacidades y requerimientos del problema puesto que la complejidad del método no necesariamente garantiza mejores resultados.

Referencias

- Asghari, M. & Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J. (2021). Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review. *International Journal of Production Economics*, 231, 107899. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107899>
- Ballesteros, P. & Escobar, A. (2016). Revisión del estado del arte del problema de ruteo de vehículos con recogida y entrega (VRPPD). *Ingeniería y Desarrollo*, 34(2), 463-482. <https://doi.org/10.14482/inde.33.2.6368>
- Braekers, K., Ramaekers, K. & 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>
- Buluc, E., Peker, M., Kara, B. Y. & Dora, M. (2022). Covering vehicle routing problem: Application for mobile child friendly spaces for refugees. *OR Spectrum*, 44(2), 461-484. <https://doi.org/10.1007/s00291-021-00617-0>
- Departamento Nacional de Planeación. (2018). *Encuesta Nacional Logística*. <https://www.andi.com.co/Uploads/Encuesta%20Nacional%20Logística%202018.pdf>

- Desrochers, M., Desrosiers, J. & Solomon, M. (1992). A Column Generation Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Combinatorial Optimization*, 152, 249–252. https://doi.org/10.1007/978-3-642-77489-8_17
- Dutta, J., Barma, P. S., Mukherjee, A., Kar, S., De, T., Pamučar, D., Šukevičius, Š. & Garbinčius, G. (2021). Multi-objective green mixed vehicle routing problem under rough environment. *Transport*, 37(1), 51-63. <https://doi.org/10.3846/transport.2021.14464>
- Froger, A., Mendoza, J. E., Jabali, O. & Laporte, G. (2019). Improved formulations and algorithmic components for the electric vehicle routing problem with nonlinear charging functions. *Computers and Operations Research*, 104, 256–294. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.12.013>
- Hoff, A., Andersson, H., Christiansen, M., Hasle, G. & Løkketangen, A. (2010). Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing. *Computers and Operations Research*, 37(12), 2041–2061. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.03.015>
- Koç, Ç., & Laporte, G. (2018). Vehicle routing with backhauls: Review and research perspectives. *Computers and Operations Research*, 91, 79–91. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.11.003>
- Kyriakakis, N. A., Marinaki, M. & Marinakis, Y. (2021). A hybrid ant colony optimization-variable neighborhood descent approach for the cumulative capacitated vehicle routing problem. *Computers and Operations Research*, 134, 105397. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105397>
- Rocha Medina, L. B., González La Rota, E. C. & Orjuela Castro, J. A. (2011). Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: evolución histórica y métodos de solución. *Ingeniería*, 16(2), 35–55. <https://www.redalyc.org/pdf/4988/498850173004.pdf>
- Montoya-Torres, J. R., López Franco, J., Nieto Isaza, S., Felizzola Jiménez, H. & Herazo-Padilla, N. (2015). A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. *Computers and Industrial Engineering*, 79, 115–129. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.10.029>
- Olivera, A. & Viera, O. (2007). Adaptive memory programming for the vehicle routing problem with multiple trips. *Computers & Operations Research*, 34, 28–47. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.02.044>

- Qin, W., Zhuang, Z., Huang, Z. & Huang, H. (2021). A novel reinforcement learning-based hyper-heuristic for heterogeneous vehicle routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 156, 107252. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107252>
- Rabbouch, B., Saâdaoui, F., & Mraïhi, R. (2021). Efficient implementation of the genetic algorithm to solve rich vehicle routing problems. *Operational Research*, 21(3), 1763-1791. <https://doi.org/10.1007/s12351-019-00521-0>
- Rangel Valdez, N. (2005). *Análisis de los problemas de asignación de rutas, horarios y cargas en una distribuidora de productos.*(Tesis de grado). Tecnológico Nacional de México, Tamaulipas.
- Rezaei Kallaj, M., Abolghasemian, M., Moradi Pirbalouti, S., Sabk Ara, M., & Pourghader Chobar, A. (2021). Vehicle Routing Problem in Relief Supply under a Crisis Condition considering Blood Types. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2021/7217182>
- Sánchez, D. G., Tabares, A., Faria, L. T., Rivera, J. C. & Franco, J. F. (2022). A Clustering Approach for the Optimal Siting of Recharging Stations in the Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Energies*, 15(7), 2372. <https://doi.org/10.3390/en15072372>
- Wang, Y., Chen, J., & Shen, Y. (2019). A Multi-objective Optimization Model for VRP and VFP based on An Improved Ant Colony Algorithm. *2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*, (pp.777-780). <https://doi.org/10.1109/IMCEC46724.2019.8983863>
- Yuan, Y., Cattaruzza, D., Ogier, M., Semet, F. & Vigo, D. (2021). A column generation based heuristic for the generalized vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 152, 102391. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102391>
- Zheng, W., Wang, Z. & Sun, L. (2021). Collaborative Vehicle Routing Problem in the Urban Ring Logistics Network under the COVID-19 Epidemic. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2021/5539762>

