

El problema de ruteo de vehículos [VRP] y su aplicación en medianas empresas colombianas

Vehicle Routing Problem [VRP] and its applications in Colombian medium-sized companies

COLCIENCIAS TIPO 4. ARTÍCULO CORTO

RECIBIDO: DICIEMBRE 18, 2015; ACEPTADO: FEBRERO 9, 2016

Jairo Arboleda Zúñiga, MSc
jarboledaz@usc.edu.co

Astrid Xiomara López
xioma1978@hotmail.com

Yéssica Lorena Lozano
yessica.lozano.guzman@gmail.com

Universidad Santiago de Cali, Colombia

Resumen

En este artículo se presenta una revisión de la literatura de algunos de los más importantes modelos matemáticos, heurísticos y metaheurísticos que han contribuido a la solución del problema de ruteo de vehículos [*Vehicle Routing Problem*, VRP] –considerado como un problema complejo, por su condición estocástica y polinomial–, el cual viene determinado por un conjunto de rutas que comienzan y terminan en una misma bodega o depósito, donde cada ruta es realizada por un solo vehículo, en una ruta, a través de la cual se minimizan los costos globales de transporte y se satisface, tanto la demanda, como las demás restricciones operativas. En el documento se presenta el avance de su aplicación en dos casos de empresas medianas colombianas en las cuales se ha empezado a utilizar algunos modelos soportados en VPR, que están permitiendo alcanzar buenos resultados en los procesos de logística de transporte y distribución de productos y servicios.

Palabras Clave

Problema de ruteo de vehículo; VRP; modelos heurísticos; modelos metaheurísticos.

Abstract

This article presents a review of the literature about some of the most important mathematical, heuristic and meta-heuristics models contributing to the solution of the Vehicle Routing Problem [VPR] –considered as an complex problem by being stochastic and polynomial–, which is determined by a set of routes that begin and end at a warehouse or deposit and each route is carried out by a single vehicle, on a route, through which global transportation costs are minimized and the demand and other operating constraints are satisfied. The paper also includes the advance of results obtained in two medium-sized Colombian companies. As a part of research project, they are beginning its implementation, obtaining satisfactory results in their process of transportation logistics and products and services distribution.

Keywords

Vehicle Routing Problem; VRP; heuristic models; meta-heuristic models.

I. INTRODUCCIÓN

El problema de ruteo de vehículos [*Vehicle Routing Problem*, VRP] tiene muchas aplicaciones en casos reales: recolección de residuos sólidos, distribución de mensajería, paquetes y materiales, operación de limpieza de calles; rutas de buses escolares, ruta de vendedores y rutas de mantenimiento de vías y servicios públicos, transporte de personas incapacitadas, etc.

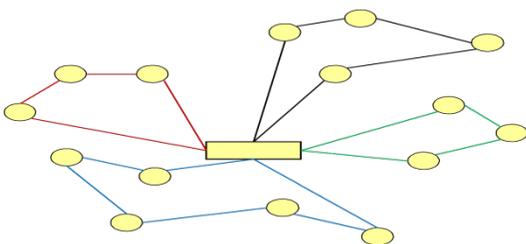
Los investigadores han estado muy interesados en estudiar el VRP por dos razones básicas: el método es práctico y es complejo; Lenstra y Rinnoo-Kan (1981) al analizar su complejidad concluyeron que el problema de VRP es no determinístico polinomial.

Los pioneros del VRP fueron Dantzig y Ramser (1959), ellos propusieron la primera formulación matemática y algorítmica del VRP aplicado a un problema real. Cinco años después, Clark y Wright (1964) mejoraron el enfoque heurístico propuesto por ellos. Después de esto se han realizado muchas propuestas de algoritmos y modelos del VRP.

A. Componentes y variantes clásicas del VRP

Los componentes fundamentales del VRP, son: la red de carreteras, los clientes, los depósitos, los vehículos y los conductores (ver Figura 1). Para hacer diferentes versiones de este problema se pueden interrelacionar diferentes restricciones y situaciones con objetivos particulares; las versiones más comunes del VRP son: limitación básica de capacidad [*Constrained Vehicle Routing Problems*, CVRP], distancia y capacidad limitada [*Distance Constrained Capacitated Vehicle Routing Problems*, DCVRP], limitación por ventanas de tiempo [*Vehicle Routing Problem with Time Windows*, VRPTW], con viajes de regreso [*Vehicle Routing Problem with Backhauls*, VRPB], con recogida y entrega [*Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery*, VRPPD] y cualquier otra combinación de estas variantes.

Figura 1. Esquema del VRP



VRP limitado por capacidad

La versión clásica del VRP es CVRP. En este problema cada vehículo tiene una capacidad conocida y no es permitido cargar el vehículo por encima de esa capacidad. Hay dos versiones de CVRP: ACVRP, cuando la matriz de costos es asimétrica, y SCVRP cuando la matriz de costos es simétrica.

La formulación de programación lineal entera de ACVRP propuesto por Toth y Vigo (2002) se plantea de la siguiente manera:

a) Supuestos

- la demanda es determinística;
- la demanda puede no estar dividida;
- los vehículos son similares;
- los vehículos están en un solo depósito central; y
- las restricciones de capacidad de los vehículos son impuestas.

b) Entradas

- $G = (V, A)$: un gráfico completo;
- $V = \{0, \dots, N\}$: el conjunto de vértices;
- A : el conjunto de arcos;
- D_j : la demanda de cada cliente ($D_0=0$);
- C_{ij} : el costo del viaje (desde el vértice i al vértice j);
- SCV : el conjunto de clientes;
- $d(S) = \sum d_i$: La demanda total del conjunto;
- K : el número de vehículos idénticos;
- C : la capacidad de cada vehículo; y
- $K_{min}, r(S)$: el número mínimo de vehículos necesarios.

c) Salidas

$X_{ij} = 1$ si el arco $(i,j) \in A$ pertenece a la solución óptima y 0 en caso contrario

d) Función objetivo y restricciones:

$$\min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ij}$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\}$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\}$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0} = K$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j} = K$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \geq r(S) \quad \forall S \subseteq V \setminus \{0\}, S \neq \emptyset$$

$$x_{ij} = \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V$$

Las dos restricciones iniciales son de entrada y de salida, respectivamente; las dos siguientes establecen los requerimientos del depósito; la desigualdad última es la restricción de capacidad, que estipula que cada corte $(V/S, S)$ definido por un conjunto de clientes S es atravesado por un número de arcos más grande que $r(S)$.

VRP con restricciones de distancia, capacidad y tiempo

El DCVRP es una variación de CVRP en la cual las restricciones de capacidad del vehículo y la distancia máxima son de obligatorio cumplimiento. En este tipo de problemas, cada recorrido no debe exceder la distancia establecida; el modelo simétrico DCVRP de Laporte, Nobert y Desrochers (1985) representa uno de los mayores aportes de solución a esta versión de VRP.

El VRPTW es la extensión de CVRP donde el servicio a cada cliente debe comenzar con un tiempo específico y el vehículo debe permanecer en el local del cliente durante el servicio. El modelo de Toth y Vigo (2002) de VRPTW ilustra muy bien la anterior variación.

VRP con devoluciones

En el VRPB, los clientes pueden exigir la devolución de algunos productos recibidos. De hecho, este es una extensión del CVRP en la cual los clientes se dividen en dos subconjuntos: la línea de recorrido y la línea de regreso. Cada línea de recorrido de clientes requiere una cantidad definida a ser entregada, mientras que una cantidad determinada de productos debe ser recogida al regreso de las entregas a los clientes.

Ese tipo de distribución mixta genera un ahorro significativo en el costo de transporte, porque se puede visitar a los clientes de regreso, mientras son entregados los productos a los clientes de la línea de transporte. El supuesto es que en cada ruta todas las entregas se efectúan antes de realizar la recogida de las devoluciones.

VRP con recogida y entrega

En VRPPD los vehículos tienen dos conjuntos de tareas, uno de mercancías que entregan a los clientes, el otro de los otros bienes recogidos en las instalaciones del cliente.

En el VRPPD una flota heterogénea de vehículos debe satisfacer un conjunto de requerimientos; cada requerimiento está definido por el punto de recogida, el punto de entrega correspondiente y una cantidad demandada a transportar entre estos lugares.

El VRPPD se puede formular como un modelo de programación lineal entera mixta como lo proponen Hoff, Gribkovskaia, Laporte, y Løkketangen (2007).

B. Otras variantes de VRP

Otras variaciones del VPR que han sido estudiadas recientemente en la literatura son: VRP abierto (Open VRP, OVRP), VRP con múltiples depósitos (Multi Depot VRP), VRP con mezcla de flotas (Mixed Fleet VRP MFVRP), VRP periódico (Periodic VRP), VRP estocástico (Stochastic VRP) y VRP difuso (VRP Fuzzy).

VRP Abierto

La característica más importante del OVRP es que los vehículos no están obligados a regresar a la estación. Este tipo de problema se presenta en empresas que no son dueñas del vehículo o de la flota en su totalidad, o cuando se posee una flota de vehículos inadecuada para cumplir con la demanda de todos los clientes. Los vehículos de alquiler, serán asignados a las rutas y no tienen que volver al centro de distribución –depósito– de la compañía.

La solución del problema proporcionará a la empresa el número mínimo de vehículos que deben ser contratados con el fin de servir a los clientes, y el conjunto de rutas que minimice el costo de viaje.

El OVRP recibió muy poca atención en la década de los ochenta; en cambio, a partir del año 2000 se han llevado a cabo varias investigaciones exitosas, como la realizada por Repoussis, Tarantilis, y Ioannou (2007), utilizando la búsqueda Tabú y el algoritmo recocido determinístico.

VRP multidepósito

A diferencia del VRP clásico, en el MDVRP existe más de un depósito o bodega. En este problema cada cliente

recibe la visita de un vehículo que parte de uno de los depósitos.

El MDVRP puede ser visto como un problema de agrupamiento, en el sentido de que sale un conjunto de vehículos por depósito. Por lo tanto, la MDVRP puede ser resuelta en dos etapas: primero, los clientes deben asignarse a los depósitos; segundo, los clientes asignados al mismo depósito deben ser unidos entre sí a través de rutas. Giosa, Tansini, y Viera (2002) utilizaron un enfoque razonable dividiendo el problema en sub-problemas, ya que hay varios depósitos y se debe resolver cada sub-problema por separado.

Crevier, Cordeau, y Laporte (2007) resumieron los trabajos sobre MDVRP realizados entre 1969 y 2002, y Montoya, López, Nieto, Felizzola, y Herazo (2015) realizaron una revisión de la literatura del VRP con múltiples depósitos hasta 2014.

VRP flota mixta

MFVRP es un tipo de VRP que difiere de la versión clásica en el uso de una flota de vehículos heterogénea que tienen diversas capacidades y costos variables. El costo de enrutamiento es la suma de los costos fijos y variables, y éste último está dado en proporción a la distancia recorrida.

Hay tres tipos de MFVRP: Taillard (1999) introdujo el primer tipo, en él hay restricciones en el número de vehículos disponibles de cada tipo; Golden, Assad, Levy, y Gheysens (1984) introdujeron el segundo tipo, en él se utiliza el mismo valor para los costos variables, independientemente del tipo de vehículo, se tiene un número ilimitado de vehículos de cada tipo, y es considerado como la mezcla de flotas de vehículos (VFM); Salhi, Imran, y Wassan (2014) propusieron el tercer tipo, éste considera diferentes costos variables –dependiendo del tipo de vehículo– y un número ilimitado de vehículos de cada tipo.

Debido a la complejidad de la MFVRP, se han hecho algunos intentos de formularlo utilizando programación lineal entera mixta; sin embargo, Wassan y Osman (2002) sostienen que ningún algoritmo exacto para MFVRP ha presentado resultados confiables.

VRP con entrega dividida

SDVRP es un derivado del VRP en el cual el mismo cliente puede ser servido por diferentes vehículos si se

reducen los costos generales. Este problema fue presentado por primera vez por Dror y Trudeau (1989), quienes demostraron que las entregas divididas representan ahorros, tanto en la distancia total recorrida, como en el número de vehículos utilizados.

VRP periódico

En el PVRP un conjunto de clientes debe ser visitado en un horizonte dado de tiempo, una o varias veces; el PVRP con opción de servicio (PVRP-SC) es una variante de la PVRP en la que la frecuencia de visita a nodos es una variable de decisión del modelo.

La solución del problema requiere la asignación de un régimen de visitas a cada cliente. Para cada día del horizonte de tiempo las rutas de los vehículos deben definirse, de tal manera que se visiten todos los clientes según el horario asignado en ese día.

Por lo anterior, este VRP tiene que ser resuelto por cada día planeado; en este caso, la selección de los horarios de visita y la definición de las rutas son dos problemas interrelacionados. Esta característica es esencial en algunas aplicaciones –tales como recolección de residuos–, problemas en los que cada cliente tiene que ser servido en un determinado período.

VRP estocástico

En la definición clásica del VRP, los parámetros asociados, tales como costos, demanda de los clientes y tiempos de viaje del vehículo, son determinísticos. El SVRP surge cuando algunos elementos del problema son aleatorios. Los tipos más comunes son los siguientes:

- el VRP con demandas estocásticas (VRPSD), donde la demanda de cada cliente se supone que sigue una distribución de probabilidad dada;
- el VRP con el tiempo de viaje estocástico;
- el VRP con clientes estocásticos, donde no se conoce con certeza la presencia de cada cliente; y
- el VRP con el tiempo de servicio estocástico.

Por su complejidad, el SVRP es modelado a través de programación estocástica entera, como los procesos de Markov. También se han venido obteniendo resultados exitosos en los últimos años a través de algoritmos metaheurísticos como los planteados por Zare-Reisabadi y Mirmohammadi (2015) y Abdulkader, Gajpal, y El-Mekkawy (2015), los cuales se constituyen una nueva

alternativa a nivel de marco de referencia para resolver el problema computacional del VRP.

VRP difuso

Existe amplia evidencia de que: los valores exactos de las demandas medias, los tiempos de viaje, la cantidad y la ubicación de los clientes; y las respectivas distribuciones de probabilidad, son muy difíciles de obtener. En algunos casos, también es difícil de describir los parámetros del problema y las variables aleatorias debido a la escasez de datos a analizar; en estos casos, se acude a los métodos de la teoría de conjuntos difusos, con lo cual se hace posible modelar con éxito los problemas que contienen un elemento de incertidumbre, subjetividad o vaguedad.

La lógica difusa fue utilizada por Teodorovic y Pavkovic (1996) en VRP cuando las demandas eran inciertas. El modelo se basa en el algoritmo heurístico de barrido, las reglas de la aritmética difusa y la lógica difusa.

Cheng y Gen (1995) introdujeron el concepto de difuso [$fuzzy$] al tiempo en la ruta dentro del contexto de la programación; ellos representaban la ventana de tiempo difusa en dos tipos: el intervalo tolerable de tiempo de servicio y el tiempo conveniente para el servicio.

C. Técnicas para solucionar las diversas variantes del VRP

Se han propuesto diferentes métodos de solución para las diversas variantes del VRP, incluyendo algoritmos exactos, técnicas heurísticas y metaheurísticas. Cuando aumenta, tanto el número de vértices “n”, como su conectividad con las restricciones de capacidad (*Connectivity Capacity Constrains*, CCC), se provoca un aumento dramático en el tiempo de cálculo, por lo que los algoritmos exactos ya no son eficaces.

Montoya et al., (2015) resumen la distribución de técnicas utilizadas para solucionar el MDVRP en: metaheurísticas (42%), heurísticas (33%) y algoritmos exactos (25%).

Los algoritmos exactos utilizados para el CVRP y VRPTW son principalmente: ramificación-acotamiento y ramificación-corte y métodos de solución con base en el revestimiento acotado o determinístico.

Una gran cantidad de técnicas heurísticas y metaheurísticas fue propuesta para resolver el CVRP, algunas de estas son el recocido simulado, la búsqueda tabú, los algoritmos genéticos, la colonia de hormigas y las

redes neuronales. Una buena referencia para el estudio de CVRP y DCVRP es Laporte (1992); y sobre VRPTW Cordeau, Laporte, y Mercier (2001).

Al igual que otras variantes del VRP, se sabe que VRPB es un problema NP-Hard [*Non deterministic Polynomial-time Hard*], esto es, de difícil solución, por ello se han propuesto muchos algoritmos heurísticos para la solución aproximada del problema con las matrices de costos simétricos o euclidianas.

Para el VRPPD, Berbeglia, Cordeau, Gribkovskaia, y Laporte (2007) y Parragh, Doerner, y Hartl (2008), han propuesto algoritmos metaheurísticos y enfoques de optimización basados en la descomposición de Benders, en programación dinámica y en enfoques poliédricos.

II. CASOS DE ESTUDIO

En Colombia los grandes jugadores en el uso de soluciones del VRP para mejorar sus sistemas de distribución han sido las grandes empresas, lo que ha generado una gran brecha entre ellas y las pequeñas y medianas empresas, en las cuales las decisiones acerca de la definición, secuenciación y programación de rutas se elaboran de forma empírica. A continuación se presentan a nivel de oportunidad, dos empresas medianas con casos aplicativos en desarrollo: una empresa de mensajería y una empresa municipal de aseo.

A. Caso 1: Empresa de mensajería masiva

Esta empresa ofrece servicios de distribución especializada de objetos postales masivos y de carga liviana, a nivel urbano, regional y nacional. La gran mayoría de sus clientes son corporativos, e incluye empresas de telecomunicaciones, empresas del sector financiero y empresas del sector público.

Actualmente la empresa cuenta con catorce sedes propias ubicadas en: Armenia, Bogotá, Bucaramanga, Buenaventura, Cali, Cúcuta, Ibagué, Manizales, Neiva, Palmira, Pereira, Pasto, Popayán y Tuluá. La sede principal está en Cali; le sigue, en orden de importancia, la sede de Bogotá. Todo está centralizado en estas dos sedes, pero cada sede maneja su distribución local y regional, de acuerdo con la cobertura de cada una de ellas. La distribución local se realiza de acuerdo con la zonificación realizada en la ciudad o municipio donde se encuentre ubicada la sede –por ejemplo, en el área formada por los municipios de Cali, Yumbo y Jamundí, en el Valle del

Cauca, al sur de Colombia (unidos, de hecho), se manejan 83 zonas—. Las distribuciones regionales se realizan normalmente con la subcontratación de transportadoras, al igual que la distribución a otras sedes.

El trabajo que se realiza en cada sede es el recibo o recolección de los envíos según sea caso, la clasificación y organización de los mismos y la distribución a nivel local, regional o nacional, para lo cual no se utilizaba ningún sistema formal de enrutamiento, sino que lo hacía cada mensajero antes de salir para la zona asignada. Dada la variabilidad de clientes, la contratación particular que se hace para cada uno y la cantidad masiva de documentos que mueve, se puede decir que la red de transporte que debe manejar la empresa es bastante compleja.

La aplicabilidad que se le está empezando a dar al VRP en esta empresa es múltiple debido a la informalidad y complejidad del sistema de distribución, además de una gran cantidad de variables que afectan de manera directa la red de transporte.

Aplicabilidad del VRP clásico

Este VRP se aplica a la red de distribución local ya que los mensajeros inician su recorrido en la sede, después de recibir la asignación de la zona; los vehículos utilizados para esta labor son motos y bicicletas, e inclusive se pueden realizar a pie, dependiendo de la clasificación de la zona asignada, ya que existen zonas de alto riesgo donde no se puede ingresar con algún tipo de vehículo.

Aplicabilidad del VRPPD

Bajo este VRPPD, los vehículos tienen dos conjuntos de tareas, uno de mercancías que entregan a los clientes, otro de bienes recogidos en las instalaciones del cliente. Este caso es muy frecuente en la distribución regional y nacional, donde los transportistas, en la ruta que tienen asignada para entrega, también realizan recogidas de paquetes o documentos; esto se puede presentar de dos maneras: recogidas en la misma dirección del cliente o recogidas en direcciones que están muy cerca de él o en la misma ruta de entrega.

Aplicabilidad del OVRP

La característica importante del OVRP es que los vehículos no están obligados a regresar a su estación de origen; en un porcentaje bastante considerable la empresa realiza la distribución local de documentos en vehículos de bajo desempeño y bajo costo —como las bicicletas y las

motocicletas— para la distribución de documentos puerta a puerta; para el caso de la distribución masiva, regional y nacional, la empresa realiza una subcontratación de transportistas que incluye, desde grandes empresas nacionales de transporte, hasta transportistas independientes.

Aplicabilidad del PVRP

En el PVRP un conjunto de clientes tiene que ser visitado en un horizonte de tiempo dado, una o más veces; diferentes clientes, por lo general, requieren diferentes visitas en determinado tiempo.

La empresa maneja diferentes tipos de documentos para diferentes clientes, como facturas de pago y extractos bancarios, los cuales se entregan periódicamente, por lo general una vez al mes, al mismo destinatario. Por lo tanto, el VRP tiene que ser resuelto cada día; en tal caso, la elección de los horarios de visita y la definición de las rutas son dos problemas interrelacionados.

B. Caso 2: Empresa municipal de aseo

Esta empresa es una organización cuya actividad principal es la recolección de residuos sólidos en una de las principales ciudades colombianas. Una de las operaciones que se realiza en esta empresa es la recolección de residuos peligrosos —residuos hospitalarios e industriales—, los cuales se recogen por sectores, norte y sur.

Cada ruta tiene un número de clientes, los cuales se agrupan por cercanía, estos grupos se asignan a días específicos de la semana: lunes y martes, norte; miércoles y jueves, sur; y así sucesivamente.

Aunque este problema de ruteo es logística inversa se están dando algunas soluciones aplicando algunas versiones del VRP.

Aplicabilidad del CVRP

En esta variación del VRP se tiene en cuenta la capacidad del vehículo que realizará el recorrido; la empresa cuenta con una flota compuesta por cinco turbo camiones, cada uno con una capacidad de carga de cinco toneladas; de estos vehículos, para la recolección de residuos hospitalarios se utilizan solo tres, los cuales no son utilizados en toda su capacidad, por lo que es posible reducir el número y, en consecuencia, disminuir costos de transporte tales como el combustible y la mano de obra.

Aplicabilidad del VRP con entrega dividida

La empresa tiene clientes que demandan varias recolecciones durante el día, uno de ellos, una clínica privada ubicada al sur de la ciudad, la cual debe ser visitada dos veces al día; para cumplir con la demanda se han determinado dos rutas con vehículos y operarios diferentes, una en horas de la mañana, otra en horas de la noche. Esto se estableció al analizar que así los costos de la recolección disminuían.

Aplicabilidad del VRPTW

El caso VRP con ventanas de tiempo en la operación esta empresa se presenta porque algunos clientes se deben visitar a horas específicas, debido a que la estructura de las instalaciones del clientes no está diseñada adecuadamente; dicho de otra manera, si no se cumple con estos horarios, los residuos hospitalarios no se podrían recoger, ya que se contaminaría a sus pacientes.

III. CONCLUSIONES Y ESTUDIOS FUTUROS

En este artículo presentamos una breve revisión de la literatura del VRP, uno de los problemas más complejos en la logística de distribución, que ha sido estudiado a profundidad por diferentes investigadores reconocidos, principalmente a nivel internacional.

Se presentaron las diferentes versiones del VRP y los algoritmos de solución utilizados en los últimos trece años, destacándose una marcada tendencia creciente al uso de las técnicas metaheurísticas para solucionar los modelos de VRP, en detrimento del uso de los algoritmos exactos.

La presentación de los dos casos aplicativos en empresas medianas colombianas, pretende visibilizar las grandes oportunidades de mejoramiento en el servicio al cliente y la reducción de costos operativos de transporte y distribución que representa para empresas de esta escala, que pretendan mejorar sus niveles de competitividad y a su vez, eliminar barreras sustentadas en el paradigma de que el uso de modelos matemáticos y técnicas heurísticas y metaheurísticas es exclusivo de las grandes empresas.

El trabajo presentado permite sentar los fundamentos para futuros desarrollos de software que permitan fácil accesibilidad y uso extensivo de programas de ruteo en las pequeñas y medianas empresas, que contribuyan a mejorar su competitividad logística.

IV. REFERENCIAS

- Berbeglia, G., Cordeau, J. F., Gribkovskaia, I., & Laporte, G. (2007). Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey. *Journal of the Spanish Society of Statistics and Operations Research*, 15, 1-31.
- Cheng, R., & Gen, M. (1995). Vehicle routing problem with fuzzy due-time using genetic algorithms. *Journal of Japan Society for Fuzzy Theory*, 7(5), 1050-1061.
- Clark, G. & Wright, J. V. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 12(4), 568-581.
- Cordeau, G. F., Laporte, G., & Mercier, A. (2001). A unified Tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *Journal of the Operational Research Society*, 52, 928-936.
- Crevier, B., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2007). The multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes. *European Journal of Operational Research*, 176 (2), 756-773.
- Danzig, G. B. & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6, 80-91.
- Dror, M. & Trudeau, P. (1989). Savings by split delivery routing. *Transportation Science*, 23, 141-145.
- Giosa, I. D., Tansini, I. L., & Viera, I. O. (2002). New assignment algorithms for the multi-depot vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 53, 977-984.
- Golden, B., Assad, S., Levy, L., & Gheysens, F. (1984). The fleet size and mix vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 11(1), 49-66.
- Hoff, A., Gribkovskaia, I., Laporte, G., & Løkketangen, A. (2009). Lasso solution strategies for the vehicle routing problem with pickups and deliveries. *European Journal of Operational Research*, 192(3), 755-766.
- Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59, 345-358.
- Laporte, G., Nobert, Y., & Desrochers, M. (1985). Optimal routing under capacity and distance restrictions. *Operations research*, 33, 1050-1073.
- Lenstra, J.K. & Rinnoo-Kan, A.H.G. (1981). Complexity of vehicle and scheduling problems. *Networks*, 11(2), 221-227.
- Montoya, J., López, J., Nieto, S., Felizzola, H., & Herazo, N. (2015). A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. *Computers & Industrial Engineering*, 79, 115-129.
- Parragh, S. N., Doerner, K. F., & Hartl, R. F. (2008). A survey on pickup and delivery problems. *Journal für Betriebswirtschaft*, 58(1), 21-51.
- Repoussis, P. P., Tarantilis, C. D., & Ioannou, G. (2007). The open vehicle routing problem with time windows. *Journal of the Operational Research Society*, 58(3), 355-367.
- Salhi, S., Imran, A., & Wassen, N. A. (2014). The multi-depot vehicle routing problem with heterogeneous vehicle fleet: Formulation and a variable neighborhood search implementation. *Computers & Operations Research*, 52, 315-325.

- Taillard, É. D. (1999). A heuristic column generation method for the heterogeneous fleet VRP. *Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle. Recherche Opérationnelle*, 33(1), 1-14.
- Teodorovic, C. & Pavkovic, G. (1996). The fuzzy set theory approach to the vehicle routing problem when demand at nodes is uncertain. *Fuzzy Sets and Systems*, 3, 307-317.
- P. Toht & D. Vigo (Eds.). (2014). *Vehicle routing: problems, methods and applications* [2a ed.]. Philadelphia, PA: SIAM.
- Wassan, N. A. & Osman, I. H. (2002). Tabu search variants for the mix fleet vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 53, 768-782.
- Zare-Reisabadi, E. & Mirmohammadi, H. (2015). Site dependent vehicle routing problem with soft time window: Modeling and solution approach. *Computers & Industrial Engineering* 90, 177-185.

V. CURRÍCULOS

Jairo Arboleda Zúñiga, MSc. Ingeniero Industrial (Universidad del Valle, 1985); Magister en Ingeniería Industrial con énfasis en Logística y Producción (Universidad del Valle, 2013); Diplomado en Supply Chain Management (IRCC-Florida, 1999). Cuenta con 26 años de experiencia laboral en funciones de gestión logística y gestión de la calidad y mejoramiento continuo en empresas multinacionales, pymes e instituciones públicas. Es docente-investigador del grupo Logística y Marketing [LOMA], adscrito a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Santiago de Cali (Colombia).

Xiomara López. Estudiante de Ingeniería Industrial de la Universidad Santiago de Cali (Colombia).

Yéssica Lorena Lozano. Estudiante de Ingeniería Industrial de la Universidad Santiago de Cali (Colombia).