

**PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN EN LA GESTIÓN LOGÍSTICA DE
DISTRIBUCIÓN: UNA REVISIÓN DE LITERATURA DE LA SOLUCIÓN DEL
PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS - VRP**

RICARDO ANDRÉS CADENA GONZÁLEZ

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE ECONOMÍA, ADMINISTRACIÓN Y NEGOCIOS
MAESTRÍA EN ADMINISTRACIÓN
BUCARAMANGA**

2018

**PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN EN LA GESTIÓN LOGÍSTICA DE
DISTRIBUCIÓN: UNA REVISIÓN DE LITERATURA DE LA SOLUCIÓN DEL
PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS - VRP**

RICARDO ANDRÉS CADENA GONZÁLEZ

Trabajo de Grado para optar al título de Magíster en Administración

Director: M.Sc. Orlando Federico González Casallas

Fecha de Entrega: 27 de Septiembre de 2018

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE ECONOMÍA, ADMINISTRACIÓN Y NEGOCIOS
MAESTRÍA EN ADMINISTRACIÓN
BUCARAMANGA**

2018

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	11
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	14
1.3 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo general	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
2. MARCO REFERENCIAL	17
2.1 ANTECEDENTES.....	17
2.2 MARCO TEÓRICO	22
2.2.1 Gestión Logística de Distribución.	22
2.2.2 Planeación de los sistemas de distribución	26
2.2.3 Relación entre transporte y logística de distribución.	28
2.2.4 Problema de Ruteo de Vehículos – VRP.....	29
2.2.5 Variantes del VRP	33
2.2.5.1 Problema de Ruteo de Vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW).33	
2.2.5.2 Problemas de Ruteo de Vehículos con variables estocásticas (SVRP)	
.....	34
2.2.5.3 Problema de Ruteo de Vehículos con entregas y recogidas	
simultáneas (VRPPD)	34
2.2.5.4 Problema de Ruteo de Vehículos con Backhauls (VRPB).....	35
2.2.5.5 Problema de Ruteo de Vehículos Dinámico (DVRP).....	36
2.2.6 Solución del Problema de Ruteo de Vehículos (VRP).....	37
2.2.6.1 Algoritmos exactos	37
2.2.6.2 Algoritmos Heurísticos.....	38
2.2.6.3 Algoritmos Metaheurísticos	40
3. DISEÑO METODOLÓGICO	44
3.1 TIPO Y ALCANCE	44
3.2 CARACTERÍSTICAS METODOLÓGICAS	44

3.2.1 Definición de criterios de búsqueda.....	44
3.2.2 Registro de información.....	47
3.2.3 Análisis de la información y presentación de resultados.	47
3.3 TÉCNICAS UTILIZADAS.....	48
4. PANORAMA GENERAL DEL ESTADO DEL ARTE DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS Y LOS MÉTODOS ANALÍTICOS PARA SU SOLUCIÓN	51
4.1 CALIDAD DE LA INFORMACIÓN CONSULTADA.....	51
4.2 VARIANTES DEL VRP Y MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN.....	54
4.3 ACTIVIDADES DE TRANSPORTE Y VARIANTES DEL VRP	60
5. ANÁLISIS DE LAS VARIANTES DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS	64
5.1 ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON RECOGIDAS Y ENTREGAS SIMULTÁNEAS (VRPPD)	64
5.1.1 Eficacia de los modelos utilizados para la solución del VRPPD.....	66
5.1.2 Características Empresariales.....	71
5.1.3 Brechas y Tendencias detectadas en la revisión bibliográfica.	74
5.2 ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON BACKHAULS.....	76
5.2.1 Eficacia de los modelos utilizados para la solución del VRPB	78
5.2.2 Características Empresariales.....	81
5.2.3 Brechas y Tendencias detectadas en la revisión bibliográfica	82
5.3 ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON VENTANAS DE TIEMPO.....	82
5.3.1 Eficacia de los modelos utilizados para la solución del VRPTW	86
5.3.2 Características Empresariales.....	98
5.3.3 Brechas y Tendencias detectadas en la revisión bibliográfica	109
5.4 ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON VARIABLES ESTOCÁSTICAS.....	114
5.4.1 Eficacia de los modelos utilizados para la solución del SVRP	116
5.4.2 Características Empresariales.....	119
5.4.3 Brechas y Tendencias detectadas en la revisión bibliográfica	122

5.5 ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON CAPACIDAD.....	123
5.5.1 Eficacia de los modelos utilizados para la solución del CVRP	125
5.5.2 Características Empresariales.....	134
5.5.3 Brechas y Tendencias detectadas en la revisión bibliográfica	142
5.6 ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS DINÁMICO	145
5.6.1 Eficacia de los modelos utilizados para la solución del DVRP	147
5.6.2 Características Empresariales.....	149
5.6.3 Brechas y Tendencias detectadas en la revisión bibliográfica	151
6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y RECOMENDACIONES.....	154
6.1 PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS PARA GRANDES CIUDADES	158
6.2 NATURALEZA DINÁMICA DE LAS VARIABLES DEL VRP.....	159
6.3 VRP CON VARIABLES AMBIENTALES	161
6.3.1 Transporte de Residuos Sólidos	161
6.3.2 VRP con vehículos eléctricos	163
6.3.3 Uso de Variables Ambientales	164
6.4 TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN PARA EL VRP	165
7. CONCLUSIONES	168
BIBLIOGRAFÍA	172

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Herramientas o Técnicas utilizadas en el diseño metodológico	48
Tabla 2. Clasificación de los artículos encontrados.	51
Tabla 3. Clasificación de los artículos según disciplina o área de interés.....	52
Tabla 4. Clasificación de los artículos según año de publicación.	53
Tabla 5. Número de artículos según variante VRP y método de optimización utilizado.....	56
Tabla 6. Variantes del VRP por año de publicación.....	59
Tabla 7. Número de artículos según actividad de transporte.....	61
Tabla 8. Variantes del VRP, objetivos adicionales del modelo y subvariantes encontradas.	62
Tabla 9. Métodos de solución de la variante VRPPD	67
Tabla 10. Métodos de solución de la variante VRPTW	87
Tabla 11. Métodos de solución de la variante SVRP	117
Tabla 12. Métodos de solución de la variante CVRP	125
Tabla 13. Métodos de solución de la variante DVRP	147

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Marco Taxonómico propuesto para el VRPPD	65
Figura 2. Líneas de investigación - VRPPD.....	74
Figura 3. Marco Taxonómico propuesto para el VRPB.....	77
Figura 4. Características empresariales - VRPB.....	81
Figura 5. Marco Taxonómico propuesto para el VRPTW.....	83
Figura 6. Marco Taxonómico propuesto para el VRPTW – Continuación.....	84
Figura 7. Características empresariales - VRPTW	103
Figura 8. Caracterización de variables – Modelo de Distribución e-commerce. ..	111
Figura 9. Marco Taxonómico propuesto para el SVRP.....	114
Figura 10. Marco Taxonómico propuesto para el CVRP.....	124
Figura 11. Marco Taxonómico propuesto para el DVRP.....	145
Figura 12. Investigaciones futuras relacionadas con el estudio del VRP.....	158

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Clasificación de los artículos encontrados – Presencia Relativa.....	51
Gráfico 2. Clasificación de los artículos según disciplina o área de interés – Presencia Relativa.	52
Gráfico 3. Variante VRP y método de optimización utilizado – Presencia Relativa.	57

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN EN LA GESTIÓN LOGÍSTICA DE DISTRIBUCIÓN: UNA REVISIÓN DE LITERATURA DE LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS - VRP

AUTOR(ES): RICARDO ANDRÉS CADENA GONZÁLEZ

PROGRAMA: Maestría en Administración

DIRECTOR(A): ORLANDO FEDERICO GONZÁLEZ CASALLAS

RESUMEN

El presente trabajo de grado tiene como objetivo realizar una revisión de literatura del Problema de Ruteo de Vehículos - VRP por sus siglas en inglés – que es uno de los problemas de gestión logística que más ha llamado la atención por parte de investigadores especializados, debido a la complejidad que conlleva su solución. Para el análisis de la información, se aplicó una estrategia de búsqueda de artículos científicos de alto nivel publicados en el periodo de 2005 a 2017, que contempla el análisis de las estructuras de optimización y seis variantes del problema de ruteo. Se genera una discusión, análisis y argumentación crítica frente al estudio del VRP y la gestión logística de distribución donde se destacan brechas, diferencias teóricas y tendencias de conocimiento, se evidencien características gerenciales y empresariales que se han tenido en cuenta para la solución del problema, y se compara la eficacia de los distintos modelos heurísticos y técnicas de optimización utilizados para resolver el VRP.

PALABRAS CLAVE:

VRP, Gestión Logística, Revisión de Literatura

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: OPTIMIZATION PROBLEMS IN DISTRIBUTION LOGISTICS MANAGEMENT: A LITERATURE REVIEW OF THE SOLUTION OF THE VEHICLE ROUTING PROBLEM - VRP

AUTHOR(S): RICARDO ANDRÉS CADENA GONZÁLEZ

FACULTY: Maestría en Administración

DIRECTOR: ORLANDO FEDERICO GONZÁLEZ CASALLAS

ABSTRACT

The goal of this thesis is to carry out a literature review of the Vehicle Routing Problem – VRP, which is one of the logistical management problems that has attracted the most attention from specialized researchers, due to its complexity. For the analysis of the information, a search strategy for high level scientific articles published in the period from 2005 to 2017 was applied, which includes the analysis of the optimization structures and six variants of the routing problem. A discussion, analysis and critical argumentation is generated where gaps, theoretical differences and knowledge trends are highlighted, showing managerial and business characteristics that have been taken into account for the solution of the problem are evidenced. Also the effectiveness of the different heuristic models and optimization techniques used to solve the VRP is compared.

KEYWORDS:

VRP, Logistic Management, Literature Review

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

La logística moderna ha recibido recientemente una creciente atención por parte de los gobiernos, empresas, organizaciones e investigadores a fin de lograr sistemas de planificación, programación y transporte que sean receptivos y eficientes, de tal manera que permita a dichos actores ser competitivos en sus entornos. La aplicación de técnicas de automatización y herramientas modernas de gestión está motivada por el hecho de que las estrategias actuales de logística de distribución no contribuyen al sostenimiento e incremento de la eficiencia y en ocasiones están supeditadas a decisiones poco planificadas.

La presencia de todos los factores anteriores exige nuevas formulaciones y modelos teóricos que facilite la toma de decisiones y permita a las empresas conocer la manera en que invierten sus recursos.

Uno de los problemas que más ha llamado la atención en el área de gestión logística por parte de los investigadores y empresarios es el problema de ruteo de vehículos (Vehicle Routing Problem – VRP, por sus siglas en inglés) que consiste en asignar rutas de costo mínimo, a una flota de vehículos, para cumplir con los requerimientos de las empresas clientes de una organización. En este problema de transporte, cada vehículo sale del almacén, sirve a un subconjunto de clientes de manera compatible con su capacidad y finalmente regresa al depósito. Para resolver aplicaciones en el contexto real, se consideran las variantes de VRP, como el efecto de ventanas de tiempo, múltiples equipos de transporte, carga distribuida, entre otras.

El VRP es uno de los problemas de logística de distribución con mayor complejidad de solución debido a la estructura matemática asociada a las restricciones, así como las interrelaciones y naturaleza discreta de las variables que lo componen. En este sentido, los investigadores han desarrollado modelos y

técnicas de optimización complejas que han permitido a empresas de operación logística, evaluar alternativas para seleccionar las mejores decisiones al momento de invertir capital de trabajo y de planear las actividades de distribución. La literatura del VRP trasciende varias disciplinas académicas, desde la gestión de cadenas de suministro, hasta el diseño de modelos matemáticos y la programación de algoritmos computacionales.

El presente trabajo va encaminado a realizar una revisión de literatura del VRP, considerando artículos publicados en el periodo de 2005 a 2017 considerando a la aplicación de estructuras de optimización y algoritmos del VRP, así como sus variantes en términos de restricciones o criterios de mejoramiento logístico; de tal manera que se genere una discusión, análisis y argumentación crítica frente al estudio del VRP y la gestión logística de distribución; se destaquen brechas, diferencias teóricas y tendencias de conocimiento, se evidencien características gerenciales y empresariales que se han tenido en cuenta para la solución del problema, y se compare la eficacia de los distintos modelos heurísticos y técnicas de optimización utilizados para resolver el VRP.

El documento inicialmente expone el planteamiento del problema, la relación de antecedentes teóricos y prácticos del problema VRP; seguidamente se presenta el diseño metodológico propuesto que incluye la estrategia de búsqueda de información, resultados del estado del arte, análisis de las variantes VRP encontradas en la revisión de literatura; finalmente se procede con la discusión de los hallazgos descriptivos, así como las recomendaciones para futuras investigaciones en el campo del transporte en la logística de distribución.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La logística de distribución es un término ampliamente utilizado dentro de la administración de operaciones, cuyo objetivo es nivelar las variaciones o la escasez de productos de clientes que se encuentran ubicados en determinadas áreas o zonas geográficas. Los gerentes de operaciones logísticas buscan en todo momento optimizar o hacer uso eficiente de los recursos que componen la administración de dichas operaciones (Por ejemplo: recursos financieros, humanos o técnicos); de tal manera que los productos o servicios estén en el momento que el cliente (interno y/o externo) lo requiera con un mínimo costo para la empresa.

Dentro de los aspectos de la logística de distribución en las organizaciones, se considera la logística de transporte como un factor vital en las decisiones que debe evaluar el gerente de operaciones (Petrović, Madić, & Antucheviciene, 2018). La logística de transporte se puede subdividir en actividades internas – movimientos de insumos y materias primas, movimientos de producto en proceso y producto terminado hacia zonas de almacenamiento-, y actividades externas – proceso de distribución y entrega de mercancías a los clientes finales de las empresas-.

Como resultado del estudio y análisis de la logística de distribución en las cadenas de suministro, un amplio número de empresas con sistemas de distribución y despacho diseñan sus rutas sin utilizar herramientas de apoyo que les permita potenciar sus capacidades o, en algunas ocasiones, estas decisiones son abrogadas a cargos de los niveles operativos, los cuales se asumen que conocen mejor las rutas. Lo anterior, puede llevar a una considerable dilapidación de recursos. (Alexander, Armstrong, & McCulloh, 2011).

Ante esta situación, las empresas modernas demandan sistemas de modelamiento logístico que faciliten la planificación de sus actividades de distribución buscando una mejor precisión y control sobre sus decisiones.

En la toma de decisiones gerenciales, se considera la logística de transporte externo como un factor crítico para la evaluación, por parte de los clientes, de la satisfacción y reputación corporativa y del servicio que se presta. Por tanto, se propone la exploración de las problemáticas y procedimientos de solución frente a la logística de transporte externo en las empresas; de tal forma que se identifique las variables que inciden en las operaciones de transporte.

El número de interrelaciones de las variables que hacen parte del problema logístico de transporte puede llegar a ser complejo. (Jiang, Gee, Arokiasami, & Tan, 2014). En este sentido, las técnicas para hallar soluciones óptimas a dichas operaciones logísticas pueden no ser eficientes en términos de tiempo computacional debido a la cantidad de variables y restricciones del problema, lo que impide explorar todas las alternativas de solución. De acuerdo con Taha (2004), la búsqueda de la mejor solución cuando se hace combinación de variables de un problema se denomina "Optimización combinatoria".

Bajo este contexto, los problemas logísticos de transporte se pueden formular como modelos de optimización combinatoria -los cuales puede ser solucionados a través de técnicas exactas o heurísticas- lo que infiere que se tiene una representación parcial del problema logístico a tratar; por tanto, la combinación de variables que afectan al problema logístico se puede considerar como una propuesta de análisis para que el gerente de operaciones tome decisiones asertivas frente a la gestión de logística de transporte de una organización.

Uno de los problemas logísticos de transporte consiste en el envío de productos hacia los clientes, considerando limitaciones de capacidad, tiempo y prioridad de

atención. Dicho problema con sus limitaciones o restricciones, se conoce en el ámbito de la optimización combinatoria como el problema de ruteo de vehículos (Vehicle Routing Problem – VRP, por sus siglas en inglés). Estos problemas son catalogados por los expertos en investigación de operaciones como los más difíciles de resolver en el ámbito del modelamiento empresarial (Laporte, 2002).

Desde el punto de vista académico-investigativo, se han propuesto y estudiado modelos cuantitativos basados en procedimientos exactos y algoritmos heurísticos, que han permitido encontrar soluciones adecuadas al problema VRP. Cordeau, Laporte, Savelsbergh, & Vigo (2007) especifican que de acuerdo con las variables y restricciones que se definan, el problema VRP poseen múltiples variantes, así como alternativas para abordar estos problemas mediante procedimiento exactos y heurísticos.

Dentro de las variantes del problema VRP, se considera las restricciones temporales o ventas de tiempo –VRPTW- (Cordeau, Laporte, Savelsbergh, & Vigo, 2007), restricciones de capacidad –CVRP- (Laporte, 2002), restricciones de depósitos múltiples –MDVRP- (Ramachandiran, Suresh, & Ravisasthiri, 2015), restricciones de variación de la demanda –SVRP- (Berhan, Beshah, & Beshah, 2014), entre otras. Lo anterior, sugiere que la complejidad de encontrar la solución de un problema logístico de transporte tipo VRP, está altamente relacionado con el número de instancias del problema y las restricciones asociadas al mismo.

En este sentido, la presente investigación tiene como finalidad indagar sobre los avances científicos que han permitido definir modelos analíticos exactos y heurísticos para abordar el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP), a través de una revisión sistemática de literatura. Lo anterior permite establecer preguntas de investigación asociadas a la temática de la logística de transporte. Como primera instancia, el desarrollo científico enfocado a mejorar la solución de problemas de transporte VRP permite generar la pregunta: ¿Cómo se ha abordado la

construcción de modelos exactos y heurísticos referentes al problema VRP, de tal forma que represente la realidad de la gestión logística de distribución en las empresas?

Adicionalmente, frente a la construcción y tratamiento de los modelos cuantitativos asociados al problema del VRP: ¿Cuáles son los enfoques de solución para los modelos exactos y heurísticos relacionados con el problema VRP, y si estos enfoques han permitido el desarrollo de nuevas tendencias investigativas para encontrar la solución de los problemas logísticos en las organizaciones?, lo que conlleva a generar una última pregunta frente a la temática a tratar: ¿Cuál ha sido el impacto de la aplicación de estas técnicas cuantitativas referente al problema VRP en la gestión logística de transporte en las empresas?

1.2 JUSTIFICACIÓN

El interés por resolver problemas de ruteo de vehículos para mejorar el desempeño en la gestión logística surge, en parte, por la complejidad de abordar el problema de transporte. Es evidente que la complejidad asociada a su solución también ha permitido el desarrollo herramientas matemáticas avanzadas, aplicadas a diversos sectores e industrias.

Otra perspectiva que debe considerar el gerente de operaciones en los problemas de logística de transporte, está definido en los costos asociados con la operación de vehículos en actividades de distribución. En algunos países de América Latina, el costo de transporte se estima en un 11,4% sobre el precio de venta de la mercancía; esta información está consagrada en estudios de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2014). Por esta razón, el control de los costos impacta de manera significativa en la fijación de precios de venta de los productos o servicios, así como en la estimación de costos totales de operación de las cadenas de suministro.

Además, la necesidad de mejorar las actividades de ruteo también ha estimulado el desarrollo de teorías y aplicaciones para su solución. Los expertos han definido métodos aproximados o heurísticos que permiten encontrar soluciones factibles del problema VRP en un tiempo computacional razonable; así como métodos más robustos o metaheurísticas que tienen la particularidad de resolver problemas de gran complejidad de una manera sencilla. (Boussaïd et al., 2013)

En consecuencia, dada la importancia que tienen los problemas de distribución con flotas de transporte para diferentes industrias, la estimación de los costos de operación, y el desafío que representa para los investigadores tratar de determinar la complejidad de los problemas individuales y luego desarrollar algoritmos rápidos y robustos para resolverlos, se propone el presente proyecto de investigación basado en una revisión de la literatura referente al Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) para identificar su aplicación en sectores industriales o de servicios, así como las tendencias referentes a la solución de modelos matemáticos asociados al problema, y su impacto en las organizaciones.

1.3 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

- Analizar los modelos cuantitativos que han sido desarrollados para resolver el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP), en el marco de la gestión logística de distribución.

1.2.2 Objetivos específicos

- Destacar brechas y tendencias de conocimiento en los estudios relacionados con el Problema de Ruteo de Vehículos.
- Indicar el impacto de las características empresariales (tamaño, sector y/o industria) que se han tenido en cuenta en la estructura de los modelos cuantitativos y en los procedimientos de solución del Problema de Ruteo de Vehículos.
- Comparar la eficacia de los distintos modelos utilizados para la solución del Problema de Ruteo de Vehículos (VRP), atendiendo el periodo de estudio de la revisión desde el año 2005 al año 2017.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 ANTECEDENTES

El problema del ruteo de vehículos (VRP) desempeña un papel central en los campos de la distribución física y la logística. Existen trabajos publicados cuyo enfoque ha sido la revisión de literatura relacionada con problemas de ruteo de vehículos (VRP), encontrándose una amplia variedad de modelos de solución en diversas aplicaciones industriales tales como: ruteo de ambulancias (Cissé et al., 2017), ruteo de rutas escolares (Wang, He, He, & Xing., 2016), ruteo de flotas de vehículos con capacidad limitada, ruteo de carros de transporte de residuos (Hamdi, Labadie, & Yalaoui., 2014), taxis (Silva, Kokkinogenis, Câmara, & Ulisses., 2016), ruteo de transporte intermodal (Pino, et al., 2011), entre otros. Se destacan las siguientes investigaciones:

Cissé et al. (2017) relacionan en su investigación una visión completa de los modelos recientes aplicados a las rutas que se programan para atender servicios de salud a pacientes que viven en una misma área geográfica y que deben ser tratados en casa. En dicha investigación se utilizaron modelos que simulaban la planificación de rutas para atender emergencias médicas, urgencias vitales y atenciones programadas, teniendo en cuenta varias restricciones como la minimización de los gastos de viaje, la priorización de urgencias y los tiempos de desplazamiento y servicio, usando una flota de ambulancias limitada.

Silva, Kokkinogenis, Câmara, & Ulisses (2016) realizan una revisión de literatura asociada al servicio de compartición de taxis basado en el problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW). Dentro de esta investigación, los autores también utilizaron dos enfoques metaheurísticos para determinar los mejores planes de viaje para taxis compartidos, teniendo en cuenta el tiempo de recogida de los pasajeros y los destinos de cada uno. Se modeló el servicio

utilizando dos metaheurísticas con cuatro escenarios asociados al número de pasajeros. El análisis de las soluciones encontradas por los modelos propuestos indica que a medida que se incrementa el número de pasajeros, se obtiene un mejor desempeño de la propuesta algorítmica.

Por otro lado, Braekers, Ramaekers, & Van Nieuwenhuysse (2016) realizaron una investigación exhaustiva de la literatura académica relacionada con el ruteo de vehículos y concluyen que, si bien es cierto que el estudio del Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) y sus variantes han crecido en los últimos años, pocas revisiones de la literatura han hecho un esfuerzo por clasificar la información acumulada de las investigaciones, de los métodos de solución más utilizados y de las tendencias de investigación. Los autores revisaron la literatura del VRP publicada entre los años 2009 y 2015 (aproximadamente 300 artículos), propusieron una clasificación taxonómica de la misma, así como establecer tendencias de investigación relacionadas con el problema de ruteo de vehículos.

De la misma manera, Wang, He, He, & Xing (2016) realizaron una revisión de la literatura relacionada con el problema de Ruteo de Vehículos con múltiples objetivos o múltiples restricciones (MOVRP por sus siglas en inglés) e identificaron que las mejores soluciones en términos de minimización de los costos de las rutas, se lograron con algoritmos Bioinspirados, es decir, modelos de solución que simulan el modo de procesar la información y de resolver problemas basados en sistemas biológicos (comportamiento de las colonias de hormigas, colonia de abejas o enjambre de partículas). Los autores concluyen que los algoritmos bioinspirados pueden aplicarse con éxitos a problemas de ruteo de la vida real, tales como el enrutamiento de buses escolares, la gestión de la cadena de suministro de alimentos, la gestión de rutas para ambulancias y la planificación de rutas de carros de aseo.

Por otra parte, Ramachandiran, Suresh, & Ravisasthiri (2015) realizaron una revisión bibliográfica de las variantes recientes del problema de ruteo de vehículos (VRP) y sus métodos de solución. Las variantes estudiadas fueron: Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad (CVRP), Problema de Ruteo de Vehículos con múltiples depósitos (MDVRP) y el Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW). Los resultados de la investigación proponen una metodología basada en los mejores resultados de cada modelo, para que los científicos que aborden el problema en un futuro, puedan seleccionar de manera adecuada, los mejores estructuras algorítmicas para su solución.

Otra tendencia asociada al estudio de ruteo de vehículos es aquel que modela la logística urbana de distribución o City VRP (por sus siglas en inglés). Kim, Ong, Heng, Tan, & Zhang, (2015) estudian el problema teniendo en cuenta las restricciones más importantes que se pueden presentar en las ciudades en términos de los actores implicados, a saber: cargadores, conductores, residentes y administradores. En consecuencia, la investigación resume las limitaciones, los modelos y los métodos de solución para la VRP en ciudades densamente pobladas, presenta el estado del arte del City VRP y resalta los temas centrales desafiantes, así como sugieren un área de investigación nueva en este campo que ha sido poco estudiado.

Soonpracha, Mungwattana, & Janssens (2014) elaboraron un estado del arte del problema de Ruteo de Vehículos con capacidad Heterogénea (HFVRP) donde discuten cuatro componentes principales: clasificación de las variantes, características de los datos de entrada, enfoque en la toma de decisiones y algoritmos más utilizados. Dichos autores presentan un enfoque novedoso para la solución de este tipo de problemas que arroja buenos resultados en relación con las mejores soluciones encontradas en la literatura.

Otro problema importante dentro de la familia de problemas de ruteo, es el SVRP o Problema de ruteo de Vehículos con demandas estocásticas o probabilísticas. Berhan, Beshah, & Beshah, (2014) realizaron una revisión sistemática de la literatura del SVRP desde el año 1993 e identificaron los principales dominios y atributos de los problemas con demandas probabilísticas. Los atributos o características identificadas fueron: demandas, capacidad de los vehículos, tiempos de servicios probabilísticos y minimización de costos. La investigación ayuda a resumir y mapear los principales componentes del SVRP de modo que las diversas contribuciones en el área, se organicen de una manera que proporcionen una visión clara para los investigadores e identifiquen direcciones futuras de la investigación del SVRP.

El concepto de transporte en la cadena de distribución con un componente de gestión ambiental, es otra tendencia en el problema del VRP. Ésta es conocida como "Green VRP", la cual se enfoca en minimizar costos de todo el sistema relacionados con cuestiones económicas e impactos ambientales. Lin, Choy, Ho, Chung, & Lam, (2014) reflejan en su investigación la importancia del impacto ambiental, en términos de costo, de los sistemas de distribución y transporte. Los autores presentan una extensa revisión de la literatura que categoriza el Green VRP de acuerdo con los principales modelos estudiados del VRP y discuten sus variantes más importantes, haciendo énfasis en cadenas de distribución sostenibles.

Igualmente, los problemas de enrutamiento de vehículos (VRP) relacionados con la gestión de riesgos están atrayendo mucho interés. Por esta razón Hamdi, Labadie, & Yalaoui (2014) realizaron una revisión de la literatura sobre modelos de optimización de rutas para los servicios de transporte seguro, haciendo énfasis en el transporte de materiales peligrosos o HazMatVRP (Hazard Materials VRP).

En las fuentes consultadas se destaca la revisión sistemática de información relacionada con los Problemas de Ruteo de Vehículos a gran escala o LSVRP. Huang & Hu (2012) presentan nuevos procedimientos de solución de dichos problemas que integran procesos de análisis cualitativos y cuantitativos y se comparan las mejores técnicas de solución frente a los mejores resultados encontrados en la literatura.

Pino, et al. (2011) realizan una revisión de la literatura para conocer el estado del arte relacionado con sistemas de transporte intermodales, clasificando dichos sistemas de transporte en variantes del VRP y resolviendo el problema a través de métodos solución aproximados y exactos.

Ekşioğlu, Vural, & Reisman (2009) señalan que la literatura relacionada al VRP, como área de estudio, se define de manera muy amplia. En dicha investigación se resalta que la literatura del VRP se ha vuelto bastante inconexa y que mantener el control de los principales avances en la solución del VRP se ha vuelto difícil, ya que es un tema que trasciende varias disciplinas académicas y administrativas. Los autores definen una taxonomía muy amplia de los principales problemas del VRP y establecen una metodología compacta para realizar estados del arte exhaustivos, atendiendo la cantidad de artículos publicados sobre el tema.

El problema del ruteo de vehículos o VRP desempeña un papel central en los campos de la distribución física y la logística. Se puede inferir que la literatura encontrada sobre VRP muestra tres enfoques de investigación básicos: la necesidad de establecer esquemas teóricos que enmarquen, a través de una taxonomía de conceptos, todas las variantes existentes del Ruteo de Vehículos que se derivan de las restricciones que se han estudiado del problema; el avance en los distintos enfoques de solución al problema de ruteo, utilizando algoritmos cada vez más precisos; y la aplicabilidad de dichos modelos teóricos y

matemáticos para resolver problemas de distribución reales en distintos sectores de la industria.

En el subcapítulo 1.2 del presente documento se caracteriza de manera general la justificación de la pertinencia de la revisión de la literatura propuesta de acuerdo con los objetivos planteados, enfocada a la necesidad de optimizar costos asociados con la operación de los vehículos como factor de productividad, y el desarrollo de teorías y aplicaciones para modelar las actividades de transporte en diferentes sectores de la economía y la industria.

2.2 MARCO TEÓRICO

En el siguiente aparte, se definirán los principales conceptos asociados a la Gestión Logística de Distribución y la relación que guarda con los sistemas de transporte. Igualmente se definirá el Problema de Ruteo de Vehículos como parte de dichos sistemas de transporte, sus principales variantes, el modelamiento matemático básico y los métodos de optimización más utilizados para resolver el VRP, de acuerdo con el punto de vista de los autores más destacados sobre el tema.

2.2.1 Gestión Logística de Distribución.

Mentzer et al. (2001) definen la logística de distribución como el conjunto de actividades que facilitan el flujo de materiales o productos de un punto geográfico a otro, es decir de un origen a un destino determinado. Dicho flujo generalmente es alguna forma de transporte y cada punto representa algún tipo de transformación que sufre el producto o material y su información relacionada: embalaje, fabricación, fraccionamiento, montaje, desembalaje, etc.

De acuerdo con Renko & Ficko (2010), para que la operación logística tenga lugar, se incurre en algún tipo de costo, sea este un costo monetario o de operación (costo de capital, tiempo, recurso humano o recurso tecnológico), que puede variar según el nivel de sofisticación del sistema de distribución utilizado y el valor específico de cada producto o servicio que se distribuye. Dicho costo se ve reflejado en el valor percibido por el cliente o usuario final.

Una característica importante de la gestión logística de distribución es la selección de los canales físicos de distribución. Según Johnson (1999) los canales físicos de distribución es el término utilizado para describir el método y el medio por el cual los productos o servicios se transfieren físicamente, desde su punto de producción hasta el punto en el que están disponibles para el cliente final. Dicho punto final puede ser un almacén, una tienda minorista, una fábrica, un centro de atención al cliente o simplemente el lugar donde se espera que el cliente reciba el producto o servicio que se distribuye.

Para Johnson (1999) la estrategia más importante de la logística de distribución radica en la elección y selección de dichos canales de distribución, ya que estos determinan qué tan eficiente fue la operación logística, en términos de costos totales.

Aldin & Stahre (2003) clasifican los canales de distribución, como se relaciona a continuación:

- **Del fabricante directamente a tiendas minoristas:** el fabricante o proveedor entrega el producto directamente a distribuidores minoristas, utilizando sus propios vehículos. Para este tipo de canal de distribución el fabricante busca utilizar la mayor capacidad disponible de su flota de vehículos para aminorar costos.

- **Del fabricante a través del centro de distribución minorista, a la tienda minorista:** este canal consiste en que el fabricante suministre sus productos a los centros nacionales de distribución para las tiendas de entrega final o los suministre a los centros de consolidación donde los productos de los distintos fabricantes y proveedores se agrupan para la entrega final.
- **Del fabricante a las tiendas de venta al por mayor y luego a tiendas minoristas:** en este sistema de distribución, el mayorista actúa como un intermediario de la cadena de distribución entre el fabricante y las tiendas minoristas.
- **Del fabricante a tiendas minoristas/mayoristas, a través de la tercerización de los servicios de distribución:** cuando los fabricantes no poseen flota de vehículos propia, se contrata un servicio logístico que transporta los productos a tiendas minoristas o mayoristas.
- **Pedido por correo o compras por catálogo:** es un canal de distribución muy popular donde los productos se ordenan por catálogo y se envían a su destino final a través de un servicio de correo o paquetería. El canal de distribución física se caracteriza porque se envían los productos directamente desde el fabricante, a través de un servicio convencional de transporte, y luego a la casa del consumidor a través de un servicio de mensajería, pasando por alto tiendas minoristas.
- **Del fabricante a las casas de los consumidores:** ocurre cuando se presentan ventas directas, a menudo como resultado de algún tipo de publicidad en medios. También es un canal utilizado para distribuir productos únicos y que no necesitan almacenarse.
- **Fabricante a fabricante:** incluye todo el movimiento de materias primas, componentes, partes o productos industriales de una fábrica a otra fábrica, a través de un servicio de transporte propio o subcontratado.

- **Canales de distribución múltiples:** existen empresas que comercializan productos y servicios diferentes y, por lo tanto, utilizan una mezcla de distintos canales de distribución.

Los objetivos de los canales de distribución difieren de una empresa a otra. Sin embargo, existen algunos puntos en común que deberían considerarse durante el proceso de planificación de las actividades de distribución, para garantizar que se desarrolle y seleccione la estructura de canales más adecuada. Los principales puntos que deben abordarse, de acuerdo con Lii & Kuo (2016) son los siguientes:

- Hacer que el producto esté disponible para los consumidores del mercado al que se dirige.
- Lograr la cooperación con distribuidores, fabricantes, mayoristas, minoristas o clientes, respecto a cualquier factor de distribución relevante que permita optimizar la operación y disminuir costos. Dichos factores incluyen la negociación de tamaños mínimos de pedido, tipos de unidades de carga, características de manejo del producto, manejo de materiales, acceso a la entrega y restricciones de tiempo de entrega.
- Acordar niveles de servicio con clientes o proveedores, para establecer, medir y mantener un nivel específico de servicio en relación con tiempos de entrega, modos de entrega y número de unidades entregadas.
- Minimizar costos totales, ya que el costo es un factor importante para la determinación del precio final del producto. El canal que se seleccione reflejará cierto tipo de costo, por lo tanto, debería evaluarse la relación entre el tipo de producto ofrecido, el nivel de servicio requerido y el canal seleccionado.
- Mantener flujo constante de información. El flujo de información y la retroalimentación del cliente es esencial para la provisión y el mantenimiento de un servicio de distribución eficiente.

- Evaluar características del mercado. Por ejemplo, si un mercado es muy grande y está ampliamente distribuido desde un punto de vista geográfico, entonces es habitual utilizar canales largos, con muchos puntos de almacenamiento.
- Evaluar características del producto/servicio. Dichas características no deben subestimarse, ya que el producto/servicio puede imponer restricciones frente a la selección adecuada del canal de distribución. Por ejemplo, es probable que los artículos de alto valor se vendan directamente a través de un canal corto; o los productos/servicios que guarden cierta complejidad en su estructura o funcionamiento, se distribuyan a través de un canal directo, ya que cualquier intermediario podría no ser capaz de explicar cómo funciona dicho producto o servicio para el cliente potencial. Otro ejemplo de estas características se encuentra en los productos que son sensibles al tiempo, tales como productos perecederos, ya que necesitan un canal de distribución más rápido. Los productos sensibles al tiempo necesitan un canal rápido o corto, por razones de vida útil en el caso de los productos alimenticios.
- Evaluar características competitivas, sobre todo con competidores que vendan productos similares o que sea muy difícil diferenciar calidad y precio.

2.2.2 Planeación de los sistemas de distribución

Los sistemas de distribución deben planearse, supervisarse y controlarse, de tal manera que se garantice una operación óptima y se atiendan los niveles de servicio y requisitos que imponga el cliente frente a las actividades de distribución.

Sabri & Beamon (2000) explican que, al igual que cualquier proceso en una empresa, las actividades de distribución deben planearse a través de los tres niveles jerárquicos conocidos en las organizaciones: nivel estratégico, táctico y

operativo. De la misma manera, es útil tener en cuenta los horizontes de planificación asociados a los procesos de planificación de cada nivel.

De acuerdo con Sabri & Beamon (2000) existen variados elementos que deben considerarse para producir una operación de distribución eficiente. Dichos elementos se interrelacionan de acuerdo con los distintos niveles y horizontes de planificación. A continuación, se relacionan los elementos de planificación de la operación de distribución:

Planeación Estratégica

- Horizonte de mediano a largo plazo: Lapso de uno a cinco años.
- Decisiones "estructurales" generales, políticas, objetivos estratégicos.
- Metas estratégicas.
- Programas de Largo Plazo.
- Acuerdos de niveles de servicio con otras compañías.
- Plan financiero corporativo.
- Plan de Comunicación de la estrategia de gestión logística.

Planeación Táctica

- Horizonte de corto a mediano plazo: Duración de seis meses a un año.
- Presupuesto anual con enfoque en costos y gastos.
- Procedimientos, instructivos de trabajo, controles.
- El detalle del plan estratégico se convierte en un plan operativo.

Planeación Operacional

- Toma de decisiones día a día.
- Evaluación de los controles establecidos en contraste con los estándares y reglas tácticas.
- Control a través de informes semanales / mensuales.
- Implementación del plan operacional.

La planeación correcta de las actividades de distribución en los niveles jerárquicos anteriormente descritos, redundará en una mayor optimización de recursos, y por ende en la creación de ventajas competitivas. De acuerdo con Young Hae & Sook Han (2002) los diversos elementos relacionados con la logística y la distribución han creado costos adicionales para aquellas compañías que intentan vender productos en el mercado, ya que dichas actividades de distribución afectan de manera positiva o negativa el costo final del producto. En este sentido, de acuerdo con el mismo autor, las empresas compiten sobre la base de proporcionar un producto, ya sea al menor costo posible, o al mayor valor posible para el cliente. Algunas empresas, pueden de hecho, tratar de alcanzar ambos objetivos.

Para lograrlo, las empresas que utilizan canales de distribución pueden competir a través de estrategias de liderazgo en servicios, donde se obtienen ventajas adicionales frente a los competidores al ofrecer una serie de elementos adicionales como la logística inversa o los servicios posventa; o puede competir a través de estrategias de liderazgo en costos, o a través de servicios mejorados, utilizando canales de distribución diferentes para que los productos estén disponibles en el mercado de diferentes maneras.

2.2.3 Relación entre transporte y logística de distribución.

Según Ertogral, Darwish, & Ben-Daya (2007) un buen sistema de transporte aplicado a actividades de distribución aporta al logro de la eficiencia logística, reduce los tiempos de operación y promueve la calidad del servicio. De acuerdo con dichos autores, alrededor de un tercio de los gastos logísticos están relacionados con actividades de transporte.

De acuerdo con Malakooti (2013) el transporte es la base de la eficiencia de las operaciones logísticas y es un elemento trascendental para la mejora de los

servicios de distribución. A través de un sistema de transporte bien manejado, los bienes/servicios pueden ser enviados al lugar correcto en el momento correcto, para satisfacer las demandas de los clientes. Además, se constituye como un puente entre productores y consumidores.

Si bien es cierto que existen múltiples modos y formas de transporte (aéreo, marítimo, fluvial, intermodal, etc.) para la presente investigación se estudiará cierto problema de transporte asociado a la distribución física de vehículos que recorren una red de rutas distribuidas geográficamente, llamado Problema de Ruteo de Vehículos (VRP por sus siglas en inglés)

2.2.4 Problema de Ruteo de Vehículos – VRP

En los últimos años, el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) se ha convertido en un tema de investigación muy importante en lo concerniente al estudio de la gestión logística, los sistemas de distribución y las actividades de transporte de bienes o personas. Las condiciones, variables, objetivos y limitaciones del VRP varían de acuerdo con el sector (manufactura o servicios) y el tipo de operación logística que se lleve a cabo. El VRP es uno de los más populares problemas en la optimización combinatoria, y su estudio ha dado lugar a múltiples técnicas exactas y heurísticas de aplicabilidad en variados sectores empresariales.

El problema de Ruteo de Vehículos fue propuesto por primera vez por Dantzig & Ramser (1959) y ha llamado la atención de expertos y académicos en áreas de investigación tales como la investigación de operaciones, administración, computación, teoría de grafos, y por supuesto, los sistemas de distribución logística.

De acuerdo con Toth & Vigo (2002), la distribución de bienes a través de ruteo es el servicio prestado por una flota limitada de vehículos que parte de uno o más

almacenes, depósitos o bodegas, a unos clientes finales distribuidos geográficamente. Para desplazarse hacia los clientes, los vehículos transitan por una red de rutas representada por arcos o grafos que tienen asociadas restricciones de costo tiempo o distancia. Cada vehículo tiene una capacidad determinada y cada cliente tiene asociada cierta de demanda. Los vehículos deben llegar a los depósitos una vez hayan servido a todos los clientes.

Entonces, el VRP se define como la organización de una serie de puntos de carga o descarga y las rutas o líneas donde transita una flota de vehículos, bajo ciertas restricciones, como la demanda de bienes, entrega, tiempos de entrega o limitaciones en la capacidad de los vehículos.

Para Reimann, Tavares, & Bogendorfe (2014) el VRP se clasifica como se relaciona a continuación:

- De acuerdo con la cantidad de centros de distribución: centro de distribución único o centros de distribución múltiples.
- Según el tipo de vehículo: único vehículo o múltiples vehículos.
- Según las características de la tarea: problemas de carga, envío, descarga o una mezcla entre actividades de carga y descarga.
- De acuerdo con limitaciones de tiempo: sin ventanas de tiempo o con ventanas de tiempo en la que se deben servir a los clientes.
- Según la carga del vehículo.
- Según el número de objetivos: un único objeto o múltiples objetivos.
- Por la naturaleza de las variables: deterministas o estocásticas, es decir, sujetas a probabilidades.

Una solución del Problema de Ruteo de Vehículos se halla cuando se cumplen todas las restricciones y se determina el conjunto de rutas que minimice o maximice la función objetivo definida. Laporte (2002) explica que muchas

funciones objetivo podrían ser especificadas para hallar una solución al VRP, tales como la minimización del costo de transporte, la optimización de la distancia total que recorren los vehículos o la optimización de la capacidad de los vehículos. De acuerdo con este autor, el VRP se formula matemáticamente así:

- La red de transporte es el grafo completo $G = (V, A)$ con $V = (0, \dots, n)$ que representa el número de vértices o clientes, y $A \in (i, j)$ que representa el conjunto de arcos o rutas con $i \neq j$.
- Para el conjunto de clientes, c_{ij} es el costo asociado al camino más corto recorrido por un vehículo entre dos clientes i y j . Como se mencionó anteriormente, el costo puede estar representado por unidades de distancia, tiempo, o por el costo de funcionamiento de la flota.
- k representa el vehículo que recorre la ruta entre i y j , con $x_{ijk}, \forall i, j, 1 \leq i, j \leq n, i \neq j$ que determina el conjunto de clientes del problema. $i \neq j$ indica que dos clientes no pueden estar ubicados en la misma posición dentro del área geográfica.
- Como los vehículos tienen capacidad limitada, se aplica al modelo una restricción de capacidad tal que la suma de capacidades de los clientes i y j no exceda la capacidad total del vehículo Q , así: $d_i + d_j > Q$. Cuando la capacidad se excede, el vehículo debe devolverse al depósito.
- Función Objetivo: es el costo total por optimizar, donde C_{ij} es el costo de la ruta recorrida entre dos clientes i y j , y K es el número total de vehículos de la flota.

$$\text{Minimizar } \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} C_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in \Delta+1} x_{ijk} = 1; \forall i \in N \quad (2)$$

- La restricción (2) asigna a cada cliente exactamente una ruta de un vehículo. La expresión $j \in \Delta + 1$ es el conjunto de todas las rutas que parten de i llegan a j .

$$\sum_{j \in \Delta+(0)} x_{0jk} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{j \in \Delta-(n+1)} x_{i,n+1,k} = 1 \quad (4)$$

- Las restricciones (3) y (4) representan el número de veces que un vehículo sale del depósito y el número de veces que el vehículo llega al depósito a través del conjunto de rutas $j \in \Delta - (n + 1)$ y $j \in \Delta + (0)$ respectivamente. (0) es el depósito cuando los vehículos salen de él, y $(n+1)$ representa el depósito cuando los vehículos llegan de servir a los clientes.

$$\sum_{i \in \Delta-(j)} x_{ijk} - \sum_{i \in \Delta+(j)} x_{jik} = 0 ; \forall k \in K, j \in N \quad (5)$$

- La restricción (5) permite que no se creen bucles dentro del modelo, evitando repeticiones en la asignación de rutas.
- Adicionalmente, se crean restricciones de capacidad tales que las demandas de los clientes no excedan la capacidad del vehículo.

$$\sum_{i \in N} d_i \sum_{j \in \Delta+(i)} x_{ijk} \leq Q ; \forall k \in K \quad (6)$$

- Las restricciones de no negatividad se expresan así:

$$x_{ijk} \geq 0; \forall k \in K; (i, j) \in A \quad (7)$$

- La siguiente restricción indica la naturaleza binaria de las variables del modelo:

$$x_{ijk} \in [0,1]; \forall k \in K; (i, j) \in A \quad (8)$$

2.2.5 Variantes del VRP

A continuación, se definen las principales variantes del Problema de Ruteo de Vehículos (VRP), de acuerdo con los principales tipos de restricciones que se tienen en cuenta para modelar las operaciones de distribución.

2.2.5.1 Problema de Ruteo de Vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW)

De acuerdo con Cordeau, Laporte, Savelsbergh, & Vigo (2007), el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW) es una importante variación del problema básico del VRP, en el que el servicio prestado por cada vehículo k a cada cliente i , debe comenzar dentro de una ventana de tiempo definida por el mismo cliente (a_i, b_i) . a_i , representa el momento en el que el vehículo puede comenzar a servir al cliente i y b_i es el tiempo más lejano de inicio del servicio por el vehículo k . Si el servicio se presta posterior al tiempo b_i , el cliente puede penalizar la función objetivo con un costo adicional.

El VRPTW tiene numerosas aplicaciones para modelar la gestión logística de distribución. Ejemplos comunes son la entrega de bebidas y alimentos, entrega de periódicos, recogida de residuos industriales o comerciales y servicios de mensajería.

2.2.5.2 Problemas de Ruteo de Vehículos con variables estocásticas (SVRP)

Dror et al. (1993) definen el SVRP como una extensión del problema clásico VRP, pero con variables que están sujetas a probabilidades de ocurrencia o elementos aleatorios. Los casos más comunes del SVRP son los siguientes:

- Clientes estocásticos: el cliente i está presente con probabilidad p_i y ausente con probabilidad $1 - p_i$.
- Demandas estocásticas (**VRPSD**): asociado con problemas de pickup o recogida de elementos, donde la variable de demanda del cliente i es una demanda aleatoria que afecta directamente la capacidad del vehículo Q y por ende la prestación del servicio a clientes cuando la capacidad $d_i \geq Q$.
- Tiempos estocásticos (**VRPSTT**): el tiempo del servicio y los tiempos de viaje son variables aleatorias. Generalmente los problemas con tiempos estocásticos aplican para operaciones de entrega de mensajería o productos en grandes ciudades, donde los tiempos de viaje son difíciles de calcular con exactitud.

Debido a que algunos de las variables son aleatorias, los SVRP son considerablemente más difíciles de resolver ya que las variables no son deterministas o conocidas previamente, haciendo que los mecanismos de optimización sean más complejos de aplicar.

2.2.5.3 Problema de Ruteo de Vehículos con entregas y recogidas simultáneas (VRPPD)

Min (1989) modela el problema de ruteo de vehículos con entregas y recogidas (Vehicle Routing Problem with Pick-up and Delivering - VRPPD) donde se contempla la posibilidad de que los clientes devuelvan al vehículo algunos productos que se entregan, teniendo en cuenta que los productos devueltos no

deben superar la capacidad de almacenamiento del vehículo. Esta restricción hace que el problema sea difícil de resolver, ya que se hace necesario optimizar la capacidad del vehículo, recorrer mayores distancias de viaje o contemplar la posibilidad de aumentar la flota de vehículos. Una simplificación habitual del VRPPD es considerar que cada vehículo debe entregar todas las mercancías antes de recoger cualquier producto.

El objetivo del problema es encontrar una serie de rutas para un conjunto de vehículos con costo mínimo cumpliendo las restricciones de capacidad y teniendo en cuenta la posibilidad que el cliente devuelva lo que se le entrega. Generalmente los VRPPD aplican para modelar y optimizar operaciones de distribución en los servicios de mensajería y domicilios de alimentos o medicamentos.

2.2.5.4 Problema de Ruteo de Vehículos con Backhauls (VRPB)

El problema de enrutamiento de vehículos con Backhauls (VRPB) es una extensión del VRP que involucra tanto puntos de entrega como puntos de recogida. De acuerdo con Ralphs, Hartman y Galati (2001) los puntos de recolección envían cierta cantidad de productos a los centros de distribución principales. La suposición crítica es que todas las entregas deben realizarse en cada ruta antes de que se puedan realizar recolecciones. Esto se debe al hecho de que los vehículos tienen carga trasera y la reorganización de las cargas de los camiones en los puntos de entrega no se considera económica ni factible. Las cantidades que deben entregarse y recogerse son fijas y conocidas de antemano.

Para este tipo de problema la flota de vehículos es homogénea, es decir tienen la misma capacidad en volumen o peso. Una solución factible al problema consiste en hallar un conjunto de rutas tal que minimice la distancia total recorrida de los vehículos. El VRPB es utilizado para modelar operaciones de distribución para

empresas grandes de logística que poseen varios centros de distribución en la misma zona geográfica.

2.2.5.5 Problema de Ruteo de Vehículos Dinámico (DVRP)

El Problema de Ruteo de Vehículos Dinámico (DVRP) es una extensión del problema de ruteo de vehículos clásico donde se asume que algunos tipos de cambios pueden afectar el modelo, mientras el algoritmo intenta resolverlo. Estos cambios en la iteración del modelo pueden incluir aspectos como: averías en la flota de vehículos, atascos de tráfico, cambio de ubicación en los pedidos, pérdida de la mercancía, etc. (Psaraftis, 1988).

Una de las versiones más estudiadas del DVRP es el problema con restricciones de capacidad en el que se asumen algunos cambios en la medida en que se va iterando el modelo, de modo que la carga máxima del vehículo y la distancia de la ruta varían con el tiempo.

El problema de ruteo de vehículos dinámico posee las siguientes características:

- No toda la información relevante para la planificación de las rutas es conocido previamente cuando comienza el proceso de enrutamiento de los nodos o clientes.
- La información inicial del problema puede cambiar después de que las rutas hayan sido construidas por el algoritmo.
- La dimensión temporal juega un papel importante en la estructuración del problema dinámico.

El problema de ruteo de vehículos dinámico es un problema más robusto en comparación con el VRP convencional, y requiere para su solución algoritmos que

suministren información en tiempo real, tales como el Algoritmo Genético y los algoritmos bioinspirados.

2.2.6 Solución del Problema de Ruteo de Vehículos (VRP)

Para resolver el Problema de Ruteo de Vehículos, es importante analizar la naturaleza de las variables que componen el modelo, el tipo de restricciones y la función objetivo relacionada. Para Kara & Bektas (2006), un VRP se puede resolver construyendo un modelo de programación lineal entera, que siempre busca soluciones óptimas y son aplicados para problemas con pocas variables y restricciones; o algoritmos heurísticos o de aproximación, usados para resolver problemas más robustos y que arrojan soluciones cercanas al óptimo en tiempos de cómputo razonables.

A continuación, se explican de manera breve los principales métodos de optimización usados para resolver el Problema de Ruteo de Vehículos.

2.2.6.1 Algoritmos exactos

Como se mencionó anteriormente, es más eficiente usar algoritmos exactos para calcular problemas de VRP a pequeña escala. Sin embargo, para problemas aplicados a sectores o industrias reales (manufactura o servicios) donde las variables y restricciones son complejas, los algoritmos exactos no son eficientes en la búsqueda de soluciones óptimas. De acuerdo con Christofides (1981) existen varios algoritmos exactos para resolver el VRP, entre los que se cuentan: Método de Ramificación y Ligado (Branch and Bound por sus siglas en Inglés), método de plano de corte, método de programación dinámica y método de flujo de red.

- **Método Branch and Bound:** de acuerdo con Cordeau (2007) el método de Ramificación y Ligado o Branch and Bound, consiste en la enumeración

sistemática de soluciones candidatas que forman un árbol, llamado árbol de soluciones. El algoritmo explora las ramas de este árbol, que representan subconjuntos del conjunto total de soluciones. El algoritmo compara los límites estimados superiores e inferiores del problema y los compara con la mejor solución encontrada, descartando aquellas que no mejoran la función objetivo.

- **Método del plano de corte:** El método del plano de corte se propuso por primera vez para resolver problemas de programación lineal entera. Baldacci (2008) explica que el método de plano de corte consiste en determinar si las soluciones encontradas pertenecen al conjunto de números enteros. Si es así, la operación de búsqueda se detiene, por el contrario, si la solución encontrada no pertenece al conjunto de números enteros, el algoritmo agrega una nueva restricción, hasta dar con un punto entero de coordenadas que pertenece a la solución óptima entera.
- **Método de programación dinámica:** el método de programación dinámica es un tipo de algoritmo de optimización comúnmente utilizado en el análisis de sistemas en varias etapas. Cualquier problema puede dividirse en sub-etapas que se van comparando una con otra hasta elegir el mejor óptimo grupal, y con cada óptimo grupal, encontrar una solución óptima global.
- **Algoritmo de flujo de red:** es un algoritmo utilizado para resolver problemas a pequeña escala. Consiste en ajustar los arcos o rutas más grandes hasta encontrar configuraciones de rutas más pequeñas que puedan servir a los clientes en el menor tiempo posible.

2.2.6.2 Algoritmos Heurísticos

Las técnicas o métodos heurísticos a menudo se conocen como algoritmos de búsqueda. De acuerdo con Laporte (2002) las técnicas heurísticas están diseñadas para encontrar soluciones óptimas en un periodo finito de tiempo de cómputo. Sin embargo, para problemas de optimización combinatoria, dicha

cantidad finita de tiempo de cómputo puede crecer exponencialmente a medida que se itera el algoritmo con respecto a las dimensiones del problema. Cuando se utilizan heurísticas para la solución de problemas de carácter combinatorio, se pueden encontrar soluciones que cumplen las restricciones del modelo en un tiempo de cómputo razonable, pero que distan de la solución óptima. Cuando las heurísticas arrojan buenas soluciones al problema de optimización combinatoria, se dice que el problema ha hallado un óptimo “local” dentro del universo de posibles soluciones. A continuación, se explican de manera breve, los principales métodos heurísticos para la solución del VRP.

Solomon (1987) desarrolló una serie de heurísticas llamadas “Heurísticas de construcción de rutas”, donde se construyen nodos y arcos según un criterio de minimización del costo, hasta que una solución factible haya sido creada. Allí, los clientes se programan en un “tour gigante”, y luego, se dividen en rutas más pequeñas.

- **Algoritmo de Ahorros:** Una de las heurísticas descritas por Solomon (1987) es basada en el Algoritmo de ahorros de Clarke and Wright (1964). La heurística fue originalmente desarrollada para el problema clásico de ruteo de vehículos. De acuerdo con Clarke and Wright (1964, p.569) *“la heurística inicia con una solución en la cual cada cliente es atendido individualmente en una ruta separada. Combinando dos rutas de clientes se obtendrá un ahorro del costo, hasta que se llegue a una combinación de rutas factible a través de un proceso iterativo”*. Clarke and Wright (1964) definen el concepto de ahorro, al calcular la reducción en distancia que se genera cuando se unen dos clientes en una ruta, en lugar de servir a cada uno de ellos en rutas diferentes.
- **Heurística del Vecino más cercano:** se inicia cada ruta buscando un cliente que no haya sido considerado en alguna ruta y que se encuentre cerca al depósito principal. De acuerdo con Solomon (1987, p.32) *“en cada*

iteración, la heurística busca al cliente más cercano al último cliente añadido a la ruta, y lo adiciona al final de la ruta recién construida. Una nueva ruta se inicia cada vez que el proceso de búsqueda falla al encontrar un lugar de inserción factible para algún cliente”.

- **Heurística de inserción:** Solomon (1987) desarrolló una heurística de construcción secuencial de rutas para el VRP que ha sido empleada en numerosas metaheurísticas. Básicamente estos algoritmos eligen un criterio para comenzar un itinerario y a continuación unas reglas de inserción de clientes. La heurística determina como criterio de elección del primer cliente de una ruta, aquel que se encuentre más alejado del depósito o bien el que presente un límite horario de aceptación del servicio más temprano. Se pretende escoger en primer lugar aquellos nodos con dificultades para asegurar su inclusión temprana en una ruta.
- **Heurística de Mejoras de Rutas:** Verhoeven & Aarts (1995) desarrollaron varias heurísticas de mejora de rutas llamadas *2-swap*, *2-OPT*, *3-OPT*, que permiten mejorar las soluciones encontradas con heurísticas menos robustas (ahorros, vecino más cercano o inserción). El objetivo principal de este tipo de algoritmos es reemplazar la solución existente con soluciones factibles generadas e ir optimizando la función objetivo paso a paso.

2.2.6.3 Algoritmos Metaheurísticos

Boussaïd et al. (2013) define que las metaheurísticas son métodos de optimización que toman un conjunto de restricciones y buscan una solución candidata con respecto a una determinada medida de calidad de la misma solución, explorando un conjunto muy grande de soluciones.

El prefijo griego "meta" se utiliza para indicar que estos algoritmos son heurísticas de "nivel superior", ya que son utilizadas cuando no existen algoritmos de solución satisfactorios para resolver problemas de optimización combinatoria. La

característica principal de las metaheurísticas es explorar nuevos conjuntos de soluciones para el problema, haciendo uso de estrategias que llevan al algoritmo a “escapar” de las soluciones óptimas locales. Algunas metaheurísticas usadas para resolver el VRP son: el algoritmo de pétalos, algoritmos de inteligencia artificial como: algoritmo genético, recocido simulado, búsqueda tabú y algoritmo de colonia de hormigas. Existen metaheurísticas híbridas o métodos híbridos los cuales usan algoritmos de búsqueda para la construcción de rutas factibles, combinadas con metaheurísticas de mejora de rutas, que garantiza que las soluciones encontradas no caigan dentro de óptimos locales. A continuación se describe de manera breve, algunas de estas metaheurísticas:

- **Método de escaneo o algoritmo de pétalos:** el método de escaneo fue propuesto por Gillette y Miller (1974). La heurística propuesta por estos autores consiste en dividir la red de rutas, en subgrupos de demanda similar. Las rutas se van formando a partir de las coordenadas polares desde el punto central o depósito, haciendo un barrido o escaneo por todos los subgrupos de rutas, hasta que todos los clientes sean servidos.
- **Algoritmo Genético:** el primer uso de algoritmos genéticos para resolver el VRP fue el utilizado por Lawrence (1991) para resolver problemas de ruteo a gran escala. El algoritmo genético utiliza una población de soluciones candidatas llamadas individuos o fenotipos, que tiene un conjunto de propiedades, llamadas genotipo, que pueden mutarse o modificarse. En un proceso iterativo, las soluciones candidatas generadas al azar empiezan a evolucionar, es decir a mejorar el conjunto de propiedades respecto a su función objetivo. Cada proceso iterativo del algoritmo se llama “generación”. Los individuos o grupos de soluciones más aptos se combinan aleatoriamente formando una nueva generación, hasta llegar a una solución cercana al óptimo. De acuerdo con Lawrence (1991) los algoritmos genéticos son los menos flexibles ya que están restringidos a operar con un único tipo de algoritmo, pero son los menos complejos desde el punto de

vista computacional, ya que el único requisito de búsqueda adicional es el descubrimiento o modificación de la probabilidad de encontrar soluciones factibles a problemas combinatorios

- **Algoritmo de recocido simulado:** Granville, Krivanek, & Rasson (1994) describen los algoritmos de recocido simulado como algoritmos de optimización estocástica o aleatoria, basado en el método iterativo de Montecarlo. La idea de esta metaheurística se deriva del proceso de recocido de los sólidos. El sólido es primero calentado a una temperatura alta y se deja enfriar lentamente. Las partículas se desordenan con altas temperaturas y se van ordenando gradualmente a medida que el sólido se va enfriando. El algoritmo selecciona al azar una solución cercana a la actual, mide su calidad, (es decir se compara con la mejor solución encontrada) y luego decide moverse hacia ella o quedarse con la solución actual, dependiendo de la probabilidad que se asigne a la solución respecto a que sea mejor o peor que la solución actual.
- **Algoritmo de Búsqueda Tabú:** Glover (1989) propuso este algoritmo por primera vez para la solución del VRP. Cuando se utiliza el algoritmo de Búsqueda Tabú, se toma una solución factible inicial y se compara con un grupo específico de soluciones que se comporten de manera específica frente a la mejora de la función objetivo. Una vez el algoritmo seleccione el comportamiento que puede cambiar de manera eficaz la función objetivo, guarda dicho comportamiento en una “memoria” y direcciona la búsqueda de la próxima solución a través del comportamiento seleccionado.
- **Algoritmo de colonia de hormigas:** el algoritmo se propuso por primera vez por Dorigo (1992) y se basa en el comportamiento que tienen las hormigas para buscar su alimento. Cada vez que se itera un modelo, la solución factible utilizada se mueve de un estado a otro a través de una función de probabilidad. Dicha función indica si el camino de soluciones es conveniente, de acuerdo con movimientos hechos anteriormente dentro del conjunto de soluciones factibles.

- **Optimización por enjambre de partículas:** el algoritmo toma una población de soluciones candidatas llamadas partículas, que se mueven por todo el espacio de búsqueda, de acuerdo con unas reglas matemáticas asignadas. Para que las partículas converjan hacia espacios de búsqueda con mejores soluciones, se debe tener en cuenta que el movimiento de cada partícula es influido por su mejor posición local y global, respecto a otras soluciones factibles. (Son, 2014).

Como conclusión al marco teórico expuesto, se puede decir que una gestión logística eficiente ayuda a optimizar los procesos de producción y distribución de bienes y servicios, y que para lograrlo, las empresas han utilizado herramientas de gestión basadas en la optimización de procesos y recursos, que han redundado en la disminución de costos, eficiencia de operaciones y por ende en el logro de la competitividad.

Para ello, los expertos en logística e investigación de operaciones han desarrollado herramientas robustas que modelan dichas actividades y variables asociadas a actividades de transporte, tales como los métodos exactos, heurísticos y metaheurísticos descritos.

Como se mencionó anteriormente, el transporte representa el 11,4% de los costos logísticos totales (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2014). Lograr mejoras en estos procesos ayudaría a las empresas a acelerar la respuesta a la demanda de los clientes, mejorar la calidad del servicio, y por supuesto reducir costos operativos.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se describe la metodología que se implementó en el desarrollo del trabajo de investigación, tomando en consideración las técnicas de revisión de la literatura propuestas por Webster & Watson (2002).

3.1 TIPO Y ALCANCE

Webster & Watson (2002) definen la revisión de literatura como un proceso de búsqueda y evaluación de documentos científicos que incluye el análisis de las principales contribuciones teóricas o metodológicas sobre un tema o área elegida. Para la presente investigación se realizó una revisión de literatura, precisamente con el objetivo de identificar y describir los problemas de optimización relacionados con el VRP, los modelos desarrollados y su eficacia en la búsqueda de soluciones factibles a problemas complejos de distribución y transporte.

En este sentido, el alcance de la investigación es de tipo descriptivo con enfoque cualitativo debido a la exploración exhaustiva y análisis crítico de información realizada, que permitió caracterizar los problemas VRP y sus variantes, identificar brechas y tendencias, y analizar el impacto de las características empresariales tenidas en cuenta en la solución de problemas de distribución y ruteo.

3.2 CARACTERÍSTICAS METODOLÓGICAS

A continuación se describen los elementos metodológicos utilizados en la revisión de literatura del problema de Ruteo de Vehículos – VRP.

3.2.1 Definición de criterios de búsqueda.

Para llevar a cabo la búsqueda de información, se establecieron los siguientes criterios de búsqueda:

- **Definición de estrategia de búsqueda:** selección de los descriptores o palabras clave para refinar la información, a través de ecuaciones de búsqueda.
 - **Palabras clave:** VRP, Optimization, Distribution Logistics, VRPTW, VRPSD, VRPPD, VRPB, VRPSST, DVRP Literature Review, Heuristics, Metaheuristics, Exact Methods, Sector, Logistic Management.
 - **Operadores utilizados:** utilización de operadores booleanos lógicos (AND, OR, NOT), operadores booleanos de proximidad (NEAR, SAME) utilizados para concretar las búsquedas, pues permiten indicar lo cerca que están unos términos de otros; y Operadores de Truncamiento (*,?).
 - **Ecuaciones de búsqueda:** búsqueda en títulos, resúmenes y palabras clave:
 - (TITLE-ABS-KEY=(Optimization* AND "VRP" AND " Literature Review "))
 - (TITLE-ABS-KEY=(Distribution OR "Logistic* Management" NEAR Logistic* AND "VRP" OR "VRPTW" OR "VRPSD" OR "VRPPD" OR "VRPB" OR "VRPSST" OR "DVRP"))
 - (TITLE-ABS-KEY =(("VRP" W/1 "heuristics") OR ("VRP" W/1 metaheuristics*) OR ("VRP" W/1 "Exact Methods"))
 - (TITLE-ABS-KEY =(("VRP" W/1 "sector") AND ("Distribution Logistics" OR "Optimization"))
- **Bases de Datos consultadas:** Scopus, ISI Web of Science, Springer Link, EBSCO, Science Direct. Se seleccionaron las anteriores bases de datos, ya que son bases multidisciplinarias que facilitan los estudios bibliométricos y la evaluación de producción científica. Además se encuentra información variada como: perfil de autor, perfil de institución, rastreador de citas, índices y analizador de revistas científicas. Dichas bases de datos engloban

una colección multidisciplinaria a nivel mundial de resúmenes, referencias e índices de literatura científica y técnica.

- **Disciplinas o áreas de interés de las revistas científicas consultadas:** “*Operations Research and Management Science*”, “*Logistics Management*”, “*Operation and Technology Management*”, “*Sector Studies*”.
- **Calidad de la información:** para garantizar la calidad científica de la investigación, se consultó información primaria en revistas de alto impacto, calificadas dentro de los cuartiles Q1 a Q3 del ranking Scimago. También se consideró la inclusión de artículos producto de conferencias y seminarios internacionales, solo con la condición de que aparecieran relacionados en el motor de búsqueda Scopus.
- **Periodo de Publicación:** artículos científicos publicados dentro del periodo 2005 – 2017.
- **Criterios de aceptación:** cumplimiento de todos los criterios de búsqueda seleccionados en el siguiente orden: bases de datos consultada, disciplinas o áreas de interés, calidad de la información y periodo de publicación; y rechazo de artículos que no cumplieran alguno de los criterios anteriormente mencionados o cuyo contenido inicial no estuviera relacionado con el tema, objetivos o no fuera pertinente para el desarrollo de la revisión propuesta.
- Se seleccionaron 50 artículos, los cuales relacionan la temática del problema de ruteo de vehículo, presentando el desarrollo de un modelo o técnica matemática y cómo esta se adapta a condiciones de un caso de estudio; adicionalmente, los artículos debían cumplir a cabalidad con los criterios de aceptación. Los demás artículos referente a la temática de logística de transporte no se consideraron, pues desarrollan técnicas o procedimientos cualitativos para el mejoramiento de la gestión de transporte en las organizaciones. Posteriormente se realizó lectura de títulos, resúmenes, citas bibliográficas y contenido y se efectuó lectura extendida de los documentos para identificar fiabilidad y validez de la información.

3.2.2 Registro de información

Se sintetizó la información consultada, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Autor y año de publicación.
- Alcance de la investigación.
- Descripción del método cuantitativo utilizado.
- Restricciones del problema.
- Resultados de la aplicación del modelo heurístico o de optimización.
- Hallazgos y principales conclusiones.
- Recomendaciones para futuras investigaciones.
- Características empresariales (tamaño, sector y/o industria) que se tuvieron en cuenta para el modelamiento del VRP.

3.2.3 Análisis de la información y presentación de resultados.

Argumentación crítica, discusión y análisis cruzado de la información, tomando en cuenta los siguientes criterios:

- Eficacia de los modelos y técnicas de solución (heurísticas, metaheurísticas y métodos exactos) del VRP.
- Principales limitaciones halladas para el modelamiento y solución del VRP, de acuerdo con las variantes encontradas en la literatura seleccionada.
- Identificación de las características empresariales que se han tenido en cuenta para la solución del VRP, de acuerdo con las restricciones seleccionadas del problema.
- Diferencias teóricas de los estudios realizados.
- Brechas y tendencias del conocimiento identificadas en el estudio del VRP como problema de la gestión logística de distribución.

- Presentación de resultados en un documento tipo Monografía.

3.3 TÉCNICAS UTILIZADAS

A continuación se describirán de manera breve las actividades y técnicas utilizadas para la implementación de la metodología definida.

Tabla 1. Herramientas o Técnicas utilizadas en el diseño metodológico

Actividades	Herramientas o Técnicas a utilizar
<p>Consulta de información primaria en revistas de alto impacto.</p>	<p>Búsqueda de información en las principales bases de datos multidisciplinarias disponibles: Scopus, ISI Web of Science, Springer Link, EBSCO, Science Direct.</p> <p>Disciplinas o áreas de interés de las revistas a consultar: “Operations Research and Management Science”, “Logistics Management”, “Operation and Technology Management”, “Sector Studies”.</p>
<p>Criterios de inclusión y exclusión.</p>	<p>Estrategia de búsqueda: selección de descriptores o palabras clave para refinar la información, a través de ecuaciones de búsqueda, ranking de revistas, periodo de publicación, disciplinas y áreas de interés.</p> <p>Palabras clave: VRP, Optimization, Distribution Logistics, VRPTW, VRPSD, VRPPD, VRPB, VRPSST, DVRP Literature Review, Heuristics, Metaheuristics, Exact Methods, Sector, Logistic Management.</p>
<p>Lectura crítica de títulos, resúmenes, citas bibliográficas y contenido y lectura extendida de los documentos para identificar fiabilidad y validez de la información.</p>	<p>Consolidación de la información de los artículos consultados. (Mínimo 50 que atiendan los criterios de inclusión y exclusión y que sean de alto impacto)</p>

<p>Registro de información relacionada con brechas y tendencias de conocimiento del estudio del problema VRP.</p>	<p>Síntesis de la información contemplando los siguientes ítems:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Autor y año de publicación. • Alcance de la investigación. • Descripción del método cuantitativo utilizado. • Restricciones del problema. • Resultados de la aplicación del modelo heurístico o de optimización. • Hallazgos y principales conclusiones. • Recomendaciones para futuras investigaciones. <ul style="list-style-type: none"> • Diseño de un diagrama que integre los principales conceptos consultados en la revisión de la literatura realizada. • Utilización de software gratuito para captura de etiquetas (Qiqqa).
<p>Análisis crítico de la información consultada para destacar brechas y tendencias de conocimiento en los estudios relacionados con el VRP.</p>	<p>Argumentación crítica, discusión y análisis de la información, tomando en cuenta los siguientes criterios:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Principales limitaciones para el modelamiento y solución del VRP para las variantes seleccionadas en la investigación. • Diferencias teóricas de los estudios realizados. • Brechas y tendencias del conocimiento identificadas en el estudio del VRP como problema de la gestión logística de distribución. • Conclusiones y puntos en común.
<p>Conclusiones finales frente al análisis de información relacionada con brechas y tendencias de conocimiento.</p> <p>Presentación de resultados (brechas y tendencias del</p>	<p>Construcción de informe final (tipo monografía) atendiendo la rigurosidad exigida por la universidad frente a redacción, argumentación, referenciación, estructura y contenido.</p>

conocimiento) en documento tipo monografía.

Fuente: Autor.

4. PANORAMA GENERAL DEL ESTADO DEL ARTE DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS Y LOS MÉTODOS ANALÍTICOS PARA SU SOLUCIÓN

En el siguiente apartado se relacionan los principales resultados de la búsqueda de literatura relacionada con el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) y sus métodos de solución, atendiendo los criterios descritos en el capítulo anterior.

4.1 CALIDAD DE LA INFORMACIÓN CONSULTADA

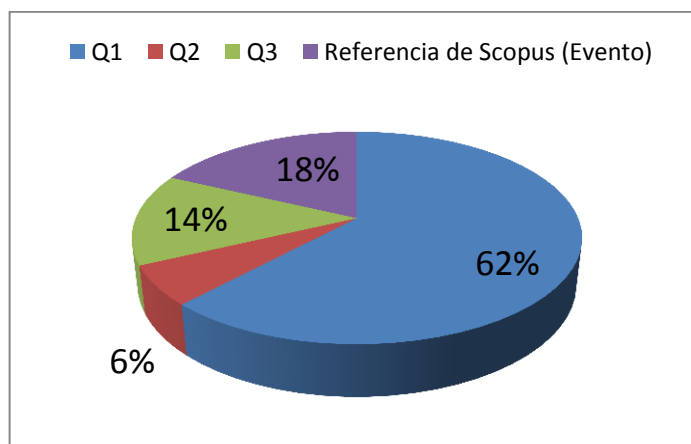
De los 50 artículos que cumplieron con los requisitos de búsqueda, 31 fueron publicados en revistas de alto impacto dentro del cuartil 1 (Q1) del ranking Scimago y 9 son artículos científicos producto de conferencias y seminarios internacionales encontrados en la base de datos Scopus. La tabla 2 y el gráfico 1 muestran la clasificación de la revista, el número de artículos encontrados y la presencia relativa de la búsqueda según clasificación de la revista.

Tabla 2. Clasificación de los artículos encontrados.

Clasificación de la Revista/Evento	Número de Artículos	Presencia Relativa
Q1	31	62%
Q2	3	6%
Q3	7	14%
Referencia de Scopus (Evento)	9	18%
Total	50	100%

Fuente: Autor.

Gráfico 1. Clasificación de los artículos encontrados – Presencia Relativa



Fuente: Autor.

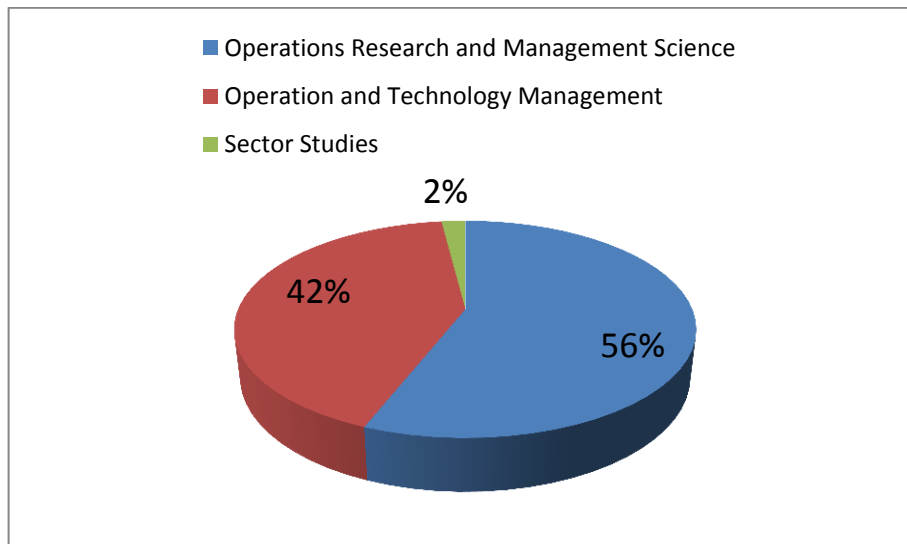
Los artículos seleccionados corresponden a tres áreas de interés para la investigación del Problema de Ruteo de Vehículos (VRP): Investigación de Operaciones y Ciencias de la Administración, Gestión Tecnológica y de Operaciones y Estudio de los Sectores. El número de artículos relacionados con cada área de interés y su presencia relativa en la búsqueda, se muestran en la tabla 3 y en el gráfico 2.

Tabla 3. Clasificación de los artículos según disciplina o área de interés.

Disciplina o Área de Interés	Número de Artículos	Presencia Relativa
Operations Research and Management Science	28	56%
Operation and Technology Management	21	42%
Sector Studies	1	2%
Total	50	100%

Fuente: Autor.

Gráfico 2. Clasificación de los artículos según disciplina o área de interés – Presencia Relativa.



Fuente: Autor

El 56% de la información consultada corresponde al área de investigación de operaciones y ciencias de la administración, donde se destaca la aplicación de métodos analíticos avanzados para la toma de decisiones operativas y administrativas, empleando técnicas como el análisis estadístico, modelos matemáticos y optimización matemática. Por otro lado, el 42% de la información analizada (21 artículos) corresponde al área de la gestión tecnológica y de operaciones, donde se destaca la utilización de fundamentos teóricos relacionados con el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) y el uso de la tecnología para entender la manera en que las empresas buscan soluciones a problemas complejos relacionados con la administración de operaciones.

En relación al periodo seleccionado para la investigación (2005 – 2017), la tabla 4 muestra la distribución de los artículos por año de publicación.

Tabla 4. Clasificación de los artículos según año de publicación.

Año de Publicación	Número de Artículos	Presencia Relativa
2005	1	2%

2006	3	6%
2007	1	2%
2008	1	2%
2009	1	2%
2010	7	14%
2011	2	4%
2012	2	4%
2013	3	6%
2014	4	8%
2015	7	14%
2016	10	20%
2017	8	16%

Fuente: Autor.

El 20% de los artículos (10 artículos) se publicaron en el año 2016, el 16% (8 artículos) en el 2017, 14% (7 artículos) en el 2015, lo que indica que el 50% de los artículos seleccionados son de reciente publicación. Lo anterior indica que existe un crecimiento en años recientes, por parte de la comunidad científica, hacia el análisis y propuestas de técnicas cuantitativas para la solución del Problema de Ruteo de Vehículos como parte fundamental en la gestión y toma de decisiones en la dimensión de logística de transporte en las organizaciones.

4.2 VARIANTES DEL VRP Y MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN

Debido a que la mayoría de los problemas de optimización combinatoria relacionadas con la gestión logística se clasifican como de difícil solución (Laporte, 2002), la investigación se ha concentrado en desarrollar algoritmos de aproximación que arrojan soluciones factibles a problemas complejos. Dentro de esta área, aparecen los algoritmos metaheurísticos que son una clase de algoritmos que combinan heurísticas tradicionales de construcción de rutas con estrategias eficientes de exploración del espacio de búsqueda.

De acuerdo con Larsen, Madsen & Solomon (2008), los métodos metaheurísticos para resolver el VRP poseen varias ventajas frente a otros métodos de solución

(heurísticas o métodos exactos). Dichas ventajas están relacionadas con la flexibilidad del método para explorar soluciones factibles por fuera de óptimos locales con tiempos de cómputo razonables para problemas con múltiples restricciones, en los que las heurísticas clásicas no son efectivas.

Las metaheurísticas, además ofrecen la posibilidad de crear algoritmos híbridos, donde se combinan diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial (Coelho, Grasas, Ramalinho, Coelho, Souza & Cruz, 2016), el comportamiento de grupos de animales (Tililia, Harzia & Krichen, 2016), la evolución biológica (Zhenfeng, Yang, Xiaodan & Sheng, 2017) y los mecanismos estadísticos (Zhen & Zhang, 2006).

Los autores utilizaron métodos híbridos para resolver todas las variantes del problema VRP (17 artículos), métodos metaheurísticos (22 artículos) para resolver las variantes CVRP, DVRP, VRPPD, SVRP y VRPTW; métodos heurísticos (8 artículos) para resolver las variantes CVRP, DVRP y VRPTW; y métodos exactos (2 artículos) para resolver la variante VRPTW.

La tabla 5 y el gráfico 3 muestran el número de artículos según variante y método de optimización utilizado. Se evidencia que el Problema de Ruteo de Vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW) y el Problema de Vehículos con restricciones de Capacidad (CVRP) son las variantes más comunes encontradas en la literatura analizada, con 18 y 13 artículos respectivamente.

De la misma manera, en la información consultada sobresale la presencia de la variante DVRP o Problema de Ruteo de Vehículos Dinámico (7 artículos), el Problema de Ruteo de Vehículos con recogidas y entregas simultáneas – VRPPD (7 artículos), el Problema de ruteo de Vehículos con variables estocásticas – SVRP – (4 artículos) y el Problema de Ruteo de Vehículos con Backhauls – VRPB – (1 artículo).

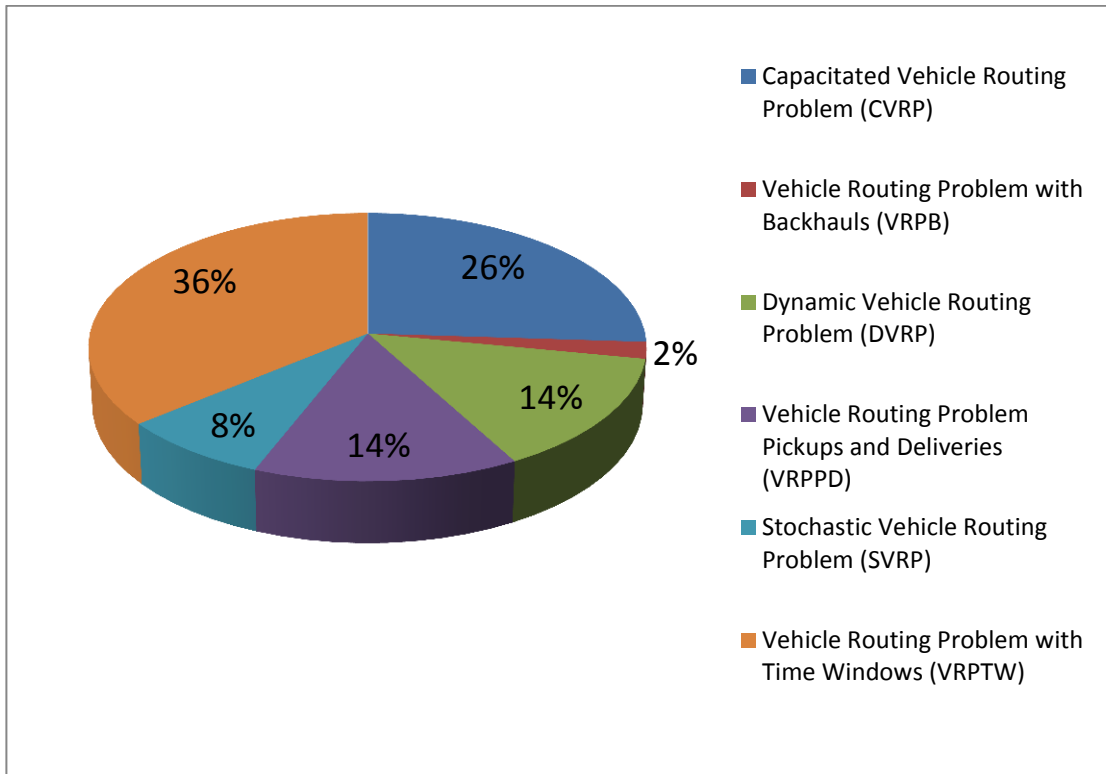
Tabla 5. Número de artículos según variante VRP y método de optimización utilizado.

Variante	Número de Artículos	Presencia	Métodos Exactos	Heurísticas	Metaheurísticas	Métodos Híbridos
Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP)	13	26%		Das & Borthakur (2006) Toffoloa, Christiaens, Malderena, Wauters, Berghe (2017) Garaix, Artigues, Feillet & Josselin (2010)	Mir, Hassani & Abolghasemi (2011) Chen, Huang & Dong (2010) H. C. W. Lau, T. M. Chan, W. T. Tsui, & W. K. Pang (2010) Oliveira, Mauceri, Carroll Pallonetto (2017) Poonthair & Nadarajan (2017) Son (2014) Wei, Zhang, Zhang & Leung (2017)	Talarico, Sörensen & Springael (2015) Bae, Hwang, Cho & Goan (2007) Coelho, Grasa, Ramalhinho, Coelho, Souza & Cruz (2016)
Vehicle Routing Problem with Backhauls (VRPB)	1	2%				Wassan, Wassan, Nagy & Salhi (2016)
Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP)	7	14%		Chena, Chena, Wang, Gaoa & Sangaiah (2017) Mavrovouniotis & Yang (2015) Pillac, Gendreau & Medaglia (2011)	Larsen, Madsen & Solomon (2008) Pillac, Guéret, Medaglia (2012)	de Magalhaes & de Sousa (2006) Euchi, Yassine & Chabchoub (2015)
Vehicle Routing Problem Pickups and Deliveries (VRPPD)	7	14%			Dechampai, Tanwanichkul, Sethanan & Pitakaso (2017) Zachariadis, Tarantilis & Kiranoudis (2015) Chen, Hsiao, Reddy & Tiwari	Karaoglan & Altiparmak (2010) Yanik, Bozkaya & deKerveno ael (2013) Silva, Kokkinogen

					(2016) YinPeng-Yeng & ChuangYa-Lan (2016)	is, Câmara, Ulisses, Urbano, Castro Silva, Oliveira & Rossetti (2016)
Stochastic Vehicle Routing Problem (SVRP)	4	8%			Ferrucci, Bock & Gendreau (2013)	Xu & Tang (2014) Jiang, Bong, Gee Amalraj & Chen (2014) Calvet, Pag`es- Bernaus, Travesset- Baro & Juan (2016)
Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW)	18	36%	Dong, Tang, Keung & Kong (2009) Dabia, Ropke, Woensel & De Kok (2012) Ben, Absi, Feillet, Quillio (2017)	Boonkleaw, Suthikarnnarun ai & Srinon (2010) Markov, Varone & Bierlaire (2015)	García & Gómez (2013) Zhenfeng, Yang , Xiaodan & Sheng (2017) Yiko (2010) Fu, Zhou, Qi & Wu (2016) Chen, Hsiao, Reddy, Kumar (2015) Tlilia, Harzia & Krichen (2016) Huang & Lin (2015) Hoang & Louati (2016)	Chen & Ting (2005) Figliozi (2010) Lai, W., Li, R., Xie, L., Qi, M. (2016) Zhen & Zhang (2006) Wen & Eglese (2014)

Fuente: Autor.

Gráfico 3. Variante VRP y método de optimización utilizado – Presencia Relativa.



Fuente: Autor

Al comparar las variantes analizadas del Problema de Ruteo de Vehículos según autor y año de publicación de la tabla 6, se destaca la presencia de la variante VRPTW a lo largo del periodo seleccionado de búsqueda de información (2005 – 2017), con una presencia relativa de 36%, que pertenecen a 18 artículos. De acuerdo con Markov, Varone & Bierlaire (2015), el problema VRPTW es una de las variantes más estudiadas por la comunidad científica, ya que es la más utilizada para analizar actividades de transporte en contextos reales, debido a la inclusión de restricciones de tiempo que obliga a la flota de vehículos a visitar los clientes en un periodo determinado.

Tabla 6. Variantes del VRP por año de publicación.

Autores	Año	Variante del VRP					
		CVRP	VRPB	DVRP	VRPPD	SVRP	VRPTW
Chen & Ting (2005)	2005						X
Zhen & Zhang (2006) Das & Borthakur (2006) de Magalhaes & de Sousa (2006)	2006	X		X			X
Bae, Hwang, Cho & Goan (2007)	2007	X					
Larsen, Madsen & Solomon (2008)	2008			X			
Dong, Tang, Keung & Kong (2009)	2009						X
Boonkleaw, Suthikarnnarunai & Srinon (2010) Chen, Huang & Dong (2010) H. C. W. Lau, T. M. Chan, W. T. Tsui, & W. K. Pang (2010) Karaoglan & Altiparmak (2010) Boonkleaw, Suthikarnnarunai & Srinon (2010) Yiko (2010) Figliozzi (2010)	2010	X			X		X
Mir, Hassani & Abolghasemi (2011) Pillac, Gendreau & Medaglia (2011)	2011	X		X			
Dabia, Ropke, Woensel & De Kok (2012) Pillac, Guéret, Medaglia (2012) Ferrucci, Bock & Gendreau (2013)	2012			X			X
García & Gómez (2013) Yanik, Bozkaya & deKervenoael (2013)	2013				X	X	X
Son (2014) Wen & Eglese (2014) Xu & Tang (2014) Jiang, Bong, Gee Amalraj & Chen (2014)	2014	X				X	X
Talarico, Sörensen & Springael (2015) Mavrovouniotis & Yang (2015) Euchi, Yassine & Chabchoub (2015) Zachariadis, Tarantilis & Kiranoudis (2015) Markov, Varone & Bierlaire (2015)	2015	X		X	X		X

Chen, Hsiao, Reddy, Kumar (2015)							
Huang & Lin (2015)							
Coelho, Grasas, Ramalhinho, Coelho, Souza & Cruz (2016)							
Wassan, Wassan, Nagy & Salhi (2016)							
Silva, Kokkinogenis, Câmara, Ulisses, Urbano, Castro Silva, Oliveira & Rossetti (2016)							
Chen, Hsiao, Reddy & Tiwari (2016)							
YinPeng-Yeng & ChuangYa-Lan (2016)	2016	X	X		X	X	X
Calvet, Pag`es-Bernaus, Travesset-Baro & Juan (2016)							
Fu, Zhou, Qi & Wu (2016)							
Tililia, Harzia & Krichen (2016)							
Hoang & Louati (2016)							
Lai, W., Li, R., Xie, L., Qi, M. (2016)							
Toffoloa, Christiaens, Malderena, Wauters, Berghe (2017)							
Oliveira, Mauceri, Carroll Pallonetto (2017)							
Poonthalir & Nadarajan (2017)							
Wei, Zhang, Zhang & Leung (2017)	2017	X		X	X		X
Chena, Chena, Wang, Gaoa & Sangaiah (2017)							
Ben, Absi, Feillet, Quillio (2017)							
Zhenfeng, Yang , Xiaodan & Sheng (2017)							
Dechampai, Tanwanichkul, Sethanan & Pitakaso (2017)							

Fuente: Autor.

4.3 ACTIVIDADES DE TRANSPORTE Y VARIANTES DEL VRP

Para Malakooti (2013) el transporte es la base de la eficiencia de las operaciones logísticas y es un elemento trascendental para la mejora de los servicios de distribución. En este sentido, se encontró que cada artículo analizado en la revisión de literatura estudia aplicaciones teóricas o aplicaciones reales de las actividades de transporte y distribución.

La tabla 7 muestra el número de artículos relacionados con las actividades de transporte encontradas. Todas ellas pertenecen al sector terciario o de servicios. Del total de artículos revisados, 28 estudian modelos teóricos de transporte con restricciones de capacidad (10 artículos), ventanas de tiempo (10 artículos), restricciones dinámicas (3 artículos), recogidas y entregas simultáneas (3 artículos), Backhauls (1 artículo) y restricciones de naturaleza estocástica (1 artículo).

Igualmente se encontraron investigaciones relacionadas con modelos de ruteo para actividades industriales reales, tales como el transporte de mercancía (6 artículos), transporte de pasajeros (3 artículos), transporte de desperdicios (4 artículos), actividades comerciales (2 artículos), transporte de alimentos, combustible, valores, redes de comunicaciones, pacientes, medicamentos y materiales del sector eléctrico (1 artículo cada una).

Tabla 7. Número de artículos según actividad de transporte.

Sector	Actividad	Número de Artículos	Variante VRP					
			CVRP	VRPB	DVRP	VRPPD	SVRP	VRPTW
Servicios	Transporte (Modelo Teórico)	28	10	1	3	3	1	10
	Transporte de Mercancía	6			3	2	2	
	Transporte de Pasajeros	3	1			1	1	
	Transporte de Desperdicios	4	1					3
	Transporte de Alimentos	1						
	Comunicaciones	1						1
	Comercio	2				1		1
	Combustible	1						1
	Farmacéuticas	1			1			
	Transporte de	1						1

Pacientes			
Transporte de Valores	1	1	
Sector Eléctrico	1		1

Fuente: Autor.

Además de las actividades de transporte anteriormente mencionadas, se encontró que cada variante estudiada posee una función objetivo principal que se pretende maximizar o minimizar a través de las diferentes técnicas de optimización, así como variables adicionales que acompañan la función objetivo principal. La tabla 8 relaciona las variantes del VRP y los objetivos y subvariantes encontrados.

Tabla 8. Variantes del VRP, objetivos adicionales del modelo y subvariantes encontradas.

Variante y objetivo principal	Objetivos adicionales del Modelo (Número de Artículos)	Subvariantes
Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) Objetivo Principal: Optimizar capacidad	Número de vehículos (1) Costo de las rutas (10) Emisión de CO2 (1) Costo de Combustible (1)	Múltiples Depósitos (2) Flota Heterogénea (2)
Vehicle Routing Problem with Backhauls (VRPB) Objetivo Principal: Optimizar capacidad	Costo de las rutas (1)	
Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP) Objetivo Principal: Costo de las Rutas	Satisfacción del Servicio (2) Capacidad de los vehículos (4) Orden de Salida de los vehículos (1)	
Vehicle Routing Problem Pickups and Deliveries (VRPPD) Objetivo Principal: Costo de las Rutas	Número de vehículos (1) Satisfacción del Servicio (1) Rutas Simultáneas (1) Ubicación de los productos dentro de los vehículos (1) Emisión de CO2 (1) Consumo de combustible y actividades de Cross-Docking (2)	Localizaciones Múltiples (1) Variables estocásticas (1) Múltiples Depósitos (2) Restricciones de tiempo (1)

Stochastic Vehicle Routing Problem (SVRP) Objetivo Principal: Costo de las Rutas	Satisfacción del Servicio (2)	Demandas estocásticas (2) Tiempos estocásticos (2)
	Multiobjetivo (1)	
Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) Objetivo Principal: Costo de las Rutas y tiempos de viaje	Capacidad del vehículo (1)	Flota homogénea (2) Múltiples Depósitos (2)
	Satisfacción del Servicio (6)	
	Consumo de Combustible (2)	
	Alistamiento de pedidos (1)	Flota Homogénea y Múltiples Depósitos (1)
	Capacidad de los vehículos (2)	
	Velocidad de los vehículos (1)	

Fuente: Autor.

Se destaca que en la variante VRPTW, que busca optimizar el costo de las rutas y tiempos de viaje, se encontraron variables adicionales que acompañan la función objetivo, tales como la maximización de la satisfacción del servicio (6 artículos), el consumo de combustible de la flota de vehículos (2 artículos) y la minimización de la velocidad de los vehículos (1 artículo). Además se estudian subvariantes del problema de ruteo con ventanas de tiempo con flota homogénea (2 artículos) y múltiples depósitos (2 artículos).

Las actividades de Cross-Docking han tenido un lugar importante en el estudio del problema con variables estocásticas (2 artículos). El mayor interés en el estudio de los problemas de ruteo de vehículos dinámico es la minimización de la capacidad de los vehículos (4 artículos), seguido de la maximización de la satisfacción del servicio prestado (2 artículos).

Llama la atención el uso de restricciones relacionadas con la emisión de CO₂ y el consumo de combustible (4 artículos en total) que vislumbra una nueva tendencia en el estudio de actividades de transporte y su impacto con el medio ambiente.

5. ANÁLISIS DE LAS VARIANTES DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

En el presente capítulo se analiza cada una de las variantes encontradas en la revisión de la literatura bajo el marco de los tres objetivos de investigación planteados: destacar brechas y tendencias de conocimiento, indicar características empresariales tenidas en cuenta para resolver o modelar el VRP y comparar la eficacia de los distintos modelos utilizados para la solución del VRP. Además se estructura un marco taxonómico donde se resaltan las principales características y aquellos elementos de cada variante que merecen más atención.

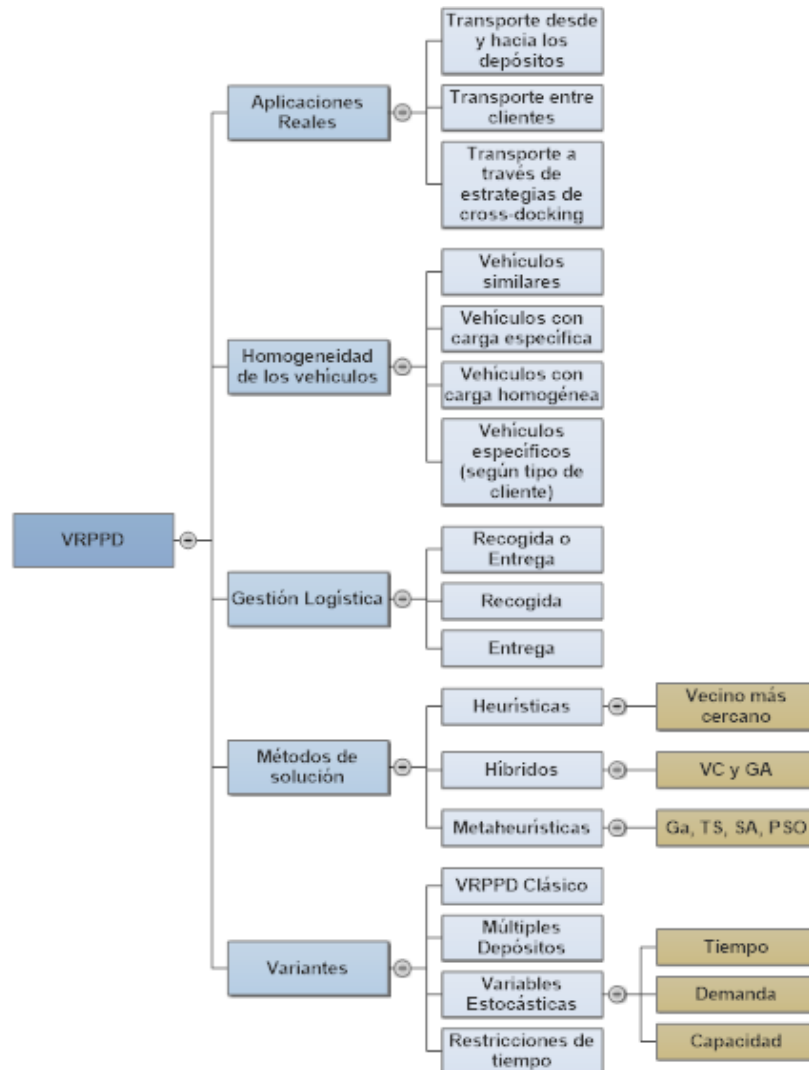
5.1 ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON RECOGIDAS Y ENTREGAS SIMULTÁNEAS (VRPPD)

De acuerdo con Min (1989) el objetivo del Problema de Ruteo de Vehículos con recogidas y entregas simultáneas (VRPPD) es encontrar una serie de rutas para un conjunto de vehículos con costo mínimo teniendo en cuenta la posibilidad que el cliente devuelva lo que se le entrega, además que los productos devueltos no deben superar la capacidad de almacenamiento del vehículo. Esta restricción hace que el problema sea difícil de resolver, ya que se hace necesario optimizar la capacidad del vehículo, recorrer mayores distancias de viaje o contemplar la posibilidad de aumentar la flota de vehículos.

La Figura 1 representa el marco taxonómico propuesto para el Problema de Ruteo de Vehículos con recogidas y entregas simultáneas (VRPPD), que se estructuró a partir de la revisión de la literatura realizada.

Se destacan las siguientes características del problema: aplicaciones en contextos reales, características de la flota de vehículos, objetivo de la gestión logística, métodos de solución identificados y variantes del problema.

Figura 1. Marco Taxonómico propuesto para el VRPPD



Fuente: Autor.

Respecto a las aplicaciones en contextos reales de la variante VRP con múltiples recogidas y entregas, se identifican tres grandes actividades de transporte: transporte de mercancía desde y hacia los depósitos (Dechampai, Tanwanichkul, Sethanan & Pitakaso, 2017), transporte de mercancía entre clientes (Karaoglan & Altiparmak, 2010) y transporte de mercancías a través de estrategia de Cross-docking (Chen, Hsiao, Reddy & Tiwari, 2016).

Frente a las características de la flota de vehículos utilizada en el VRPPD, existen investigaciones donde los vehículos poseen carga homogénea (Yanik, Bozkaya & deKervenoael, 2013), carga heterogénea (YinPeng-Yeng & ChuangYa-Lan, 2016), y carga específica de acuerdo con los tipo de clientes a los que se les presta el servicio (Zachariadis, Tarantilis & Kiranoudis, 2015).

En relación a las características de la gestión logística de la variante VRPPD, se identifican tres actividades de transporte: aquella donde solamente se recoge la mercancía en el lugar del cliente, aquella donde solamente se entrega la mercancía en el lugar del cliente; y una mezcla de las dos actividades, es decir, entregas y recogidas simultáneas. Para cada categoría, además de las formulaciones básicas del problema, se describen restricciones de carga que se incorporan a los modelos de ruteo (Chen, Hsiao, Reddy & Tiwari, 2016).

Yanik, Bozkaya & deKervenoael (2013) adicionan restricciones de carga tridimensional para evaluar la capacidad de los vehículos que prestan el servicio de entregas y recogidas simultáneas.

Igualmente se destacan cuatro subvariantes del Problema de Ruteo de Vehículos con múltiples entregas y recogidas encontradas en la literatura analizada: VRPPD con múltiples depósitos (Dechampai, Tanwanichkul, Sethanan & Pitakaso, 2017), VRPPD con variables estocásticas (Karaoglan & Altiparmak, 2010), VRPPD con restricciones de tiempo (Silva, Kokkinogenis, Câmara, Ulisses, Urbano, Castro Silva, Oliveira & Rossetti, 2016), (Yanik, Bozkaya & deKervenoael, 2013) y VRPPD clásico (Zachariadis, Tarantilis & Kiranoudis, 2015), (Chen, Hsiao, Reddy & Tiwari, 2016), (YinPeng-Yeng & ChuangYa-Lan, 2016).

5.1.1 Eficacia de los modelos utilizados para la solución del VRPPD

Debido a la complejidad del problema, los autores utilizan métodos de solución híbridos y metaheurísticos, como se describe en la tabla 9.

Tabla 9. Métodos de solución de la variante VRPPD

Autores	Metaheurísticas			Métodos Híbridos	
	GA	TS	PSO	VC y GA	TS y SA
Dechampai, Tanwanichkul, Sethanan & Pitakaso (2017)	X				
Silva, Kokkinogenis, Câmara, Ulisses, Urbano, Castro Silva, Oliveira & Rossetti (2016)					X
Zachariadis, Tarantilis & Kiranoudis (2015)		X			
Chen, Hsiao, Reddy & Tiwari (2016)			X		
YinPeng-Yeng & ChuangYa-Lan (2016)			X		
Karaoglan & Altiparmak (2010)				X	
Yanik, Bozkaya & deKervenoael (2013)				X	

Convenciones:

GA: Algoritmo Genético

TS: Búsqueda Tabú.

PSO: Algoritmo de Enjambre de Partículas

VC: Algoritmo del Vecino más cercano

SA: Algoritmo de Recocido Simulado.

Fuente: Autor

Dechampai, Tanwanichkul, Sethanan & Pitakaso (2017) proponen una metaheurística compuesta por cuatro operaciones para resolver el problema de ruteo de vehículos con múltiples recogidas y entregas en una granja de pollos. Estas operaciones son basadas en el comportamiento de la mutación de los genes, así: inicio de la solución, donde se toma una población de rutas iniciales al azar; mutación, donde se toma un vector aleatorio para encontrar diferencias con las rutas iniciales; recombinación, donde se analizan cada uno de los vectores con el vector objetivo y se genera un vector de prueba; y selección, donde se decide si el vector objetivo se convierte en la solución del problema.

Para analizar el desempeño del algoritmo propuesto, se analizaron las mejoras relativas de los vectores generados y se compararon con el costo total de la función objetivo. Los resultados fueron eficientes en términos de disminución de costos, ya que se logró un ahorro de aproximadamente 19,17% frente a datos de distribución reales de la empresa objeto de estudio.

Por su parte, Karaoglan & Altiparmak (2010) proponen una heurística híbrida entre el algoritmo genético y la heurística del vecino más cercano. Para evaluar el desempeño de la variante VRPPD, los autores llevaron a cabo un estudio experimental donde se compararon los resultados obtenidos, con un conjunto de datos teóricos encontrados en la literatura. El VC se usa como un algoritmo de búsqueda local de soluciones, y el GA se usa para desarrollar los procedimientos de recombinación de soluciones.

La función objetivo del problema minimiza el costo total del sistema de distribución, incluyendo costos de transporte y operación de los vehículos. Las restricciones garantizan que la entrega y el retiro totales de las cargas desde cualquier depósito no excedan la capacidad del depósito correspondiente, ni la capacidad del vehículo.

En cada iteración de la heurística híbrida, se escoge la mejor solución, o aquella que representa el menor costo. Si la nueva solución es mejor que la solución actual, entonces se acepta como solución actual, de lo contrario se asigna una probabilidad a la solución descartada, para ser comparada posteriormente a medida que se itera el modelo. La heurística resultó bastante eficiente ya que se minimizó la función de costo en un 7,4% frente a los mejores resultados encontrados en la literatura del VRPPD.

Chen, Hsiao, Reddy & Tiwari (2016) resuelven el problema VRPPD con un algoritmo de enjambre de partículas (PSO). Para su solución, los autores trabajan

con una población (llamada enjambre) de soluciones iniciales (llamadas partículas). Dichas partículas se desplazan a lo largo del espacio de búsqueda conforme unas reglas matemáticas establecidas. A medida que se descubren nuevas y mejores posiciones, éstas pasan a orientar los movimientos de las partículas. El proceso se repite con el objetivo de hallar una solución que cumpla con todas las restricciones del modelo.

El modelo estudiado por Chen, Hsiao, Reddy & Tiwari (2016) corresponde a un proceso de distribución de recogidas y entregas a través de estrategias de Cross-Docking. Por esta razón, el método de solución se aplicó por separado para las operaciones de alistamiento y distribución.

Una vez iterados los modelos, se compararon los mejores resultados obtenidos con resultados de investigaciones previas usando algoritmos genéticos, mostrando que el algoritmo PSO tiene mayor desempeño que el GA para resolver problemas complejos de VRP que modelan actividades de Cross-Docking. En todas las corridas realizadas se puede observar que el PSO mejora la función objetivo en promedio un 3% que utilizando la metaheurística GA.

Silva, Kokkinoginis, Câmara, Ulisses, Urbano, Castro Silva, Oliveira & Rossetti (2016) utilizaron dos metaheurísticas para determinar el mejor plan de viajes para el servicio de taxis compartidos, tomando en consideración el tiempo de recogida y entrega de los pasajeros que solicitaban el servicio.

Las metaheurísticas utilizadas son un híbrido entre la metaheurística Búsqueda Tabú y Recocido Simulado. El algoritmo propuesto calcula nuevas rutas para los taxis que ya habían iniciado un plan de viaje, de tal manera que no se afecte el tiempo de entrega de los pasajeros que programaron inicialmente el recorrido.

Los algoritmos arrojaron sub-soluciones en cada iteración, que se iban guardando como soluciones tabú (es decir, soluciones que se les asigna una probabilidad de

ser soluciones óptimas del problema). El algoritmo tenía en cuenta que si de las 10 soluciones guardadas, 4 eran tabú, se calculaba el mejor plan de viaje entre las seis soluciones restantes, cuyos costos de viaje fueran los más bajos.

La función objetivo considera el factor de demora, como el tiempo que tarda el taxi en completar el plan de viaje establecido. Cada plan de viaje incluye el origen y el destino de todos los pasajeros, teniendo en cuenta el tiempo de viaje esperado para cada pasajero, y la ventana de tiempo respectiva que define los tiempos de recogida y entrega de pasajeros.

En el escenario de 10 pasajeros, se obtuvieron mejores resultados con la metaheurística de Recocido Simulado. El SA obtuvo una reducción promedio del 80%, mientras que el TS obtuvo una reducción promedio del 29%. Con el algoritmo TS se generaron 641.5 unidades de retardo y con SA se generaron 173 unidades de retardo.

Yanik, Bozkaya & deKervenoael (2013) utilizan una metaheurística híbrida para resolver el problema VRPPD para actividades de distribución de e-commerce o comercio electrónico, en dos fases: en la primera fase se utiliza el Algoritmo Genético para la selección y ubicación de los vendedores; y en la segunda fase se utiliza la heurística del vecino más cercano para encontrar las mejores rutas de transporte. Además los autores consideran restricciones de carga tridimensionales para evaluar la capacidad de la flota de vehículos.

La heurística del vecino más cercano construye la red de rutas de bajo costo, moviéndose de un cliente al siguiente, de tal forma que, de todas las opciones, el cliente elegido sea el más cercano a donde se encuentra el vehículo en un momento dado.

Para evaluar la eficacia del algoritmo híbrido, se utilizaron datos reales de distribución de productos a través de estrategias de e-commerce, arrojando resultados factibles en términos de costo de operación, visitas a vendedores y número de productos a transportar.

En términos generales, se puede inferir que las herramientas de solución, asociadas a enfoques metaheurísticos, utilizadas para resolver el problema de ruteo de vehículos con múltiples recogidas y entregas (VRPPD), son eficaces para encontrar rutas factibles en tiempos de cómputo razonables, así como cumplir con las restricciones particulares de cada problema analizado y optimizar la función objetivo planteada.

5.1.2 Características Empresariales

A continuación se analizan algunas características empresariales tenidas en cuenta por los autores, para modelar y resolver el Problema de Ruteo de Vehículos con múltiples entregas y recogidas – VRPPD.

Dechampai, Tanwanichkul, Sethanan & Pitakaso (2017) estudian el modelo de ruteo de vehículos con múltiples recogidas y entregas para una empresa grande de distribución de pollos de corral. Dichos autores analizaron que la empresa contaba con una flota de vehículos propia de apoyo a actividades de distribución y múltiples centros de acopio. También notaron que al tener una flota de transporte propia, la empresa se enfrentaba al problema del aumento de costos de transporte ocasionado por el desequilibrio existente entre la producción y la demanda heterogénea de los centros de acopio.

Para solucionar el problema de distribución, Dechampai, Tanwanichkul, Sethanan & Pitakaso (2017) consideraron en el modelo VRPPD, variables de capacidad, duración máxima de las rutas y múltiples depósitos. Igualmente establecieron que el costo total a minimizar estuviera compuesto por dos elementos: costo del

combustible y costo de utilización del vehículo. Las restricciones al modelo se diseñaron de tal manera que la disminución del costo de combustible sea reducida por la minimización de las distancias y el costo de utilización del vehículo, se redujera mediante la plena utilización de la capacidad del vehículo.

Karaoglan & Altıparmak (2010) proponen el modelo VRPPD con restricciones de carga, cuyo objetivo es encontrar aquellas rutas tales, que la recogida y las demandas de entrega de cada cliente deban realizarse con un mismo vehículo, de tal manera que se minimice el costo total de distribución y se optimice la capacidad de los vehículos. El modelo abarca el estudio de una red de distribución donde es necesario disminuir los costos de las rutas de transporte y la ubicación de centros de acopio, como dos variables interdependientes.

Además se incluyen restricciones relacionadas con la capacidad del vehículo, longitudes de la ruta, demandas de los clientes, costos fijos del vehículo, costos fijos de instalación y costos de operación de los centros de acopio. Algunas de las áreas de aplicación del VRPPD con restricciones de carga están relacionadas con la distribución de alimentos y bebidas, la ubicación de equipo militar la entrega de paquetes y el diseño de redes de comunicaciones.

A pesar de que los modelos con restricciones de carga son problemas importantes para la literatura y la práctica científica, no han recibido la suficiente atención por parte de los investigadores especializados.

Zachariadis, Tarantilis & Kiranoudis (2015) analizan el modelo VRPPD a partir de las siguientes características empresariales: vehículos que parten de un depósito central y que atienden un conjunto de solicitudes de clientes. Estas solicitudes implican el envío de productos por parte de los clientes, para ser trasladados de vuelta al depósito. Los productos que son transportados consisten en ítems de dos dimensiones que se consideran no apilables. Dichas características corresponden a servicios de distribución de bienes y mensajería.

Por otro lado, Chen, Hsiao, Reddy & Tiwari (2016), estudian la variante VRPPD con operaciones de Cross-Docking, que resulta ser más complejo que el modelo VRPPD clásico. La implementación de las operaciones de Cross-Docking en los centros de distribución puede crear un sistema logístico eficiente en cadenas de suministro para controlar el flujo de bienes. Las anteriores características empresariales son aplicadas a sistemas de distribución logística complejos en sectores tales como el transporte de mercancía, grandes superficies y empresas grandes mensajería.

Chen, Hsiao, Reddy & Tiwari (2016) tuvieron en cuenta que para ser eficientes con la estrategia de Cross-Docking, se debe considerar la variedad de productos suministrados por las empresas comercializadoras. Al existir dicha característica, hay un aumento sustancial en la incertidumbre de la demanda del cliente, lo que requiere un sistema logístico más eficiente para acortar el tiempo del ciclo del pedido y mejorar el nivel de servicio.

Silva, Kokkinogenis, Câmara, Ulisses, Urbano, Castro Silva, Oliveira & Rossetti (2016) entendieron que el uso compartido de taxis tiene grandes ventajas para los operadores de taxis, especialmente para los pasajeros, ya que el costo de viaje se divide por la cantidad total de pasajeros atendidos.

Dicho esquema es eficiente para mitigar el caos vehicular, evitar congestiones, disminuir el consumo de combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero, en el contexto del transporte de grandes ciudades.

Finalmente, Yanik, Bozkaya & deKervenoael (2013) proponen un modelo VRPPD para la distribución de alimentos y mercancía a través de estrategia de e-commerce. Los autores tuvieron en cuenta en dicha investigación que en un entorno de e-tienda impulsado por el mercado, se hace necesario satisfacer la

demanda del consumidor con productos diversos y Premium. Ejemplo de este tipo de productos son productos orgánicos, vinos, regalos o productos de ocasiones especiales.

El sistema de distribución de este modelo es cooperativo, ya que las tiendas online de bienes generalmente no ofrecen dichos productos premium. Para solucionar el inconveniente, se planearon rutas con múltiples entregas y recogidas de productos en tiendas especializadas, que están distribuidas en una zona geográfica determinada, para luego repartirlos a los clientes finales. De esta manera se observa que una estrategia clave para aumentar la cantidad de clientes atendidos en este esquema, así como el margen y el tamaño del catálogo, es ofrecer servicios premium y una variedad de productos que satisfagan las necesidades y deseos de los consumidores

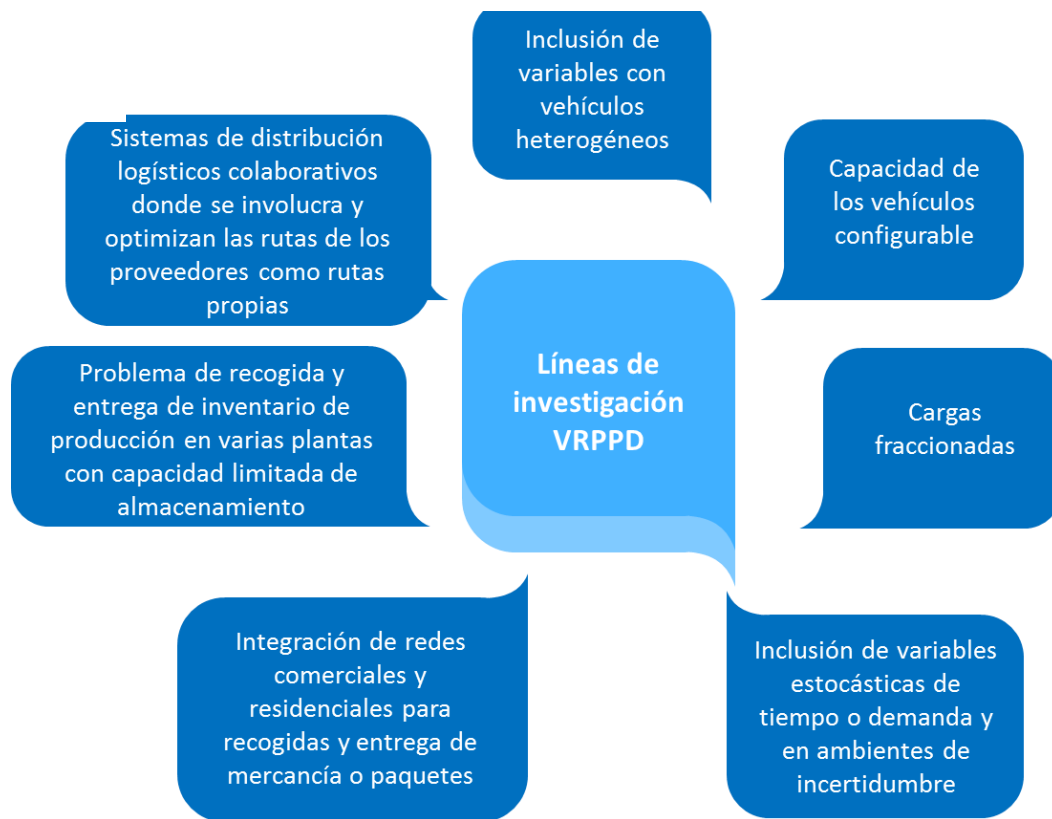
5.1.3 Brechas y Tendencias detectadas en la revisión bibliográfica.

En su gran mayoría los artículos revisados de la variante VRPPD hacen referencia a situaciones reales, que hace que la aplicación de las técnicas de solución se torne más interesante.

En un sentido estricto, cada una de las variantes y aplicaciones del VRPPD analizadas, puede constituirse como una línea de investigación del área de operaciones y logística.

Con base en el análisis realizado se sugieren las siguientes líneas de investigación:

Figura 2. Líneas de investigación - VRPPD



Fuente: Autor.

Otra oportunidad de investigación detectada es la utilización de métodos híbridos u otras metaheurísticas para resolver el mismo problema, y considerar múltiples funciones objetivos en lugar de una; además de la integración en un solo modelo, de variables relacionadas con actividades de Cross-Docking, alistamiento de pedidos, distribución y ruteo.

En relación a los métodos de optimización utilizados, se identifica la necesidad de incluir artificios matemáticos que permitan al algoritmo "aprender de sus errores" en la búsqueda de soluciones factibles y que hacen que la solución no converja en óptimos locales, sino que "salte" a óptimos de naturaleza global.

Es importante destacar que para las técnicas híbridas, se utilicen métodos más eficientes para la construcción de rutas. Karaoglan & Altiparmak (2010) utilizaron la heurística del vecino más cercano para construir soluciones iniciales, sin embargo se ha descubierto que con dicha heurística, probablemente quedarán vértices cuya conexión obligará a introducir clientes de costos elevados, haciendo que los costos de la función objetivo aumenten.

Otra brecha identificada en el análisis de las soluciones del VRPPD es el uso de algoritmos exactos para construir soluciones iniciales para problemas con instancias grandes, haciendo poco eficaz la búsqueda de soluciones (Yanik, Bozkaya & deKervenoael, 2013). Por esta razón se sugiere aplicar heurísticas, como el algoritmo de ahorros o de inserción, que hayan sido probadas en otras investigaciones y que arrojen soluciones iniciales factibles en un tiempo de cómputo razonable.

Finalmente, los trabajos de investigación analizados pueden extenderse y ampliarse, formulando el modelo VRPPD con múltiples objetivos y utilizando datos e información de sectores de transporte reales.

5.2 ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON BACKHAULS.

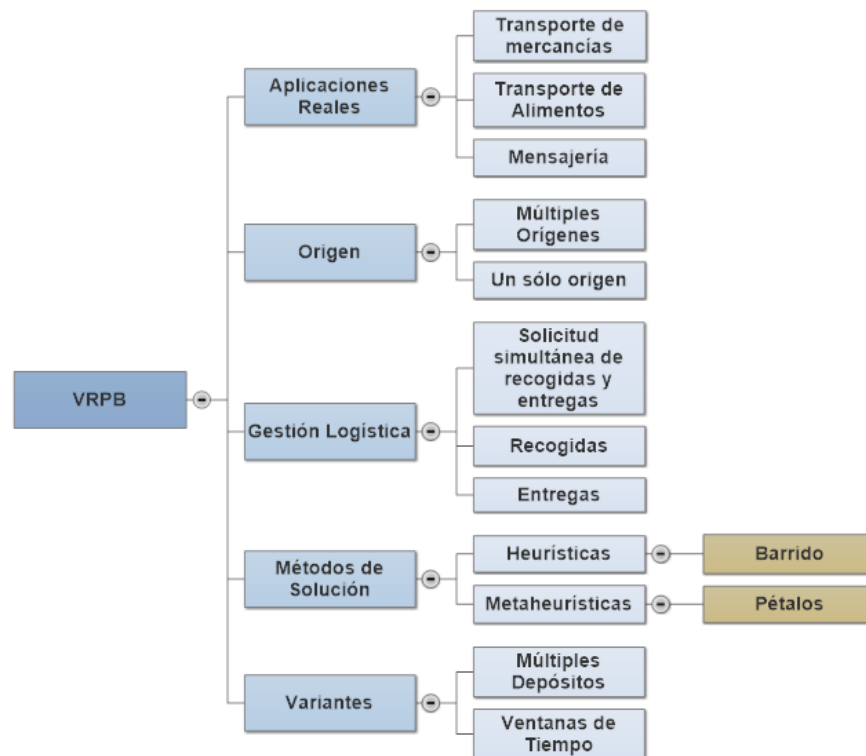
El problema de Ruteo de vehículos con Backhauls -VRPB- es una extensión del problema VRP clásico que incluye tanto un conjunto de clientes a quienes se deben entregar los productos, como un conjunto de proveedores cuyos bienes deben ser transportados de regreso al centro de distribución. Además, en cada ruta, todas las entregas deben realizarse antes de que se pueda recoger cualquier mercancía para evitar reorganizar las cargas en el vehículo.

Según Ralphs, Hartman y Galati (2001) los puntos de recolección envían cierta cantidad de productos a los centros de distribución principales. La suposición

crítica es que todas las entregas deben realizarse en cada ruta antes de que se puedan realizar recolecciones. Esto se debe al hecho de que los vehículos tienen carga trasera y la reorganización de las cargas de los camiones en los puntos de entrega no se considera económica ni factible. Las cantidades que deben entregarse y recogerse son fijas y conocidas de antemano.

La Figura 3 representa el marco taxonómico propuesto para el Problema de Ruteo de Vehículos con Backhauled (VRPB), definido a partir de la revisión de literatura realizada.

Figura 3. Marco Taxonómico propuesto para el VRPB



Fuente: Autor.

Se destacan las siguientes características del problema: aplicaciones en contextos reales, origen de la flota de vehículos, características de la gestión logística aplicada, métodos de solución y variantes del problema.

De acuerdo con la literatura consultada, el problema de ruteo de vehículos con Backhauls (VRPB) es aplicable a actividades de transporte de mercancías, transporte de alimentos y mensajería. (Wassan, Wassan, Nagy, & Salhi , 2016). El problema con backhauls se puede modelar considerando múltiples orígenes o un solo origen llamado depósito.

De la misma manera el problema con Backhauls puede aplicarse a actividades simultáneas de recogida y entrega o sólo para recogidas o entregas individuales de bienes. Ralphs, Hartman y Galati (2001) explican que de acuerdo con la característica de la gestión logística que se modele, la flota de vehículos puede ser heterogénea u homogénea.

Se encontró en la literatura revisada, que en los problemas con Backhauls pueden considerarse ventanas de tiempo, que son los tiempos permitidos por el cliente para recibir el servicio, además de múltiples depósitos distribuidos estratégicamente cerca de los clientes que se catalogan como críticos. (Wassan, Wassan, Nagy, & Salhi , 2016).

Se introduce también una variante del VRP con Backhauls con múltiples viajes que deben ejecutarse en un periodo de tiempo determinado y donde los vehículos deben recoger bienes en las ubicaciones de los clientes para traerlos al depósito una vez se finalicen las entregas. Para esta variante es importante analizar la capacidad de los vehículos cuando se entregan y reciben productos de los clientes. Si la restricción de capacidades no se cumple, el servicio no se puede ejecutar.

5.2.1 Eficacia de los modelos utilizados para la solución del VRPB

(Wassan, Wassan, Nagy, & Salhi , 2016) utilizan una heurística de barrido en dos etapas con enfoque en la búsqueda de vecindades. La primera etapa genera

soluciones iniciales factibles, es decir, soluciones que cumplen con las restricciones del modelo. Luego para la mejora de rutas, se utiliza el enfoque de Búsqueda de Vecindad Variable (VNS) que se basa en la idea de un cambio sistemático de vecinos dentro de un método de búsqueda local.

El concepto básico del VNS se enriquece al incorporar secuencias y cambios de nodos para lograr una diversificación durante el proceso de búsqueda. El concepto de VNS es simple, pero ha demostrado ser robusto para resolver una variedad de problemas de optimización combinatoria.

En la investigación analizada, los autores utilizaron tres grupos de problemas con 21 instancias cada uno. Cada instancia tiene de 21 a 50 clientes. Se corrieron 200 iteraciones del modelo que permitió encontrar 50 rutas factibles que cumplían con las restricciones planteadas. El algoritmo encontró 54 rutas factibles que cumplen con las restricciones planteadas en el modelo y que mejoran la función objetivo un 9,6% frente a resultados similares encontrados en la literatura, en un tiempo de cómputo razonable.

Además de la metodología propuesta por Wassan, Wassan, Nagy, & Salhi (2016), se encontró literatura donde se relacionan modelos de solución del problema VRPB basados en algunos métodos conocidos para el VRP Clásico. Las metodologías de solución se clasifican de acuerdo con un esquema sugerido por Bodin et al., (1983), así:

- **Primero Clúster / Segundo Ruta:** esta estrategia está basada en el algoritmo de barrido de Gillett y Miller (1974). El enfoque de barrido se puede extender fácilmente al VRPB al truncar los clústeres cuando se excede la capacidad de la línea de transporte o de la red de retorno. La estrategia primero clúster / segundo ruta, se puede desarrollar también a través de una metaheurística de pétalos, que consiste en la construcción de un conjunto de rutas factibles, donde cada cliente es visitado por varias de

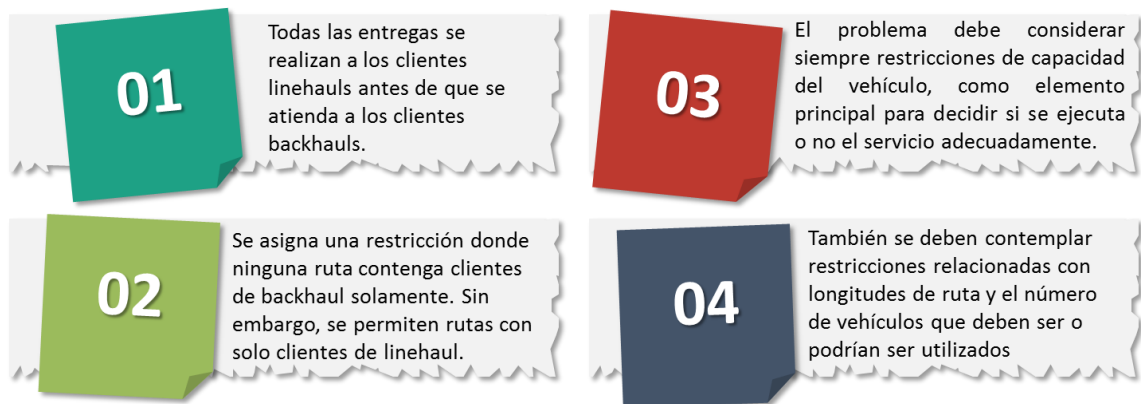
las rutas programadas. El conjunto de clientes visitado por cada ruta forma un intervalo, que en algunos casos tiene forma de pétalo.

- **Primero Ruta / Segundo Clúster:** la extensión de este enfoque se puede lograr resolviendo un Problema de Vendedor Viajero (TSP) para los puntos de entrega, y luego resolviendo un TSP para los puntos de recolección. Cada uno de los recorridos grandes se puede dividir en rutas de entrega y recogida individuales, que luego se pueden agrupar para formar rutas linehaul-backhaul.
- **Ahorro / Inserción:** Este concepto se refiere al enfoque constructivo por el cual una configuración de puntos se cambia a una configuración alternativa que produce un 'ahorro' en términos de un objetivo particular, similar al propuesto por Clarke y Wright (1964).
- **Mejora / Intercambio:** el método más conocido es el algoritmo r-opt de Lin y Kernighan (1973). Otros procedimientos intercambian clientes entre rutas, en lugar de dentro de las rutas. Dichos métodos se pueden aplicar fácilmente a una solución dada para VRPB teniendo en cuenta la relación de precedencia de las entregas antes de las recolecciones, siempre que se considere un intercambio.
- **Técnicas basadas en optimización:** Min et al., (1992) desarrollan una metodología para resolver el VRPB cuando están involucrados múltiples depósitos. Dichos autores utilizan un enfoque de descomposición, determinando primero los clústeres de entrega / recolección, luego asignando esos clústeres a los depósitos y rutas, y finalmente programando la secuencia de la ruta misma. Al determinar los clústeres de entrega / recolección, utilizan un método de agrupamiento estadístico para aprovechar la naturaleza espacial del problema.

5.2.2 Características Empresariales

Los clientes del problema VRPB se dividen en dos grupos: clientes de entrega (linehaults) y de recogida (backhaul). Para poder atender las dos clases de clientes, se debe considerar una flota de vehículos con carga heterogénea, con diferentes costos fijos de acuerdo al tamaño de la flota. Además de las anteriores restricciones, los investigadores consideran las siguientes características empresariales para modelar el problema de ruteo con Backhaults:

Figura 4. Características empresariales - VRPB



Fuente: autor

Las anteriores características corresponden a empresas grandes de transporte de bienes y mercancías que administran recursos logísticos robustos y complejos con múltiples centros de distribución y acopio y flotas heterogéneas. Al considerarse proveedores/clientes que devuelven la mercancía en una misma ruta de transporte, el problema con Backhaults puede aplicarse también a empresas que ofrecen el servicio de logística inversa o un servicio posventa desarrollado.

5.2.3 Brechas y Tendencias detectadas en la revisión bibliográfica

Al igual que muchos otros problemas de ruteo, el VRPB es un problema complejo que requiere algoritmos robustos para obtener soluciones en un tiempo de cómputo razonable, sobre todo para problemas con datos reales. Por ello se hace necesario el desarrollo de metaheurísticas híbridas que contemplen estrategias de búsqueda, construcción y mejora de rutas para encontrar soluciones factibles en tiempos de cómputo razonables, además de contemplar heurísticas propias que permitan optimizar el espacio de almacenaje de la flota de vehículos heterogénea.

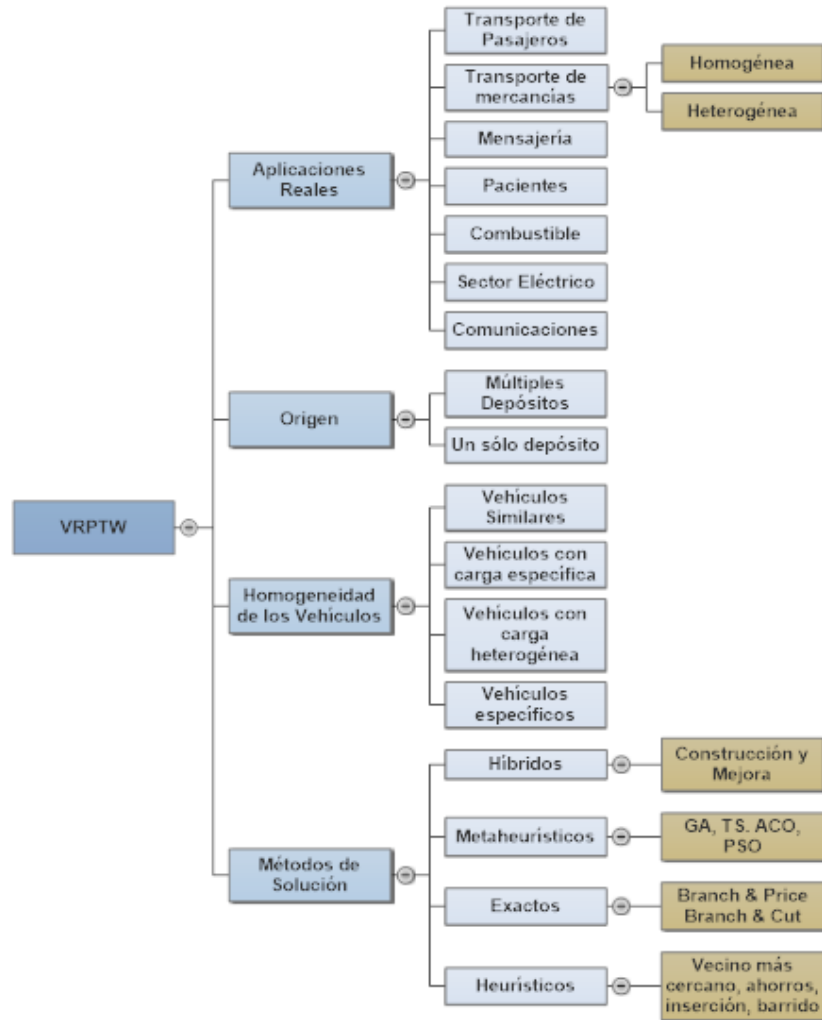
Las tendencias futuras del estudio del Problema de Ruteo de Vehículos con Backhauls se pueden extender a la inclusión de ventanas de tiempo y variables estocásticas de demanda, tiempo o capacidad de los vehículos. El resultado de estas futuras investigaciones sobre el tema debería ser el desarrollo de algoritmos muy versátiles y precisos para el problema, que permita contemplar todas las restricciones anteriores además de incluir información de sistemas de distribución de empresas reales.

5.3 ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON VENTANAS DE TIEMPO.

El problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW) es una importante variación del problema VRP, en el que el servicio prestado por cada vehículo a cada cliente, debe comenzar dentro de una ventana de tiempo definida por el mismo cliente. (Cordeau, Laporte, Savelsbergh, & Vigo, 2007).

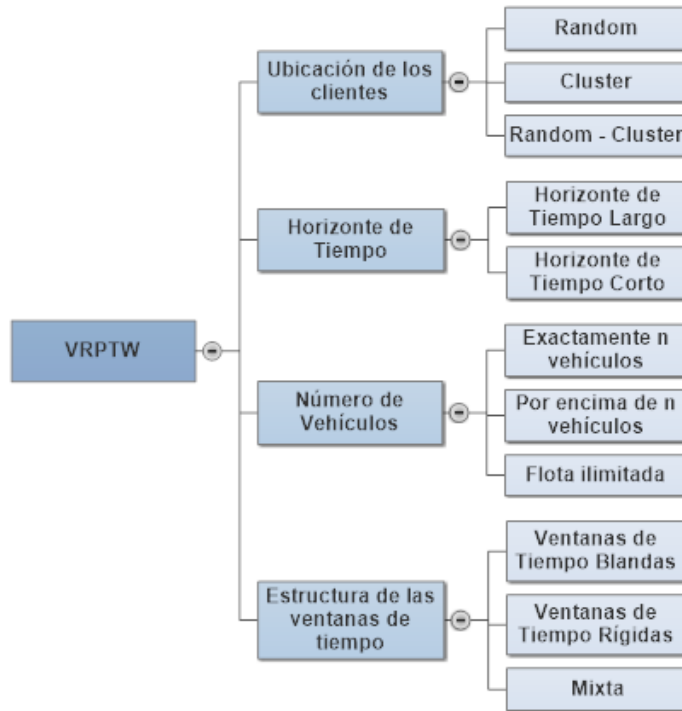
El VRPTW es uno de los problemas de ruteo más estudiados en la literatura especializada, ya que ha permitido el desarrollo de modelos de optimización robustos que han sido aplicados a contextos reales. Con base en la literatura encontrada, se estructuró un marco taxonómico que permite conocer las principales características de dicho problema de transporte.

Figura 5. Marco Taxonómico propuesto para el VRPTW



Fuente: Autor.

Figura 6. Marco Taxonómico propuesto para el VRPTW – Continuación.



Fuente: Autor.

Se destacan las siguientes características del problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo: aplicaciones en contextos reales, origen de las mercancías, homogeneidad de los vehículos, ubicación de los clientes, horizonte de las ventanas de tiempo, número de vehículos y estructura de las ventanas de tiempo.

Como se mencionó anteriormente, el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo ha llamado la atención de los investigadores especializados, debido a su aplicación en contextos reales de transporte, entre los que se cuentan: transporte de pasajeros: Zhenfeng, Yang , Xiaodan & Sheng (2017), Fu, Zhou, Qi & Wu (2016); transporte de mercancías con flota homogénea o heterogénea: Chen & Ting (2005), Yiko (2010), Figliozzi (2010), Zhen & Zhang (2006), Ben, Absi,

Feillet, Quillio (2017), García & Gómez (2013); mensajería: Dong, Tang, Keung & Kong (2009), Dabia, Ropke, Woensel & De Kok (2012), Chen, Hsiao, Reddy, Kumar (2015), Wen & Eglese (2014); transporte de pacientes: Tilia, Harzia & Krichen (2016); transporte de combustible, transporte de materiales del sector eléctrico: Lai, W., Li, R., Xie, L., Qi, M. (2016), comunicaciones: Boonkleaw, Suthikarnnarunai & Srinon (2010), y desperdicios: Huang & Lin (2015), Hoang & Louati (2016), Markov, Varone & Bierlaire (2015).

En relación al origen de las mercancías, se destacan dos clases de investigaciones: las que se distribuyen a través de un solo depósito: Zhenfeng, Yang, Xiaodan & Sheng (2017), Fu, Zhou, Qi & Wu (2016), Dabia, Ropke, Woensel & De Kok (2012), Chen & Ting (2005), Yiko (2010), Figliozzi (2010); o las que se distribuyen a partir de múltiples depósitos: Markov, Varone & Bierlaire (2015), García & Gómez (2013), Hoang & Louati (2016), Lai, W., Li, R., Xie, L., Qi, M. (2016).

También se encontraron investigaciones donde se presta especial atención a las restricciones de capacidad relacionadas con las características de la flota de vehículos: flota homogénea: Yiko (2010), Figliozzi (2010), Dabia, Ropke, Woensel & De Kok (2012), Lai, W., Li, R., Xie, L., Qi, M. (2016), Zhen & Zhang (2006), Ben, Absi, Feillet, Quillio (2017); carga heterogénea: Markov, Varone & Bierlaire (2015); vehículos con dimensiones específicas: Boonkleaw, Suthikarnnarunai & Srinon (2010) y carga específica: Hoang & Louati (2016).

Las ventanas de tiempo asociadas a los clientes, son una característica muy importante en el problema de ruteo con ventanas de tiempo. Existen ventanas de tiempo de largo horizonte de programación, es decir aquellas que permiten mayor holgura de tiempo en la asignación de clientes a la ruta (Markov, Varone & Bierlaire, 2015); y de corto horizonte de programación, donde las ventanas de

tiempo no permiten mayores holgura para que los vehículos visiten a los clientes (Zhen & Zhang, 2006)

Otra característica importante para la variante del problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, es la ubicación de los clientes. Existen investigaciones donde las coordenadas geográficas de los clientes son generadas aleatoriamente (random), (Ben, Absi, Feillet, Quillio, 2017); donde los clientes están agrupados por zonas o clústeres (Boonkleaw, Suthikarnnarunai & Srinon, 2010) y por semi-clústeres (Tlilia, Harzia & Krichen, 2016). Se evidenció que para los clientes agrupados por zonas o clústeres, las heurísticas de ahorro y de vecindades son las más eficientes; mientras que para los clientes cuyas ubicaciones se generan aleatoriamente, las heurísticas de inserción de clientes son las más efectivas para encontrar soluciones factibles.

Finalmente, se destaca otra característica del VRPTW, y es la estructura de la ventana de tiempo de los clientes. Existen investigaciones donde se consideran ventanas de tiempo blandas, es decir donde los algoritmos intentarán respetar las ventanas de tiempo, pero de ser necesario, infringirá las ventanas de tiempo de algunas paradas para poder llegar a ellas (Figliozzi, 2010), (Fu, Zhou, Qi & Wu, 2016); ventanas de tiempo duras, donde no se permite ningún tipo de infracción a las restricciones de las ventanas de tiempo de los clientes (Boonkleaw, Suthikarnnarunai & Srinon, 2010), (Wen & Eglese, 2014); y una mezcla de ventanas de tiempo duras y blandas (Zhen & Zhang, 2006).

5.3.1 Eficacia de los modelos utilizados para la solución del VRPTW

Para resolver el problema VRPTW, los investigadores han utilizado diversas metodologías de optimización, que incluye metaheurísticas, métodos híbridos, heurísticas y métodos exactos. En la tabla 10 se relaciona los métodos de solución utilizados por los autores que estudiaron la variante del problema con ventanas de tiempo.

Tabla 10. Métodos de solución de la variante VRPTW

Autores	Metaheurísticas					Métodos Híbridos					Métodos Exactos			Heurísticas	
	G A	T S	A C O	S A	P S O	ACO y SA	Iterat y Aho	VC y Cons	BL y ACO	LAN y TS	P E M	B & P	B & C	A B	V C
Dong, Tang, Keung & Kong (2009)											X				
Dabia, Ropke, Woensel & De Kok (2012)												X			
Boonkleaw, Suthikarnnarunai & Srinon (2010)														X	
Ben, Absi, Feillet, Quillio (2017)													X		
Markov, Varone & Bierlaire (2015)															X
García & Gómez (2013)	X	X	X	X											
Zhenfeng, Yang, Xiaodan & Sheng (2017)	X														
Yiko (2010)				X											
Fu, Zhou, Qi & Wu (2016)			X												
Chen, Hsiao, Reddy, Kumar (2015)					X										
Tilia, Harzia & Krichen (2016)					X										
Huang & Lin (2015)			X												
Hoang & Louati (2016)					X										
Chen & Ting (2005)						X									
Figliozzi (2010)							X								
Lai, W., Li, R., Xie, L., Qi, M. (2016)								X							
Zhen & Zhang (2006)									X						
Wen & Eglese (2014)										X					

Convenciones:

GA: Algoritmo Genético

TS: Búsqueda Tabú.

ACO: Algoritmo de Colonia de Hormigas

PSO: Algoritmo de Enjambre de Partículas

VC: Algoritmo del Vecino más cercano

SA: Algoritmo de Recocido Simulado.

Iterat: Algoritmo Iterativo.

Aho: Algoritmo de Ahorros.

Cons: Algoritmo de Construcción.

BL: Búsqueda Local.

LAN: Algoritmo LANTIME.

PEM: Programación Entera Mixta.

B&P: Algoritmo Branch & Price.

B&C: Algoritmo Branch & Cut.

Fuente: Autor.

Boonkleaw, Suthikarnnarunai & Srinon (2010) utilizaron un algoritmo de barrido modificado para resolver el problema VRPTW. El algoritmo agrupa los vértices o clientes distribuidos en zonas geográficas y programa las rutas factibles para cada grupo de clientes. La característica principal de este algoritmo es la ubicación del depósito como el centro de un plano dimensional o geográfico desde donde se determinan coordenadas polares para cada cliente, para comenzar a “barrer” todos los clientes, aumentando el ángulo polar respecto al depósito. El algoritmo demostró ser eficaz para clientes ubicados en clústeres y semi-clústeres.

García & Gómez (2013) analizaron diferentes algoritmos para resolver el VRPTW con múltiples depósitos desde donde se distribuyen alimentos y mercancías que necesitan ser refrigeradas. El modelo propuesto por los autores también incluye restricciones adicionales por depósito, tales como niveles mínimos de inventario para cada almacén, capacidad de almacenamiento y actividad máxima de las tiendas (depósitos) para mantener niveles aceptables de eficiencia en términos de tiempo de entrega y costo de operación.

En este modelo, las tiendas se introducen como depósitos. Dichas tiendas están configuradas para la recolección, preparación, y distribución de productos a los consumidores. De la misma manera, el modelo plantea nuevas opciones y restricciones asociadas con el problema, como el uso de vehículos específicos con compartimientos para diferentes temperaturas.

La primera parte de la función objetivo representa los costos fijos de los vehículos, teniendo en cuenta que cada ruta se sirve con un vehículo. La segunda parte son los costos variables relacionados con las distancias recorridas por los vehículos.

También se incluyeron nuevos criterios de costo relacionados con los costos de preparación de la orden.

Se analizaron diferentes algoritmos para resolver el problema planteado con múltiples depósitos. De acuerdo con las características anteriormente descritas, las metaheurísticas planteadas arrojaron resultados factibles y permitieron a los autores comparar los efectos de las distintas variables, como el costo de la ruta y el nivel de automatización de los almacenes. Entre las metaheurísticas analizadas se encuentran: Algoritmo de Colonia de Hormigas, Recocido Simulado, Búsqueda Tabú y Algoritmo Genético.

Dong, Tang, Keung & Kong (2009) presentan un modelo de programación entero mixto para solucionar el problema VRPTW para un servicio de transporte de pasajeros hacia los aeropuertos. El algoritmo organiza conjuntos de rutas y selecciona aquellas que son factibles, es decir que cumplen satisfactoriamente las restricciones del problema. Luego, de las mejores posibles rutas, el algoritmo selecciona aquella ruta óptima, es decir la que tiene el costo de operación asociado más bajo. Finalmente el modelo crea nuevas rutas a partir de secciones de rutas extraídas de soluciones factibles, las ensambla y las compara con aquella ruta de menor costo.

La eficacia del algoritmo se evaluó con datos históricos de 200 rutas generadas al azar. Para probar el algoritmo, se tomaron grupos de datos que contienen 80 pedidos, 90 pedidos, 100 pedidos y 110 pedidos, con 103 pasajeros, 116 pasajeros, 127 pasajeros y 142 pasajeros, respectivamente. Los resultados mostraron una disminución del número de rutas factibles a medida que el grado de satisfacción de pasajeros aumenta. También se observa disminución de los costos operativos totales y costos promedio de operación. La satisfacción promedio resultante de los pasajeros después de implementado el modelo fue del 90%.

Por su parte, Zhenfeng, Yang, Xiaodan & Sheng (2017) utilizan un algoritmo robusto basado en el Algoritmo Genético para resolver el problema VRPTW aplicado a un servicio de pasajeros. El algoritmo genera aleatoriamente la población inicial, que está constituida por un conjunto de “cromosomas” los cuales representan las posibles soluciones del problema. A cada uno de los cromosomas de esta población se aplica una función de aptitud para saber si la solución es buena. Posteriormente se seleccionan los mejores individuos para conformar la población de la generación siguiente de soluciones.

Los autores corrieron el modelo 500 veces para un servicio de 25 pasajeros. Los resultados del experimento arrojaron una disminución del 10% en el costo promedio unitario del servicio.

El modelo estudiado por Zhenfeng, Yang, Xiaodan & Sheng (2017), para resolver el VRPTW es un algoritmo iterativo de construcción y mejora de rutas que hace las rutas se construyan y mejoren secuencialmente. La fase de construcción de ruta utiliza dos algoritmos: un algoritmo de creación de rutas auxiliares y un algoritmo de construcción de ruta. La fase de mejora de ruta también utiliza dos algoritmos: un algoritmo de mejora de ruta y un algoritmo de mejora de tiempo.

La solución al algoritmo es intuitiva y puede acomodar las funciones generales de costo y penalización por incumplimiento de las ventanas de tiempo. La calidad de la solución y el tiempo de cálculo del nuevo algoritmo se compararon contra resultados existentes de referencia. Se tomaron 30 instancias de problemas para probar el desempeño del algoritmo.

El modelo propuesto por los autores mejora los resultados de 21 instancias al reducir el número de rutas. También se comprobó que esta herramienta utiliza menos vehículos para servir los clientes, pero incumple las restricciones de

ventanas de tiempo, haciendo que el algoritmo sea poco eficaz para el modelo de distribución estudiado.

Chen & Ting (2005) estudian una versión del problema de enrutamiento del vehículo (VRP) para minimización de tiempo con restricciones mixtas (precedencia y posición fija). Por restricciones de precedencia se entiende que las ciudades se visitan de tal manera que una ciudad particular está precedida por otra ciudad (la relación de precedencia no necesita ser inmediata) y por restricciones de 'Posición fija', se entiende que las posiciones de algunas de las ciudades se fijan en ciertos pasos para ser visitadas por un vehículo en particular.

Los autores utilizan una metodología híbrida entre el Algoritmo de Colonia de Hormigas y el Algoritmo de Recocido Simulado. Esta combinación de algoritmos permite que el modelo sea capaz de buscar múltiples áreas de búsqueda simultáneamente en el espacio de soluciones. Se llevaron a cabo experimentos computacionales sobre los 56 problemas de referencia de Solomon (1987) y se compararon los resultados con otros obtenidos por diferentes metodologías. El híbrido resulta ser eficaz para problemas con clientes de largo horizonte de programación.

Yiko (2010) desarrolla un algoritmo basado en la metaheurística Recocido Simulado (SA) para minimizar la cantidad de combustible consumida por una flota de vehículos con capacidad homogénea. Esta metodología está inspirada en el proceso de templado de metales.

El recocido simulado es un método iterativo basado en estados de mayor o menor "temperatura". La posibilidad de elegir un estado peor al actual en un momento determinado de la iteración, es lo que le permite a SA salir de óptimos locales para poder llegar a los óptimos globales. Una cualidad de SA es que la temperatura va disminuyendo gradualmente conforme avanza la simulación.

Los resultados muestran que el método propuesto proporciona una mejora del 24.61% en el consumo de combustible y una mejora del 22.69% en las distancias recorridas por la flota de vehículos.

Dabia, Ropke, Woensel & De Kok (2012) estudian un método exacto de optimización Branch And Price, considerando un escenario donde las rutas son congestionadas. El método utilizado contiene dos partes: en la primera, el algoritmo parte el problema general en pequeñas soluciones factibles, y la segunda parte, el algoritmo busca la ruta más corta dependiente del tiempo y con limitaciones de recursos. Los autores modificaron las instancias definidas por Solomon (1987) introduciendo datos temporales. El algoritmo es capaz de resolver cerca del 63% de las instancias de 25 clientes, 38% de las instancias con 50 clientes y 15% de las instancias con 100 clientes.

Fu, Zhou, Qi & Wu (2016) proponen una nueva versión del algoritmo de colonia de hormigas llamada "Discrete Ant Colony Optimization" para hacer más eficiente la búsqueda de soluciones factibles. En dicho algoritmo no se consideran las variables de tiempo (ventanas de tiempo). Solo se agregan cuando la heurística ha empezado a construir rutas.

En primer lugar, el ACO se discretiza y se mejora de acuerdo con las reglas básicas de dicho algoritmo. Posteriormente las restricciones de ventanas de tiempo no se consideran en el proceso de optimización lo que hace que la búsqueda de la mejor solución sea más eficiente, adicionalmente, la carga de los vehículos no se toma como una restricción del problema, lo que hace que las hormigas hagan uso exclusivo de su variable de sensibilidad para la búsqueda de soluciones. Lo anterior hace que el algoritmo no caiga rápidamente en óptimos locales. Se utilizaron las instancias propuestas por Solomon (1987) para la

resolución del algoritmo. Los resultados indican que el algoritmo es eficaz para la reducción de los tiempos de viaje y la complejidad de las rutas.

Lai, W., Li, R., Xie, L., Qi, M. (2016) investigan un modelo apropiado para optimizar la distribución de materiales de redes eléctricas. En esta investigación se analiza la red de distribución de este tipo de materiales y se utiliza una metaheurística de búsqueda variable de vecindades para resolver el modelo VRP.

Esta heurística explora vecindades distantes en términos geográficos y solo se mueve hacia dichas vecindades, si y solo si se identifican mejoras en la función objetivo cada vez que se itera el modelo. La metaheurística atiende los siguientes criterios: un mínimo local con respecto a una estructura de vecindario no es necesariamente un mínimo local para otra estructura de vecindario, un mínimo global es un mínimo local con respecto a todas las estructuras vecinales posibles.

Para muchos problemas, los mínimos locales con respecto a uno o varias vecindades están relativamente cerca el uno del otro. El modelo se iteró 25 veces. Los resultados arrojaron mejores costos para rutas de 14 vehículos que recorren aproximadamente 1388 kilómetros.

La investigación de Chen, Hsiao, Reddy, Kumar (2015), analiza un modelo de distribución basado en Cross-Docking, donde se administran múltiples centros de distribución y múltiples productos. Como dicho modelo resulta ser más complejo que los modelos teóricos de distribución tradicionales, se agrega componentes de autoaprendizaje y memoria al algoritmo de enjambre de partículas (PSO).

Se utiliza la metaheurística de enjambre de partículas ya que, por la complejidad de modelo, evita que los resultados caigan en óptimos locales. El algoritmo se aplicó por separado para las operaciones de alistamiento y distribución de mercancías. La mitad de los resultados se guardan en una memoria del algoritmo

para desarrollar las posteriores iteraciones. A través de artificios matemáticos, el algoritmo logra aprender de sus errores.

La metaheurística PSO permite optimizar un problema a partir de una población de soluciones candidatas, denotadas como "partículas", moviendo éstas por todo el espacio de búsqueda según reglas matemáticas que tienen en cuenta la posición y la velocidad de las partículas.

El movimiento de cada partícula se ve influido por su mejor posición local hallada hasta el momento, así como por las mejores posiciones globales encontradas por otras partículas a medida que recorren el espacio de búsqueda. La idea es hacer que la nube de partículas converja rápidamente hacia las mejores soluciones.

En promedio, los mejores resultados se obtuvieron cuando se utilizaban 3 vehículos de alistamiento de un total de 6, y 6 vehículos de distribución de un total de 16. Los costos operacionales de alistamiento y distribución en promedio fueron de 50 y 100 unidades de costo. Se mejoraron tiempos de alistamiento, frente a investigaciones de referencia, en aproximadamente un 5% en promedio.

Zhen & Zhang (2006) utilizan una metaheurística híbrida de dos fases para la solución del problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo: búsqueda local y algoritmo de colonia de hormigas (ACO) para mejora de las rutas.

Se utiliza la búsqueda local para agrupar de manera preliminar clientes cercanos a los múltiples depósitos y el ACO para analizar las restricciones de tiempo y verificar si los grupos formados inicialmente son factibles en términos de costo logístico de operación. El ACO utilizado para esta investigación atiende los siguientes criterios: una hormiga (solución factible) vaga de manera aleatoria alrededor de la colonia (espacio de soluciones), si encuentra una fuente de comida

(cumplimiento de las restricciones), retorna a la colonia dejando un rastro de feromonas que son atractivas para otras hormigas.

Estas hormigas seguirán el camino trazado. Si existen dos rutas para que lleguen a la misma fuente de alimentos entonces, en una misma cantidad de tiempo dado, la ruta más corta será recorrida por más hormigas que la ruta más larga. La ruta más corta habrá aumentado en cantidad de feromonas y por tanto empezará a ser más atractiva. Para evaluar la eficacia de la estrategia híbrida, se utilizó el set de problemas de Solomon (1987) con clientes distribuidos de forma clusterizada, randomizada y random-clúster, arrojando mejores resultados para clientes distribuidos en clústeres.

Tlilia, Harzia & Krichen (2016) utilizan la heurística de barrido para solucionar el problema de ruteo de ambulancias en una situación de desastres. La heurística propuesta por dichos autores forma un conjunto de clústeres a través de una semirrecta con origen en el depósito. Los clientes “barridos” por dicha semirrecta son incorporados a las rutas factibles hasta que se viole la restricción de capacidad de los vehículos (ambulancia). Cada clúster formado es luego ruteado a través de un método exacto.

Este algoritmo puede aplicarse en problemas planos, es decir, en los que cada nodo se corresponde con un punto en el plano y las distancias entre ellos se definen como la distancia euclídea entre clientes. La desviación entre la solución dada por el algoritmo de barrido y la solución más conocida está por debajo del 5.52% del costo promedio de transporte.

El método de optimización utilizado por Ben, Absi, Feillet, Quillio (2017) es el algoritmo Branch and Price, basado en un método exacto de linealización del problema de ruteo por medio de la aplicación del Método Simplex; sin embargo, dada la enorme cantidad de columnas (asignaciones o soluciones factibles) para

cada iteración, se evalúan todas las columnas respecto a su costo reducido, para determinar cuál debe adicionarse a la base. El problema de encontrar la columna con el mayor costo reducido es en sí mismo un conjunto de problemas de optimización.

Los autores utilizaron 4 sets de problemas con 90 instancias cada uno. Las instancias incluyen clientes randomizados, clusterizados y random-clúster. Cada instancia contiene de 25 a 50 clientes. Se evidencia mejores resultados para los clientes randomizados, mejorando la función objetivo del costo en un 4,1% frente a estudios anteriores

Wen & Eglese (2014) utilizan la heurística LANTIME que soluciona el VRPTW con múltiples rutas y tiene en cuenta variables y restricciones relacionadas con la velocidad de los vehículos. Para dicha heurística, se crea una solución inicial usando inserciones paralelas que hacen que todas las restricciones se cumplan y que las rutas sean factibles en términos de costo. Posteriormente la solución inicial es mejorada a través de la metaheurística de Búsqueda Tabú.

En el algoritmo LANTIME se usan cuatro posibles movimientos u operaciones: estrategias de inserción o eliminación de nodos, cruzada en x, barrido y cambio de nodos. El algoritmo selecciona de manera aleatoria qué vecindad de soluciones y clientes explorar y en qué etapas de la iteración realizar la operación. Igualmente la heurística encuentra las rutas de bajo costo valorando si los vehículos deben ingresar a zonas de alto tráfico o por el contrario deben evitarlas, para cumplir con las demandas del cliente.

Para evaluar la eficacia del modelo, el algoritmo se iteró 10 veces y los resultados fueron en promedio los siguientes: 482 libras esterlinas el costo de la mejor ruta, incluido la penalización por ingreso a zonas de alto tránsito, 570 km, 16 viajes y

794 kg de CO₂. Al compararse los resultados con información de distribución real, se evidencia minimización en el costo y disminución de las emisiones de CO₂.

Huang & Lin (2015) resuelven la variante con ventanas de tiempo a través de dos fases: la primera consiste en la planeación de la cobertura del servicio y la segunda corresponde a la búsqueda de rutas factibles que permitan cumplir con la cobertura del servicio. El problema es resuelto a través de la metaheurística de Colonia de Hormigas.

Se analizó un set de problemas con datos reales de la empresa de servicios. Los mejores resultados demostraron que se deben programar rutas en promedio con 5 vehículos con una distancia promedio de 101,36 km recorridos. El algoritmo es eficaz al determinar las necesidades de cobertura del servicio, los puntos de recolección y las rutas que se deben recorrer.

Hoang & Louati (2016) utilizan una heurística llamada AHP o proceso analítico jerárquico, que es una técnica estructurada para tratar con decisiones complejas. En vez de prescribir la decisión “correcta”, el AHP ayuda a los tomadores de decisiones a encontrar la solución que mejor se ajusta a sus necesidades y a su comprensión del problema. Utilizando la heurística propuesta se mejoran las distancias de viaje a 2471 kilómetros recorridos y 5.4 horas.

Se utilizan datos reales de la empresa transportadora para probar la eficacia y desempeño del algoritmo propuesto. Las mejores distancias de viaje programadas por la empresa en condiciones normales corresponden a 2958 km recorridos y un tiempo de operación de 6,3 horas. La capacidad de los vehículos se optimiza en un 10,3%.

Para resolver las instancias con datos reales, los investigadores proponen una heurística de búsqueda de múltiples vecindades que evalúa que las rutas cumplan con los tiempos de servicio asignados, posteriormente para las rutas factibles, el

algoritmo inicia la construcción de soluciones iniciales haciendo una búsqueda y configuración de múltiples vecindades, es decir, el algoritmo organiza los clientes en clústeres.

Finalmente, Markov, Varone & Bierlaire (2015) proponen una heurística de búsqueda de múltiples vecindades para resolver las instancias con datos reales, que evalúa que las rutas cumplan con los tiempos de servicio asignados.

El algoritmo inicia la construcción de soluciones iniciales haciendo una búsqueda y configuración de múltiples vecindades, es decir, el algoritmo organiza los clientes en clústeres. Cada grupo de problemas se evaluó tomando como base las instancias de Solomon (1987) que ubica los clientes de manera randomizada, clusterizada y random-clúster. Todos los grupos de instancias poseen tanto largos horizontes como cortos horizontes de programación en sus ventanas de tiempo.

Al correr todas las instancias, se obtienen rutas factibles y se mejoran el 4,3% de las rutas programadas en términos de costos de rutas. Para evaluar la utilización de los vehículos, se utilizaron 20 instancias de problemas y se logra mejorar la capacidad en un 1,73%. Las anteriores mejoras representan aproximadamente un ahorro de 300000 dólares anuales en datos estimados y proyectados para el problema de distribución en cuestión.

5.3.2 Características Empresariales

A continuación se analizan algunas características empresariales tenidas en cuenta por los autores, para modelar y resolver el Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo – VRPTW.

Boonkleaw, Suthikarnnarunai & Srinon (2010) estudian un modelo de distribución para una empresa de periódicos utilizando la variante VRPTW. El estudio fue motivado por la crisis que sufre actualmente el sector y que está relacionada con

la considerable disminución del consumo de periódicos impresos, que ha llevado a menores ingresos por publicidad, ya que las empresas prefieren publicitar en medios electrónicos, internet, redes sociales y demás. Además, el costo de distribución en la industria del periódico es un gasto importante para las empresas, ya que representa aproximadamente el 23% del costo total de operación.

Basados en la demanda de los clientes, la distribución de periódicos se divide en dos categorías: periódicos por suscripción y sin suscripción. Para la distribución de periódicos sin suscripción, el cálculo de demanda es probabilística, lo que implica estimar la cantidad de periódicos que se imprimirán y distribuirán. El segmento de los periódicos sin suscripción presenta otro inconveniente, y es el relacionado con la recolección de aquellas unidades que no se venden, lo que implica costos adicionales para la empresa.

En promedio un 50% de las copias distribuidas se devuelven a las bodegas. Para los periódicos con suscripción, las demandas son determinísticas, sin embargo el tiempo de distribución juega un papel importante para poder cumplir con las ventanas de tiempo que impone cada cliente.

Se tuvo en cuenta la variación del VRP con ventanas de tiempo, ya que se requiere minimizar el tiempo y costo total de las rutas de distribución, asumiendo que los clientes ponen una ventana o periodo de tiempo en que debe llegar el periódico a su destino, antes de que salgan de sus casas.

La distribución de periódicos tiene una característica particular, distinguiéndose de otras operaciones de distribución, ya que los periódicos no se deben producir por adelantado para generar inventario. Para la elaboración del modelo se consideró solamente el problema de distribución de periódicos entre un centro de distribución principal y distribuidores intermediarios. El modelo estudiado aplica para empresas de tamaño pequeño y mediano.

Se identificó en el estudio que la ventaja competitiva en dicha industria se puede lograr concentrando todos los recursos disponibles en una sola estrategia donde se disminuya el tiempo total de recorrido, que es el que absorbe la mayor parte de los costos directos. Buscar ventajas competitivas en términos de disminución de costos, hará más eficiente el proceso de distribución y más atractivo el negocio para clientes potenciales o suscriptores.

García & Gómez (2013) estudian el problema de la distribución de productos en la industria minorista de comestibles asociados con el comercio electrónico. El problema tiene tres componentes que hacen que la minimización de la función objetivo en términos de costos totales sea difícil:

- Definir si los pedidos deben hacerse en las tiendas más cercanas a los clientes o en bodegas centrales.
- Definir el nivel de automatización para los procesos de picking en los almacenes.
- El cumplimiento de los tiempos exigidos por los clientes, que está relacionado con la calidad del servicio en este tipo de negocios.

De acuerdo con los autores, algunas empresas del sector han perdido competitividad, debido principalmente a las altas inversiones hechas en los almacenes centralizados y no en los modelos de distribución. El uso de internet y el crecimiento del comercio electrónico en los hogares, han impulsado la necesidad de redefinir los modelos de negocio y la gestión de cadenas de abastecimiento en un sector cuyos costos se elevan un 10% cada año.

Comparado con el sector minorista de comestibles tradicional, el sector minorista de Internet (e - grocery) requiere nuevos modelos de cadena de suministro para ser rentable. El modelo de cadena de suministro apropiado para optimizar todas

las variables involucradas en el negocio de las ventas por internet aún no ha sido estructurado.

Dong, Tang, Keung & Kong (2009), estudian el problema de ruteo de vehículos que surge en las compañías de venta de tiquetes aéreos que tienen incorporado el servicio de recogida y entrega gratuita de pasajeros al aeropuerto. De acuerdo con dichos autores, el éxito de un proveedor de servicios de transporte depende de muchos factores, tales como los costos operativos y la calidad del servicio. Dentro del sector de transporte de pasajeros, la calidad del servicio se mide en llegadas a tiempo para hacer check – in.

El modelo planteado contiene las siguientes restricciones o consideraciones:

- Todos los vehículos pasarían por un punto en común, el aeropuerto.
- El tiempo de los pasajeros se mide en el tiempo en el que el vehículo transporta los clientes al aeropuerto.
- La capacidad del vehículo es pequeña.
- El tiempo en que deben llegar los pasajeros al aeropuerto es exacto, ya que ellos no aceptan llegar ni muy temprano y por supuesto no muy tarde.
- Solo hay un aeropuerto.
- La función de satisfacción aplica para los pasajeros que son transportados en un mismo recorrido.
- Los tiempos en que los pasajeros se suben y bajan a los vehículos no cuentan.
- La distancia de viaje como el tiempo entre dos puntos son simétricos, es decir, 1 unidad de tiempo es equivalente a 1 unidad de distancia.
- La flota de vehículos es ilimitada.
- La función objetivo planteada minimiza el costo de operación total, incluido el costo de arranque y el costo asignado al viaje del vehículo.

El problema está formulado bajo el marco del problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW), con el objetivo de minimizar el costo total de operación. Adicional a la función objetivo relacionada con costos de operación, se introduce a dicha función el cálculo del grado de satisfacción de los pasajeros, medido por las llegadas a tiempo a los aeropuertos.

El modelo fue implementado eficazmente en el servicio de transporte de pasajeros en un aeropuerto de una ciudad importante en China.

Zhenfeng, Yang, Xiaodan & Sheng (2017) estudian un problema de distribución con vehículos eléctricos que nace en parte por las crecientes preocupaciones ambientales y el aumento de polución y gases de efecto invernadero, que han motivado la investigación en modos de transporte sostenible.

Se modela el problema de ruteo VRPTW para encontrar la ruta óptima de viajes para una flota de vehículos eléctricos con capacidad homogénea y con capacidad y tiempo de recarga de batería limitado. La demanda del cliente es conocida, así como la ventana de tiempo en que debe visitarse al cliente. La demanda de un cliente no excede la capacidad de carga de establecida para la flota de vehículos. Si no se cumple el servicio dentro de la ventana de tiempo exigido, se castiga la función objetivo del costo.

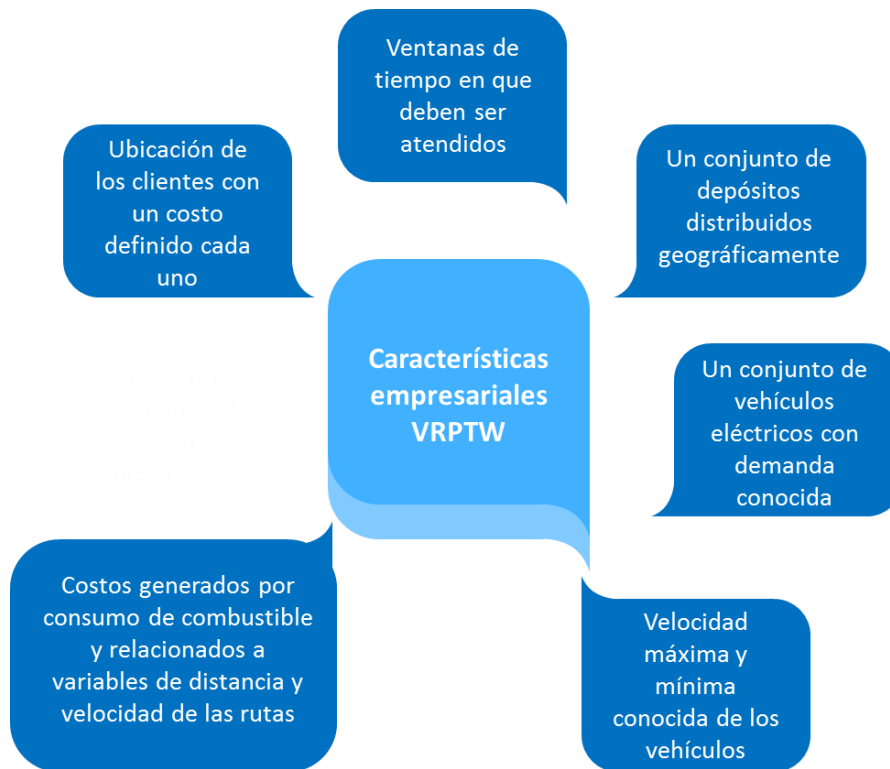
La función objetivo tiene dos partes: la primera es la suma de las variables relacionados con los costos de operar vehículos eléctricos y la segunda parte de la función corresponde a los costos de castigo por incumplir ventanas de tiempo en que se deben servir los clientes. Se tienen en cuenta el costo total de la ruta y el aumento en costo generado por incumplir las ventanas de tiempo establecidas por los clientes.

Los carros eléctricos funcionan con una batería recargable. Además son eficientes energéticamente y menos contaminantes. Sin embargo el uso de carros eléctricos para flotas de transporte se enfrenta a algunos desafíos, tales como la baja densidad eléctrica de las baterías, el número limitado de estaciones eléctricas existentes en grandes ciudades y el tiempo lento de recarga, haciendo del problema de ruteo aún más complejo.

El problema estudiado por Yiko (2010) es un modelo teórico de distribución de carga homogénea desde el depósito principal hasta los clientes con demanda definida. Para la empresa hipotética en el que se aplicó el modelo VRPTW, el costo de combustible es un factor importante para la optimización de los costos totales del servicio.

Las características empresariales tenidas en cuenta para la solución del problema de ruteo son:

Figura 7. Características empresariales - VRPTW



Fuente: Autor

La función bi-objetivo consiste en minimizar el tiempo de recorrido y costo asignado a cada ruta, y como segundo criterio, minimizar el costo relacionado con combustible para las flotas de vehículos disponible.

Figliozzi (2010) estudia un modelo de distribución de mercancía basado en la variante VRP con ventanas de tiempo blandas y duras. De acuerdo con estos autores, se necesitan soluciones de ventana de tiempo blandas cuando el número de rutas necesarias para las ventanas de tiempo duras exceden la cantidad de vehículos disponibles, cuando se requieren intercambios entre el costo y el servicio, o cuando el despachador tiene información cualitativa sobre el servicio y es consciente de aquellos clientes a los que se debe servir en ventanas de tiempo duras.

Las características empresariales tenidas en cuenta por el autor para modelar el problema de distribución fueron: empresa mediana de distribución con vehículos con carga homogénea, clientes con demandas definidas, costo de rutas, ventanas de tiempo blandas y un solo depósito. La función objetivo es minimizar el costo total de la operación de transporte de dicha empresa.

Dabia, Ropke, Woensel & De Kok (2012) tomaron datos teóricos para modelar el proceso de distribución de tal manera que se tuvieran en cuenta variables de tiempo adicionales que representan congestiones. El tiempo de servicio tomado para el modelo se calculó desde la preparación del despacho en los depósitos, hasta la distribución de los artículos donde los clientes, en las ventanas de tiempo que ellos mismos exigían.

Las características empresariales tenidas en cuenta para modelar el problema de distribución fueron: vehículos con carga homogénea, clientes con demandas definidas, costos de rutas, ventanas de tiempo blandas, es decir el servicio debe iniciar y terminar en el tiempo en el que el cliente decida, un solo depósito. La función objetivo es minimizar la duración total de la ruta, haciendo énfasis en la optimización de las actividades de despacho en los depósitos, ya que se pretende evitar la congestión en las vías.

El anterior planteamiento es aplicable a empresas de distribución de mercancías o alimentos, que tienen su operación en grandes ciudades.

Fu, Zhou, Qi & Wu (2016) utilizan la variante VRPTW para modelar actividades de distribución donde se necesita calcular el costo y las distancias de las rutas rápidamente, como es el caso de los servicios de mensajería, ruta de autos de seguridad privada y ambulancias.

Las características empresariales tenidas en cuenta por los autores fueron: empresas con vehículos homogéneos, clientes con demandas conocidas, ventanas de tiempo en las que se deben atender los clientes, costos de las rutas medidos en unidades de distancia y un solo depósito.

Lai, W., Li, R., Xie, L., Qi, M. (2016) investigan un modelo apropiado para optimizar la distribución de materiales de redes eléctricas. En esta investigación se analiza la red de distribución de este tipo de materiales y se utiliza una metaheurística de búsqueda variable de vecindades para resolver el modelo VRPTW.

Las empresas de distribución de energía eléctrica de China afrontan diversos desafíos entre los que se encuentran: la localización dispersa de plantas de distribución a lo largo del territorio, las inversiones del gobierno Chino para fortalecer la distribución de energía a lugares apartados, y la probabilidad de que algún desastre natural dañe las instalaciones y plantas, lo que ha llevado a la empresa de distribución a construir múltiples bodegas de materiales para atender emergencias (Alrededor de 4000 bodegas a lo largo de China).

La investigación de Chen, Hsiao, Reddy, Kumar (2015) estudia un modelo de distribución basado en Cross-Docking, cuya empresa administra múltiples centros de distribución y múltiples productos. Como dicho modelo resulta ser más complejo que los modelos teóricos de distribución tradicionales, se agregan componentes de autoaprendizaje y memoria al algoritmo de enjambre de partículas utilizado por los autores para resolver el VRPTW.

Las operaciones de Cross - Docking permiten transitar materiales con diferentes destinos o consolidar mercancías provenientes de diferentes orígenes que puede variar dependiendo las necesidades del producto. En sentido estricto el Cross-docking se hace sin ningún tipo de almacenaje intermedio.

Evitar las operaciones de almacenamiento permite reducir el plazo necesario a las operaciones logísticas. Este sistema es utilizado especialmente, para productos frescos y perecederos y por grandes distribuidores.

Zhen & Zhang (2006) desarrollan una metaheurística híbrida para resolver el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y múltiples depósitos, teniendo en cuenta las siguientes características empresariales: vehículos con carga homogénea, clientes con demandas definidas, costo de las rutas, múltiples depósitos, ventanas de tiempo donde debe atenderse a los clientes. La función objetivo del modelo es minimizar el costo total de la operación logística.

Según los autores, el costo de distribución de la empresa objeto de estudio representa aproximadamente entre el 5 y el 11% del precio final de los productos. Para este modelo de distribución, se consideraron múltiples depósitos localizados en un área geográfica definida. Este tipo de distribución es aplicable a empresas grandes de logística de transporte de alimentos o mensajería.

Ben, Absi, Feillet, Quillio (2017) utilizaron una heurística para solucionar el VRPTW multígrafo, que consiste en representar la red de rutas como rutas alternativas entre cada par de nodos o clientes. Esta característica representa las actividades de distribución de larga distancia con rutas multimodales donde se considera el intercambio de medios de transporte. Los investigadores observaron que la multimodalidad en los problemas de transporte aumenta significativamente el conjunto de posibles soluciones factibles. Las anteriores características son aplicables a actividades de distribución propias empresas de distribución de mercancías y alimentos con transporte multimodal.

Wen & Eglese (2014) estudian el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo clásico cuya función objetivo es minimizar el costo total de transporte, el

costo de consumo de combustible, el costo del operario del vehículo y costos adicionales por congestiones de las rutas, teniendo en cuenta las siguientes características empresariales: vehículos con carga homogénea, clientes con demandas definidas, costos de rutas medidos en tiempos de desplazamiento, ventanas de tiempo donde deben servirse a los clientes y un solo depósito.

La función objetivo es minimizar el costo total de la operación de transporte, el costo de los operarios de los vehículos, el costo de consumo de combustible y los costos generados por demoras en los transportes.

La variación en la velocidad es causada por la congestión del tráfico, que es mayor durante las horas pico de la mañana y de la tarde. El modelo incluye ventanas de tiempo, penalizaciones por entrar a rutas congestionadas y el nivel de emisiones de CO₂. Las anteriores características corresponden a empresas de distribución de bienes, cuyo nivel de calidad en el servicio está supeditado por las entregas oportunas, además de un enfoque fuerte en el ahorro por costos y combustible.

Huang & Lin (2015) proponen un modelo VRPTW para actividades de recolección de desperdicios domésticos, que consiste básicamente en el recorrido que hacen todos los vehículos por las calles de las ciudades y pueblos en Taiwán. El problema se modela como un VRP con recolecciones punto a punto. Igualmente debido a las altas temperaturas de la zona, las visitas deben programarse al menos 4 veces a la semana. Debido a las ocupaciones de los residentes, los camiones de recolección deben visitar los barrios a diferentes horas del día, particularmente en la noche.

El anterior estudio es similar al realizado por Hoang & Louati (2016), que proponen modelo donde se consideran múltiples estaciones de transferencia, sitios de reunión y vehículos no homogéneos con ventanas de tiempo. El modelo contiene

restricciones relacionadas con flota de vehículos homogénea, estructura de nodos, depósitos, ventanas de tiempo y costo de rutas. Las anteriores características corresponden a una empresa de recolección de residuos sólidos grande que sirve aproximadamente a 130 clientes. La función objetivo del problema es minimizar el costo logístico de transporte minimizando en lo posible el número de paradas que se hacen en los barrios.

Finalmente, dentro de los artículos seleccionados, se encuentra la investigación de Markov, Varone & Bierlaire (2015) que proponen una solución a un problema complejo de recolección de basura, en el cual cada recipiente de basura es recolectado y transportado usando una flota de vehículos heterogénea con múltiples capacidades y pesos. La compañía realiza sus rutas en una ciudad de aproximadamente 450000 habitantes. Se estudia un modelo de recolección de basura con instalaciones intermedias, con una flota de vehículos heterogénea y asignaciones flexibles desde los depósitos de destino. El objetivo de la empresa es minimizar los costos de transporte y maximizar la capacidad de los vehículos.

5.3.3 Brechas y Tendencias detectadas en la revisión bibliográfica

Como se mencionó anteriormente, la variante del problema de ruteo con ventanas de tiempo es una de las más estudiadas en el área de investigación de operaciones de distribución, debido a su aplicabilidad en contextos logísticos reales.

La mayoría de autores consultados coinciden en que para mejorar los resultados obtenidos en sus investigaciones del problema de ruteo con ventanas de tiempo, se debe investigar los siguientes aspectos a futuro:

- Integrar los procesos de producción, sumados a actividades de distribución, para evaluar modelos que permitan optimizar costos en toda la cadena de suministro.

- Desarrollar un análisis de sensibilidad para algoritmos utilizados. Se encontró que optimizando algunos pasos y quitando restricciones al problema, se logra disminuir el costo de la función objetivo de manera significativa.
- Incluir restricciones adicionales para evitar la violación de ventanas de tiempo, agregando una variable a la función objetivo, como la penalización de la función de costo cada vez que se incumple el servicio al cliente.
- Ampliar los modelos de distribución a un sistema de operaciones logísticas multiobjetivo.
- Incluir variables estocásticas que permitan modelar las actividades de distribución, atendiendo las condiciones reales de la gestión logística.
- Utilizar herramientas híbridas de construcción y mejora de rutas, que han demostrado ser eficaces para solucionar el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo.
- Integrar las heurísticas propuestas a los códigos de programación de los softwares planeadores de rutas.
- Incluir variables de satisfacción del servicio, relacionadas con el cumplimiento del servicio dentro de la ventana de tiempo impuesta por el cliente.

En relación a la investigación de García & Gómez (2013) en el que se estudia un modelo de distribución e-commerce, se recomienda la aplicación de nuevos algoritmos bio-inspirados que evalúan múltiples variables relacionadas con la optimización de cadenas de suministro, desde las actividades de preparación de pedidos hasta su distribución.

Igualmente se recomienda la inclusión en la función objetivo de las siguientes variables y restricciones, que permitirán evaluar de manera eficiente el modelo en contextos reales:

Figura 8. Caracterización de variables – Modelo de Distribución e-commerce.



Fuente: Autor

Frente a la investigación de Yiko (2010), en el que se usa la metaheurística de Recocido Simulado para resolver el VRPTW, se recomienda utilizar factores de disminución de temperatura que permitan encontrar soluciones óptimas en tiempos de cómputo cortos (El factor de disminución de temperatura más recomendado es el exponencial), de tal manera que el modelo no solo indique desde qué depósitos y con qué vehículo debería hacerse la entrega, sino también el lugar donde el pedido debe ser preparado.

Para la investigación de Dabia, Ropke, Woensel & De Kok (2012), en el que se utilizaron métodos exactos que no resolvieron todas las instancias del problema planteado, se recomienda resolver problemas de gran escala con algoritmos de

búsqueda y luego refinar las soluciones factibles con metaheurísticas, de tal manera que se puedan solucionar todas las instancias de Solomon (1987) que fueron objeto de estudio.

La investigación de Fu, Zhou, Qi & Wu (2016) demostró que el algoritmo de colonia de hormigas utilizado es eficaz para resolver el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo. Sin embargo, se recomienda la inclusión de algoritmos de búsqueda de soluciones iniciales para hacer más robusta la técnica utilizada y las soluciones converjan más rápidamente.

Se destaca también el uso de artificios matemáticos que hacen que la heurística utilizada por Chen, Hsiao, Reddy, Kumar (2015) aprenda de sus "errores" y mejore cada vez su desempeño en la búsqueda de soluciones factibles.

Ben, Absi, Feillet, Quillio (2017), estudiaron un modelo de distribución multimodal. En dicha investigación no se contempla el uso de restricciones relacionadas con el cambio de un modo de transporte a otro. Por esta razón se recomienda incluir restricciones que permitan calcular los tiempos y los costos que implican el cambio y utilización de diversos modos de transporte.

Wen & Eglese (2014) trabajan el problema de ruteo con ventanas de tiempo cuya flota de transporte entra a zonas de congestión. En dicha investigación, los autores utilizan estrategias llamadas "Exchange" para cambiar los nodos de las rutas y mejorar la función objetivo. Para futuras investigaciones, se recomienda la utilización de estrategias que permitan minimizar el número de vehículos de la flota que entra a zonas de congestión y examinar cómo el cambio en el valor de la tarifa de congestión puede afectar los patrones de tráfico.

Huang & Lin (2015) analizan un esquema de transporte para el servicio de recolección de basura. Para futuras investigaciones relacionadas con dicho

esquema de recolección, se recomienda el uso de variables estocásticas para problemas VRP con dependencia en puntos de recolección. Este problema contempla las características de los vehículos que recorren las rutas, ya que evalúa variables como tamaño y peso de la flota que debe recorrer ciertos destinos.

Para los esquemas de recolección de desperdicios, se recomienda combinar rutas de bloques pequeños con pocos residentes, haciendo uso de instancias e información relacionadas con empresas reales de recolección de desperdicios.

Markov, Varone & Bierlaire (2015) consideran una función de costos generales correspondiente a la estructura de costos de una empresa típica de transporte. Para esta investigación se recomienda la inclusión de restricciones colaterales, tales como períodos obligatorios de interrupción de rutas dependiente del tiempo de inicio del recorrido y múltiples capacidades de vehículos.

Aunque la literatura reciente incorpora cada vez más restricciones asociadas a actividades de transporte reales, la mayoría de los autores todavía proponen métodos altamente adaptados a los problemas que no son aplicables a otras variantes, y en los que los parámetros se manipulan para proporcionar un buen rendimiento para las instancias de referencia.

De acuerdo con la información consultada, el algoritmo propuesto por Wen & Eglese (2014) podría resolver múltiples restricciones del VRPTW aplicado a varias actividades de transporte, debido a que los autores contemplan una función objetivo múltiple, vehículos con cargas homogéneas, costos de utilización de vehículos, costo de rutas, penalizaciones por incumplimiento de ventanas de tiempo y la posibilidad de evaluar múltiples depósitos.

También se observa que los investigadores dan prioridad al rendimiento del transporte en términos de velocidad y costos de ruta, en lugar de los parámetros de tiempo relacionados con las ventanas de tiempo. Lo anterior se refleja en que pocos artículos consultados implementan ventanas de tiempo duras y agregan a la función objetivo un costo de penalización por incumplimiento de las ventanas de tiempo impuestas por los clientes.

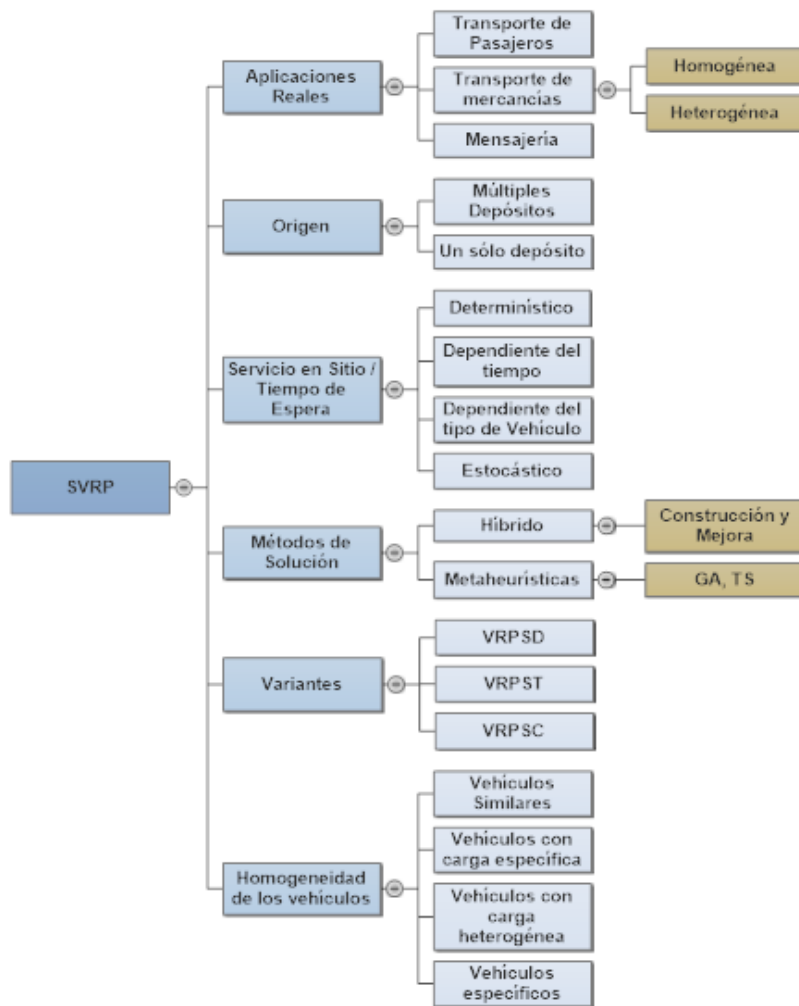
5.4 ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON VARIABLES ESTOCÁSTICAS

El Problema de Ruteo de Vehículos con variables estocásticas (SVRP) es una extensión del problema clásico VRP, pero con variables que están sujetas a probabilidades de ocurrencia o elementos aleatorios (Dror et al., 1993). Debido a la naturaleza aleatoria de sus variables, los SVRP son generalmente más difíciles de resolver que los problemas clásicos de ruteo, debido a que las variables no son conocidas previamente y están sujetas a alguna función de probabilidad o aleatoriedad.

Existen tres clases de problemas con variables estocásticas, a saber: clientes estocásticos, demandas estocásticas y problemas con tiempos estocásticos.

Con base en la literatura revisada, se propone un marco taxonómico para el problema de ruteo con variables estocásticas, con el objetivo de comprender sus principales componentes y características.

Figura 9. Marco Taxonómico propuesto para el SVRP



Fuente: Autor

Se resaltan las siguientes características del problema de ruteo de vehículos con variables estocásticas: aplicabilidad en actividades reales de transporte: transporte de pasajeros (Xu & Tang, 2014), transporte de mercancía (Ferrucci, Bock & Gendreau, 2013), (Calvet, Pagès-Bernaus, Travesset-Baro & Juan, 2016) y mensajería (Jiang, Bong, Gee Amalraj & Chen, 2014); origen de los bienes o productos a transportar: múltiples depósitos (Jiang, Bong, Gee Amalraj & Chen, 2014) o un solo depósito (Ferrucci, Bock & Gendreau, 2013); homogeneidad de los vehículos: vehículos homogéneos, con carga específica (Ferrucci, Bock &

Gendreau, 2013), vehículos con carga heterogénea y vehículos específicos de acuerdo con el servicio que se presta (Xu & Tang, 2014).

Como se mencionó en el marco teórico, existen tres clases de variantes del problema que son dependientes de una función de probabilidad, de acuerdo con la función objetivo que se pretenda mejorar, a saber:

- Clientes estocásticos: el cliente i está presente con probabilidad p_i y ausente con probabilidad $1 - p_i$. (Xu & Tang, 2014).
- Demandas estocásticas (**VRPSD**): asociado con problemas de pickup o recogida de elementos, donde la variable de demanda del cliente i es una demanda aleatoria que afecta directamente la capacidad del vehículo Q y por ende la prestación del servicio a clientes cuando la capacidad $d_i \geq Q$. (Calvet, Pagès-Bernaus, Travesset-Baro & Juan, 2016).
- Tiempos estocásticos (**VRPSTT**): el tiempo del servicio y los tiempos de viaje son variables aleatorias. Generalmente los problemas con tiempos estocásticos aplican para operaciones de entrega de mensajería o productos en grandes ciudades, donde los tiempos de viaje son difíciles de calcular con exactitud. (Ferrucci, Bock & Gendreau, 2013).

5.4.1 Eficacia de los modelos utilizados para la solución del SVRP

De acuerdo con la información seleccionada sobre el SVRP los autores utilizan dos clases de estrategias para solucionar el problema de ruteo. Los métodos de solución encontrados se relacionan en la tabla 11.

Tabla 11. Métodos de solución de la variante SVRP

Autores	Metaheurísticas		Métodos Híbridos	
	GA	TS	BL y SM	BL y M
Ferrucci, Bock & Gendreau (2013)		X		
Xu & Tang (2014)				X
Jiang, Bong, Gee Amalraj & Chen (2014)	X			
Calvet, Pagès-Bernaus, Travesset-Baro & Juan (2016)			X	

Convenciones:

GA: Algoritmo Genético

TS: Búsqueda Tabú

BL: Búsqueda Local

SM: Simulación Montecarlo

M: Mejora

Fuente: Autor.

Xu & Tang (2014) proponen un modelo multiobjetivo con restricciones, donde se coordinan rutas de vehículos para prestar el servicio de transporte de pasajeros hacia los aeropuertos. La flota se divide en vehículos básicos y vehículos de coordinación. Para resolver el problema, los autores utilizan un algoritmo híbrido compuesto por una heurística de búsqueda local, para la construcción inicial de rutas, y un algoritmo básico de mejora de rutas basado en el intercambio de nodos. El algoritmo híbrido propuesto resulta ser eficaz para resolver el problema con clientes estocásticos, es decir, con probabilidad de que tomen o no tomen el servicio hacia los aeropuertos, además permite rutear tanto los vehículos básicos como los vehículos de coordinación.

Jiang, Bong, Gee Amalraj & Chen (2014) resuelven un SVRP multiobjetivo, basado en la descomposición del problema en sub-problemas. Dichos sub-problemas se resuelven simultáneamente durante el proceso de iteración del modelo. Para ellos, los autores utilizaron la metaheurística “Algoritmo Genético”.

Cada generación o iteración resulta en la mejor solución encontrada hasta el momento para cada sub-problema. La relación de vecindad entre estos sub-problemas se define de acuerdo con las distancias entre su “coeficiente de agregación de vectores”. El coeficiente calculado permite seleccionar la mejor solución entre los sub-problemas. Los resultados de la simulación mostraron que el Algoritmo Genético es eficiente para mejorar el rendimiento de problemas con múltiples objetivos y variables estocásticas.

Ferrucci, Bock & Gendreau (2013) utilizaron el método de búsqueda tabú, con el fin de orientar a los vehículos hacia posibles clientes que tienen cierta probabilidad de solicitar servicios.

La búsqueda tabú aumenta el rendimiento del método de búsqueda local mediante el uso de estructuras de memoria: una vez que una potencial solución es determinada, se la marca como "tabú" de modo que el algoritmo no vuelva a visitar esa posible solución. La metaheurística resolvió todas las instancias del problema y se mejoraron el 15% de las instancias frente a otras investigaciones relacionadas.

Por su parte, Calvet, Pagès-Bernaus, Travesset-Baro & Juan (2016) desarrollaron una heurística basada en métodos de aproximación sucesivos que emplea una metaheurística de búsqueda local y simulación Montecarlo. La metaheurística de búsqueda local es basada en la construcción de una secuencia de soluciones óptimas locales que son mejoradas de manera iterativa. La simulación arrojó buenas soluciones frente a estudios de referencia. Se logró disminuir el costo de la ruta promedio en un 4,28%.

5.4.2 Características Empresariales

Para modelar el problema de ruteo de vehículos con variables estocásticas, los autores consultados tuvieron en cuenta las siguientes características empresariales:

El costo de las rutas del problema estudiado por Xu & Tang (2014) es un elemento crítico para las compañías que prestan el servicio de transporte de pasajeros en los aeropuertos, debido a que las ineficiencias en el proceso se deben trasladar al valor final de los tiquetes.

Generalmente, si las compañías de venta de tiquetes no consideran la coordinación del vehículo cuando organizan rutas para sus clientes, se necesitarían más vehículos y más viajes de recogida y entrega que podrían llegar a ser innecesarios para el servicio.

Con el fin de alcanzar el costo mínimo y el mayor grado de satisfacción de los clientes, se utilizan la variante SVRP teniendo en cuenta el número de viajes y la hora de cada viaje, asignando a cada cliente una probabilidad relacionada con la solicitud o no del servicio. También se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones para modelar la actividad de transporte:

- Solo hay un depósito y un aeropuerto.
- Los clientes se consideran con los mismos requisitos de tiempo de abordaje.
- El número de clientes para cada punto de recogida debe ser menor igual a la capacidad de los vehículos asignados.
- Cada vehículo recorre una ruta desde y hacia el depósito.
- La flota de vehículos es homogénea.
- La cantidad de vehículos es ilimitada.

- El tiempo de transferencia del cliente, se ignora en el proceso de coordinación de la flota de vehículos.
- Se debe medir el nivel de satisfacción del cliente, teniendo en cuenta la eficiencia del servicio.

Jiang, Bong, Gee Amalraj & Chen (2014) proponen un algoritmo evolutivo multiobjetivo basado en la descomposición para hacer frente al VRPSD. El algoritmo propuesto utiliza la mutación combinada con el método de selección basado en la descomposición para mejorar el rendimiento del algoritmo.

El VRPSD está sujeto a las limitaciones de disponibilidad de ventanas de tiempo y capacidad del vehículo. Para ello es importante conocer de antemano datos relacionados con la identificación del cliente, la ubicación geográfica y la hora posible del servicio. La demanda del cliente solo se satisface cuando el vehículo llega al cliente en la ventana de tiempo que se exige para prestar el servicio, además se asume que todos los clientes son enrutados y cada cliente solo puede ser servido en un vehículo, sin embargo un vehículo puede servir el mismo cliente más de una vez.

Se espera que cada vehículo termine la ruta asignada dentro de la ventana de tiempo disponible. Una violación a las ventanas de tiempo se refleja en una remuneración de horas extras del conductor, utilizadas para penalizar rutas excesivamente largas que pueden no ser factibles en la implementación del modelo para contextos reales. La capacidad de los vehículos es fija. Esta política se implementa para permitir el regreso del vehículo al depósito para reabastecimiento.

Ferrucci, Bock & Gendreau (2013) proponen un nuevo enfoque proactivo para el control en tiempo real de problemas dinámicos o estocásticos de ruteo de

vehículos, en el que la entrega de bienes urgentes es de suma importancia; teniendo en cuenta las siguientes características del servicio:

- Vehículos con carga homogénea.
- Clientes con demandas estocásticas relacionadas con probabilidades del servicio.
- Costo de rutas dependientes de los tiempos de recorrido estocásticos.
- Depósito con oferta conocida.
- Tiempos de recorrido estocásticos.

La función objetivo es minimizar el costo de las rutas, además se incluye una variable adicional que castiga la función objetivo si se incumplen los servicios que son urgentes.

Se tomaron en cuenta variables estocásticas para programar el ruteo de las flotas, teniendo en cuenta la urgencia de distribuir bienes para clientes con los que se conoce cierta probabilidad de solicitar el servicio. Dicho modelamiento es aplicable a actividades de distribución de empresas cuyos clientes reservan con anterioridad el servicio, tales como empresas de mensajería, correo o distribución de alimentos.

Calvet, Pagès-Bernaus, Travesset-Baro & Juan (2016) definen un problema de ruteo con variables estocásticas e instancias aplicadas a actividades de distribución reales, teniendo en cuenta las siguientes características empresariales:

- Flota de vehículos heterogénea. Las cargas heterogéneas se contemplan para servir a diferentes clientes con necesidades específicas.
- Diferentes clases de vehículos.

- Costos asimétricos de ruta, es decir los costos de ida y venida son variables.
- Demandas estocásticas
- Un solo depósito
- La función objetivo es minimizar el costo total de distribución.

El VRPSD con cargas heterogéneas es eficaz para modelar actividades de distribución de combustible, utilizando algoritmos de búsqueda local.

5.4.3 Brechas y Tendencias detectadas en la revisión bibliográfica

El VRP estocástico (SVRP) es básicamente cualquier VRP donde uno o más parámetros son estocásticos, lo que significa que algunos eventos futuros son variables aleatorias con una distribución de probabilidad conocida.

La mayoría de la literatura encontrada, se inclina fuertemente hacia el desarrollo de modelos deterministas (modelos no sujetos a funciones de probabilidad). En la práctica, sin embargo, el número, la demanda y la ubicación de los clientes, así como los tiempos de viaje de los vehículos pueden no conocerse a priori y, en consecuencia, deben tratarse como variables aleatorias o sujetas a alguna función de probabilidad.

De acuerdo con lo anterior, los estudios futuros sobre el SVRP deberían considerar las dimensiones probabilísticas de los patrones de demanda de los clientes y las variaciones en los tiempos de viaje de los vehículos.

En casi todas las aplicaciones del mundo real, la incertidumbre es una característica inherente del problema. Por lo general, la información sobre cómo se comportan los eventos de transporte está disponible a través de datos

históricos, que se pueden convertir en modelos de información, donde las decisiones se toman después de que hayan ocurrido algunos eventos aleatorios.

Por ejemplo, para los problemas con demanda estocástica se identificó que con mucha frecuencia, el tamaño de la demanda se conoce de antemano (es decir, es determinista). Sin embargo se producen demandas desconocidas en el VRP cuando la información relacionada con el servicio que se presta, se revela en tiempo real. Por esta razón, para el estudio futuro del VRP con demandas desconocidas, se sugiere el desarrollo de algoritmos que permitan la introducción de stocks de seguridad como una reserva en caso de que las demandas crezcan más de lo planeado.

En relación a las heurísticas utilizadas por Calvet, Pagès-Bernaus, Travasset-Baro & Juan (2016) y Xu & Tang (2014), se recomienda reforzar los algoritmos de búsqueda local con un algoritmo de mejora de rutas, o una metaheurística más robusta que permita al problema “saltar” de óptimos locales, a óptimos globales.

5.5 ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON CAPACIDAD

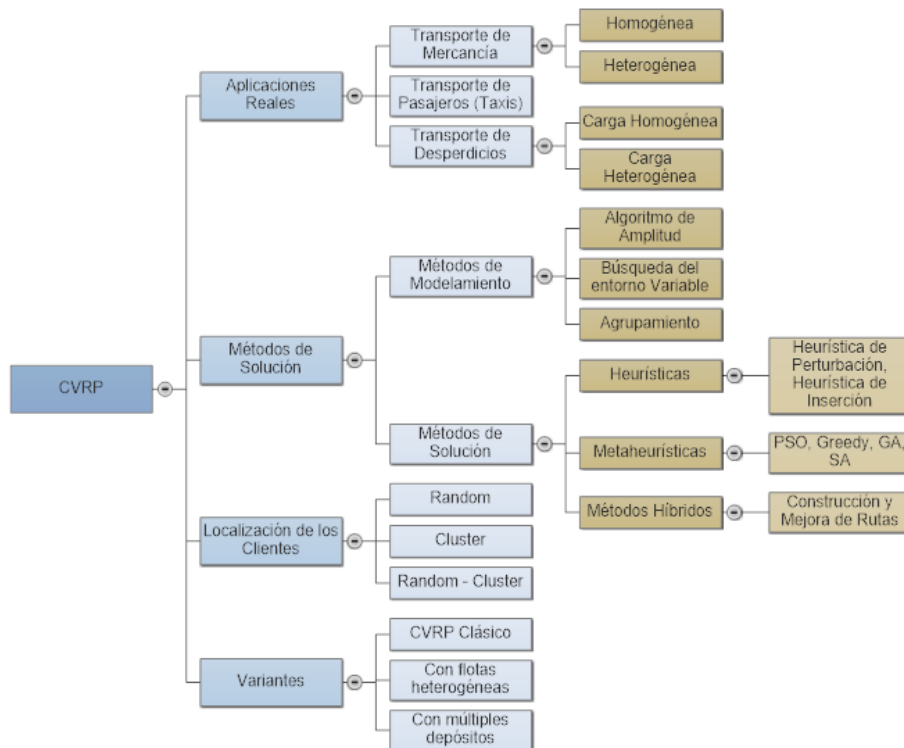
El problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad es una extensión del problema clásico del agente viajero, donde la restricción de capacidad de los vehículos es la restricción más importante. Como se describió en el aparte 2.2.4 del presente documento, el VRP o CVPR es el servicio prestado por una flota limitada de vehículos que parte de uno o más almacenes, depósitos o bodegas, a unos clientes finales distribuidos geográficamente.

De acuerdo con Toth & Vigo (2002) los vehículos transitan por una red de rutas representada por arcos o grafos que tienen asociadas restricciones de costo tiempo o distancia. Cada vehículo tiene una capacidad determinada y cada cliente

tiene asociada cierta de demanda. Los vehículos deben llegar a los depósitos una vez hayan servido a todos los clientes.

El CVRP es el problema clásico de ruteo de vehículos y uno de los más estudiados en la literatura especializada. Para entender sus principales características, se propone el marco taxonómico de la Figura 10.

Figura 10. Marco Taxonómico propuesto para el CVRP



Fuente: Autor

De acuerdo con el marco taxonómico propuesto, el problema de ruteo de vehículos con capacidad se puede clasificar de acuerdo con las siguientes características:

- Aplicación de la variante en contextos de transporte reales: transporte de mercancía, transporte de pasajeros, y transporte de desperdicios con carga homogénea y heterogénea.
- Localización de los clientes: ubicación random o al azar, clúster, y random-clúster.

5.5.1 Eficacia de los modelos utilizados para la solución del CVRP

En relación a los métodos de solución, los investigadores han utilizado estrategias variadas que van desde los métodos heurísticos de construcción de rutas iniciales, hasta métodos híbridos y metaheurísticas. La tabla 12 relaciona los métodos de solución utilizados en la literatura analizada, para resolver el problema de ruteo de vehículos con capacidad.

Tabla 12. Métodos de solución de la variante CVRP

Autores	Metaheurísticas				Métodos Híbridos			Heurísticas		
	PS O	VN S	G A	S A	MI y HP	BL y GA	B LI y AG	B A	I n	B L
Das & Borthakur (2006)								X		
Toffoloa, Christiaens, Malderena, Wauters, Berghe (2017)										X
Garaix, Artigues, Feillet & Josselin (2010)										X
Mir, Hassani & Abolghasemi (2011)	X									
Chen, Huang & Dong (2010)		X								
H. C. W. Lau, T. M. Chan, W. T. Tsui, & W. K. Pang (2010)			X							
Oliveira, Mauceri, Carroll Pallonetto (2017)			X							
Poonthalir & Nadarajan (2017)	X									
Son (2014)	X									
Wei, Zhang, Zhang & Leung (2017)				X						
Talarico, Sörensen & Springael (2015)					X					
Coelho, Grasas, Ramalhinho, Coelho, Souza & Cruz (2016)								X		
Bae, Hwang, Cho & Goan (2007)							X			

Convenciones:

GA: Algoritmo Genético
SA: Recocido Simulado
PSO: Algoritmo por Enjambre de Partículas
VNS: Búsqueda de Entorno Variable
MI: Metaheurística Iterativa
HP: Heurística de Perturbación
BL: Búsqueda Local
BLI: Búsqueda Local Iterada
In: Inserción
AG: Algoritmo Greedy
BA: Búsqueda de Amplitud

Fuente: Autor

Mir, Hassani & Abolghasemi (2011) utilizan el método de optimización de enjambre de partículas o PSO para solucionar el CVRP. Esta metaheurística evoca el comportamiento de las partículas en la naturaleza, a partir de una población de soluciones candidatas, denotadas como "partículas", moviendo éstas por todo el espacio de búsqueda según reglas matemáticas que tienen en cuenta la posición y la velocidad de las partículas, hasta que la nube de partículas o soluciones factibles del problema converja rápidamente a mejores resultados de la función objetivo. A través de esta estrategia, se mejoraron resultados en un 80% de las instancias corridas.

Por su parte, Das & Borthakur (2006) un algoritmo de búsqueda de amplitud que ordena los vértices de una ruta, de acuerdo con algunas restricciones, así:

- Iniciar una cola de vértices, con el vértice de inicio del gráfico como el único elemento de la cola.
- Mientras la cola no está vacía, eliminar un vértice de la cola y agregar a la cola todos los demás vértices a los que se puede acceder mediante un borde, desde que no se haya agregado anteriormente en pasos anteriores.

- Crear tantas rutas sean necesarias hasta cumplir con las restricciones impuestas en el modelo.

La anterior estrategia de solución, basada en inserción de nodos, es eficiente para solucionar el problema de vehículos con capacidad para pocos clientes.

Chen, Huang & Dong (2010) utilizaron una metaheurística de búsqueda de entorno variable o (VNS) para solucionar el problema de ruteo de vehículos con capacidad, utilizando un set de 34 problemas. La metaheurística utilizada está basada en tres hechos simples:

- Un mínimo local con una estructura de entornos no lo es necesariamente con otra.
- Un mínimo global es mínimo local con todas las posibles estructuras de entornos.
- Para muchos problemas, los mínimos locales con la misma o distinta estructura de entornos están relativamente cerca.

Una ventaja de esta metaheurística es que permite obtener buenas soluciones, no necesariamente próximas al óptimo, en un tiempo razonable. Además los autores incluyeron una variable adicional al modelo que permitió al algoritmo escapar de óptimos locales. Esta variable hacía que una vez formadas las rutas, el algoritmo buscara posibles clientes cercanos para reemplazar alguno ruteado previamente. La estrategia anteriormente mencionada permitió mejorar el costo de rutas un 4% en promedio, frente a la utilización de algoritmos similares.

H. C. W. Lau, T. M. Chan, W. T. Tsui, & W. K. Pang (2010) y Oliveira, Mauceri, Carroll Pallonetto (2017) utilizaron la metaheurística “Algoritmo Genético” basado en las siguientes características:

- Inicialización: se genera aleatoriamente la población inicial, que está constituida por un conjunto de cromosomas los cuales representan las posibles soluciones del problema.
- Evaluación: a cada uno de los cromosomas de esta población se aplica una función de aptitud, para conocer si la solución es buena.
- Generación: la metaheurística se detiene hasta cumplir con las restricciones impuestas. Debido a que la solución óptima se desconoce, los autores corrieron un número máximo de iteraciones hasta que no identificaron cambios en la población.

Además se agregaron variables difusas que tienen las siguientes características y que hacen que el modelo se acerque a la realidad de la distribución: los valores exactos de las demandas medias, los tiempos de viaje, la cantidad y la ubicación de los clientes.

H. C. W. Lau, T. M. Chan, W. T. Tsui, & W. K. Pang (2010) evaluaron 33 sets de problemas y compararon los resultados con investigaciones similares donde se usaban metaheurísticas como la búsqueda tabú, algoritmo de colonia de hormigas y recocido simulado. El modelo se corrió 50 veces y se mejoraron las funciones objetivos en 22 de los 33 sets de problemas.

Oliveira, Mauceri, Carroll Pallonetto (2017) consideraron datos reales de flotas de vehículos que recorren distancias en el Reino Unido. Para modelar el sistema de distribución, analizaron un set de problemas con 50 clientes o nodos. El algoritmo se corrió 30 veces, resultando mejoras de las distancias recorridas y las emisiones de CO₂ en un 82% de las rutas factibles, demostrando que el Algoritmo Genético es eficiente para resolver este tipo de modelos y restricciones.

Talarico, Sörensen & Springael (2015) describen, implementan y prueban una metaheurística iterativa para resolver el CVRP. Los autores propusieron una

formulación matemática min-max para analizar la similitud entre las soluciones del Problema VRP. En la heurística propuesta, se define un índice para medir las similitudes entre las soluciones de VRP en función de los bordes compartidos entre pares de soluciones alternativas.

El algoritmo genera secuencialmente k soluciones alternativas, formando juntos una solución para el CVRP. Al final de cada iteración, la solución actual se compara con la mejor solución encontrada hasta ahora. Esta comparación se hace evaluando los costos de las soluciones encontradas.

También se utiliza una heurística de perturbación dentro del algoritmo propuesto como mecanismo de diversificación para escapar del óptimo local. Durante la perturbación se utiliza un operador especial que hace que se destruya y repare la ruta. Los autores utilizaron 5 sets de problemas y se corrieron 15 veces. Utilizando el índice de comparación se obtuvo un conjunto de rutas factibles para el 80% de las instancias analizadas.

Toffoloa, Christiaens, Malderena, Wauters, Berghe (2017) proponen un enfoque heurístico de búsqueda local estocástica para el CVRP. Inicialmente, se crea rápidamente una solución factible. Luego se aplican diferentes estrategias de intensificación y diversificación para mejorar la solución.

Estas estrategias incluyen un esquema de optimización de sub-problemas y diferentes estructuras de vecindario, ambas integradas en una metaheurística. Luego se introduce un procedimiento de pre-procesamiento que reduce el espacio de la solución y, por lo tanto, aumenta drásticamente la eficiencia de la heurística.

Se utilizaron 60 instancias del problema de ruteo de vehículos con capacidad y se mejoraron 20 respuestas frente a soluciones encontradas en la literatura. La brecha máxima entre dos soluciones obtenidas por el algoritmo fue del 1.5%. La

brecha promedio con la mejor solución al considerar todas las soluciones para las 20 utilizadas instancias es solo de 0.33%.

Bae, Hwang, Cho & Goan (2007) utilizaron un método de optimización para el CVRP con múltiples depósitos, basado en un enfoque de tres pasos:

- Agrupamiento para convertir el problema del centro de suministro múltiple a problemas de centro de suministro únicos que son más fáciles de resolver.
- Enrutamiento mejorado del vehículo y,
- Solución del problema teniendo en cuenta las restricciones impuestas.

Los autores también desarrollan e introducen un modelo gráfico con programación orientada a objetos, para analizar el desempeño del algoritmo.

El agrupamiento de centros de suministro se realiza atendiendo las siguientes reglas:

- Calcular las distancias entre cada centro de suministro y los clientes.
- Ordenar las distancias de viaje desde cada centro de suministro a los clientes en orden ascendente para cada centro de suministro.
- Asignar los clientes de mayor orden a cada centro de suministro y luego repetir para todos los centros de suministro.
- Si todos los clientes son revisados y no hay clientes superpuestos asignados a más de un centro de suministros, entonces se detiene el procedimiento de agrupamiento. Si hay clientes superpuestos que están asignados a más de un centro de suministros, estos se asignan a los centros de suministro más cercanos.

Se utilizó un set de problemas con 100 clientes, encontrándose mejoras para el 90% de las rutas en 1000 iteraciones, frente a los mejores resultados encontrados en la literatura.

Garaix, Artigues, Feillet & Josselin (2010) utilizan una heurística de inserción de rutas en cuatro pasos que se describen a continuación:

- El primer paso es un procedimiento de inserción que tiene como objetivo construir secuencias de vehículos que satisfagan todas las solicitudes.
- Se utiliza un método de descenso, basado en remociones e inserciones en el segundo paso para mejorar el conjunto de secuencias.
- En el tercer paso, se llama el procedimiento de inserción nuevamente con una orden de solicitud diferente basada en los costos marginales.
- El método de descenso del Paso 2 se usa una vez más en el cuarto paso para la solución obtenida en el Paso 3.

Los resultados muestran que el método de optimización utilizado arroja soluciones factibles al modelo. Se obtiene menores costos para las instancias de clientes clusterizados. Usando el método multigrafo, se evidencia una disminución de costo del 10% frente a datos reales.

Poonthalir & Nadarajan (2017) estudian el CVRP con restricciones adicionales de velocidad de los vehículos y emisión de gases CO₂. Para calcular la velocidad se utiliza una distribución triangular. Dicha distribución de variabilidad en la velocidad es la probabilidad de que un vehículo, en un determinado momento, recorra las rutas factibles con una velocidad V .

Los autores utilizan una metaheurística de enjambre de partículas. Los experimentos se corrieron bajo condiciones de velocidad variable y velocidad constante, como variables para determinar el consumo de combustible en la flota

de vehículos. El PSO asume pocas o ninguna hipótesis sobre el problema a optimizar y puede aplicarse en grandes espacios de soluciones candidatas. Sin embargo, como toda metaheurística, PSO no garantiza la obtención de una solución óptima en todos los casos.

Los experimentos se corrieron bajo condiciones de velocidad variable y velocidad constante, como variables para determinar el consumo de combustible en la flota de vehículos.

Se utilizó un set de 10 problemas con 20 clientes. Cada vehículo tiene un tiempo máximo de recorrido de 11 horas y recorre una velocidad promedio de 40 millas por hora. La capacidad de los tanques de combustible de los vehículos es de 60 galones. De las instancias analizadas, se mejoraron 7 resultados de consumo de combustible y velocidad de los vehículos, frente a resultados de otras investigaciones. Cuando se utilizaron velocidades constantes, se evidenciaron costos de rutas menores. Para velocidades variables, se recorrían claramente más distancias para visitar a los clientes.

Coelho, Gragas, Ramalhinho, Coelho, Souza & Cruz (2016) utilizan dos métodos de optimización para el problema CVRP: el algoritmo de búsqueda local iterada y algoritmo voraz o Algoritmo Greedy.

El algoritmo voraz es una estrategia de búsqueda por la cual se sigue una heurística consistente en elegir la opción óptima en cada paso local con la esperanza de llegar a una solución general óptima.

El algoritmo iterado atiende los siguientes criterios:

- Un mínimo local con una estructura de entornos no lo es necesariamente con otra.

- Un mínimo global es mínimo local con todas las posibles estructuras de entornos.
- Para muchos problemas, los mínimos locales con la misma o distinta estructura de entornos están relativamente cerca.

El problema se corrió 100 veces y se encontraron rutas factibles en todas las iteraciones. El algoritmo híbrido propuesto permitió mejorar los movimientos de los vehículos en las rutas en un 76,6% de las instancias iteradas, con un costo total de 32472 euros. Todas las rutas programadas por el algoritmo propuesto, minimizaron el costo del transporte en un 14,05% frente a la manera en que la empresa diseña sus rutas actualmente.

Finalmente Son (2014) utiliza el método de optimización de enjambre de partículas o PSO tal como se describió en la investigación de Poonthalir & Nadarajan (2017). El número de iteraciones del modelo es de 20000. Se usan datos de actividades de transporte reales de una empresa de recolección.

Los resultados son los siguientes: 10933 kg de residuos recolectados, que representa un 7,5% más de uso de capacidad que las rutas normales. El costo de las rutas se optimiza en un 6,8% frente a las rutas normales que viene manejando la empresa.

En general puede afirmarse que las estrategias de solución utilizadas para el problema de vehículos con capacidad –CVRP- fueron eficientes a la hora de encontrar soluciones factibles. Se destaca la utilización de algoritmos metaheurísticos como el PSO y el GA que arrojaron buenas soluciones en tiempos de cómputo razonables para problemas con gran cantidad de datos y problemas con aplicación de transporte en sectores reales.

5.5.2 Características Empresariales

A continuación se analizan algunas características empresariales tenidas en cuenta por los autores, para modelar y resolver el Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad – CVRP.

Mir, Hassani & Abolghasemi (2011) estudian un modelo teórico de distribución de carga homogénea desde del depósito principal hasta los clientes con demanda definida. Para resolverlo, los autores desarrollan una nueva metaheurística de enjambre de partículas aplicada a la solución del problema VRP.

Para modelar esta actividad de transporte, los autores tuvieron en cuenta las siguientes características empresariales:

- Vehículos con carga homogénea.
- Clientes con demandas definidas.
- Costos de rutas y un solo depósito.

La empresa objeto de estudio busca con el modelo encontrar el número óptimo de vehículos que debe servir a los clientes, por esta razón, la heurística es aplicable a problemas de transporte de empresas con flota de vehículos limitada para el transporte de pasajeros y mercancía.

Das & Borthakur (2006) estudian una versión del problema de ruteo de vehículos para minimización de tiempo con restricciones mixtas (precedencia y posición fija). Por precedencia se entiende que los clientes se visitan de tal manera que un cliente en particular, está precedido por otro. Por restricción de posición fija, se entiende que las posiciones de ciertos clientes se fijan en ciertos pasos para ser visitadas por un vehículo en particular.

Se tomaron en cuenta variables determinísticas para el modelamiento del problema, donde prima la utilización óptima de los tiempos de ruta. Además la función objetivo contiene variables relacionadas con clientes que tienen posiciones fijas y clientes que son precedidos por otros clientes. Este modelo de distribución es aplicable a operaciones de transporte relacionadas con distribución de mercancía (puede ser de una ciudad a otra) y con servicios de mensajería. Las restricciones de precedencia y posición fija son consistentes e independientes. Si no se cumple esta condición, las soluciones factibles no pueden ser determinadas.

Chen, Huang & Dong (2010) utilizan una metaheurística iterada variable de búsqueda de vecindades para resolver el problema clásico de ruteo de vehículos con capacidad.

El algoritmo de vecindades es óptimo para modelar procesos de distribución logística que cuenten con las siguientes características: un solo depósito, múltiples clientes distribuidos en una zona geográfica determinada y vehículos con cierta capacidad conocida. Las anteriores características aplican a actividades de distribución propias de empresas grandes de logística de distribución de alimentos, paquetes y mercancía.

Por su parte H. C. W. Lau, T. M. Chan, W. T. Tsui, & W. K. Pang (2010) proponen una metaheurística basada en el algoritmo genético donde se incorporan variables difusas para robustecer la búsqueda de rutas óptimas.

Se consideran múltiples clientes, múltiples depósitos y múltiples centros de acopio para modelar las actividades de transporte, además se conocen las demandas de los clientes, los costos y los tiempos de recorrido de cada ruta. La función objetivo es minimizar el costo de las rutas y las distancias de viaje.

El modelo corresponde a un proceso de distribución de bienes con múltiples depósitos, múltiples clientes y productos con distintas características. Un ejemplo típico de las anteriores variables se puede observar en empresas de distribución grandes, con flotas de vehículos propias y múltiples depósitos. (Mensajería y Carga)

Oliveira, Mauceri, Carroll Pallonetto (2017) aplican una estrategia de optimización para el ruteo de vehículos Green, basado en el Algoritmo Genético, con el objetivo de minimizar las emisiones de CO₂ de la flota de vehículos en cada ruta.

Además se tienen en cuenta las siguientes restricciones y características empresariales: vehículos con carga homogénea, clientes con demandas definidas, costos de Rutas relacionados con emisiones de CO₂, un sólo depósito, velocidad de los vehículos. Se incluyen además datos reales de la carga de los vehículos y las pendientes de las carreteras, para calcular las emisiones de los vehículos. La función objetivo es minimizar las emisiones de CO₂ de las flotas de vehículos cuando recorren las rutas.

Los efectos ambientales generalmente no son considerados cuando se modelan problemas de distribución clásicos. Para esta investigación se tienen en cuenta variables cuyo objetivo es minimizar las emisiones de CO₂ de sus flotas de vehículos. Las anteriores características aplican para empresas interesadas en el medio ambiente y en la reducción de los gastos por combustible para sus flotas de transporte.

Talarico, Sörensen & Springael (2015) utilizan una metaheurística iterativa para generar un conjunto de k soluciones diferentes para luego compararlas a través de índices de desempeño. La formulación de múltiples rutas desde un destino a otro es aplicable al sector de la seguridad privada y el transporte de materiales peligrosos por regulaciones legales.

Los autores consideraron las siguientes características empresariales para modelar el problema de transporte: vehículos con carga homogénea, clientes con demandas definidas, un solo depósito, costo de rutas simétricas. La función objetivo es minimizar el costo de las operaciones de transporte.

Este problema tiene varias aplicaciones prácticas en el transporte de valores y el transporte de materiales peligrosos. En la mayoría de países, existen regulaciones especiales para el tránsito de los carros de valores y materiales peligrosos, en los cuales se obliga a las empresas a planear múltiples rutas de sus flotas de transporte para llegar a los mismos objetivos y de esta manera hacer las rutas poco predictivas.

Toffoloa, Christiaens, Malderena, Wauters, Berghe (2017) estudian un problema especial CVRP llamado Swap Body VRP. Este problema es una generalización del problema clásico de ruteo de vehículos (VRP) basado en problemas reales que enfrenta la industria.

El SB-VRP difiere principalmente del CVRP en la medida en que los vehículos constan de uno o dos cuerpos (remolques). Los vehículos alargados se llaman trenes y tienen exactamente el doble de capacidad que los vehículos normales (camiones).

Además se consideran tres tipos de clientes: aquellos a quienes solo se puede llegar en camiones, aquellos a los que se les puede prestar servicio tanto por trenes como por camiones, y aquellos cuyas demandas exceden la capacidad de un camión y deben ser atendidas por trenes.

Cada cliente tiene una demanda definida y existe un solo depósito de donde parte toda la flota de vehículos. Además del depósito y las ubicaciones de los clientes,

hay ubicaciones de intercambio, donde uno de los cuerpos de un tren puede dejarse temporalmente, lo que permite que el vehículo sirva a los clientes con un solo carro (camión). El costo de las rutas es asimétrico. Cada operación de intercambio tiene un costo y tiempo determinado.

Las ubicaciones de intercambio no están asociadas con la demanda ni con el tiempo de servicio. Sin embargo, dependiendo de la operación ejecutada en una ubicación de intercambio, se consume una cierta cantidad de tiempo.

El enfoque tiene una relevancia práctica significativa para una gama de actividades comerciales, incluida la producción, la distribución y también el sector del transporte en general. La entrega de productos perecederos y urgentemente necesarios (combustible, por ejemplo), que casi siempre requiere transporte por carretera.

De hecho, muy a menudo los costos de transporte asociados con tales productos son desproporcionados cuando se los compara con el costo de los productos mismos. Además, el enfoque asegura la eficiencia con respecto a una serie de factores económicos y ecológicos importantes, tales como: el número de vehículos, el número de conductores, la distancia y el tiempo de viaje, y el impacto ambiental.

Bae, Hwang, Cho & Goan (2007), en su investigación estudian el desarrollo de un método de solución integrado para el CVRP para un sistema de suministro de varios depósitos basado en un algoritmo genético mejorado y una programación tipo GUI (Interfaz Gráfica de Usuario). Los autores tuvieron en cuenta las siguientes características empresariales para modelar el problema: vehículos con carga homogénea, clientes con demandas definidas, un solo depósito, costo simétrico de rutas. La función objetivo del problema es minimizar el costo logístico

de transporte, respetando los tiempos de viaje y la capacidad asignada de los vehículos.

Utilizando el método dinámico híbrido, se desarrolló un algoritmo de agrupamiento por sectores para transformar el problema del centro de suministros múltiples en problemas de centros de suministros únicos. La anterior característica es aplicable a cadenas de suministro complejas relacionadas con el sector de transporte de carga de mensajería y alimentos.

Garaix, Artigues, Feillet & Josselin (2010) estudian el problema de vehículos clásico, bajo demanda del servicio de transporte con múltiples rutas posibles, vehículos de carga homogénea, clientes con demandas definidas, un solo depósito y costo de rutas. La función objetivo del problema es minimizar el costo logístico de transporte, respetando los tiempos de viaje y la capacidad asignada de los vehículos.

En dicha investigación se estudia el problema de ruteo de vehículos aplicado a servicios de transporte bajo demanda. Para estos servicios, los viajes necesitan ser planeados por los usuarios. Dicho servicio está supeditado a algún tipo de variable de calidad exigida por el cliente. La ubicación de los clientes debe coincidir con las rutas cortas más factibles. Evitar rutas largas generalmente es un criterio de calidad exigido por los clientes que solicitan este tipo de transporte.

Poonthalir & Nadarajan (2017) estudian el problema de vehículos clásico con restricciones de velocidad cuyo función objetivo es minimizar el costo total de transporte y el consumo de combustible de la flota de vehículos. Además se tienen en cuenta las siguientes características empresariales para modelar el proceso de transporte: vehículos con carga homogénea, clientes con demandas definidas, un solo depósito, costo de rutas y restricciones de velocidad variable. La función

objetivo del problema es minimizar el costo logístico de transporte y el consumo de combustible.

Se analizaron variables donde se busca la eficiencia en el consumo de combustible de los vehículos utilizando variables de velocidad a través de una función de probabilidad. Dichas características aplican para actividades de transporte estándar de empresas preocupadas por el medio ambiente y el costo logístico de consumo de gasolina. (Transporte de bienes, pasajeros, servicios de vigilancia y mensajería).

Coelho, Grasas, Ramalinho, Coelho, Souza & Cruz (2016) estudian una variante del VRP inspirada en información real de una compañía con sistemas de distribución complejos. Se considera una flota de vehículos heterogénea donde se permite múltiples viajes. El problema también incluye variables relacionadas con actividades de Cross-docking donde algunos vehículos de la flota no tienen autorización de servir cierta clase de clientes.

Se consideran las siguientes características de la gestión logística de la empresa objeto de estudio para modelar el CVRP: flota de vehículos heterogénea con posibilidad de realizar más de un viaje, restricciones de Docking que hace que algunos vehículos no puedan visitar ciertos clientes, y para cada vehículo se asigna un costo variable y un costo fijo de transporte. La función objetivo del problema es minimizar el costo de la operación de transporte y el costo por cliente visitado. Las anteriores características son aplicables a actividades logísticas de empresas grandes, con múltiples productos y despachos y que además tengan dentro de sus políticas la estrategia de cero inventarios.

Finalmente, Son (2014) estudia un problema de ruteo de vehículos de una empresa de recolección de desperdicios y basura en una ciudad de Vietnam. La empresa cuenta con una flota de vehículos considerable y puntos de acopio

distribuidos por toda la ciudad. Se utiliza el algoritmo de enjambre de partículas que resulta ser eficiente con las instancias reales.

Además se tuvieron en cuenta las siguientes características empresariales para modelar el proceso de transporte:

- El número de contenedores así como sus ubicaciones en el mapa son fijos.
- Se determinan las distancias entre los nodos y las cantidades de desechos en un sitio de recolección.
- Como los turnos diurno y nocturno son equivalentes, se considera el turno diurno solo en el modelo.
- El tiempo de salida de los vehículos desde el depósito es igual. Las velocidades de los vehículos son iguales a una constante.
- El tiempo de carga y descarga de un vehículo es igual.
- Se permiten cargas parciales.
- La cantidad de sitios de recolección es mayor que la cantidad de triciclos / carretillas elevadoras. Sin embargo, la cantidad de estaciones de transferencia es menor o igual a la cantidad de ascensores de gancho.
- Los Triciclos y carretillas elevadoras pueden esperar en un sitio de recolección.
- Las capacidades de cada tipo de vehículos son iguales.
- Cada tipo de vehículo tiene un número máximo de horas de trabajo.

La empresa cuenta con una flota de vehículos considerable y puntos de acopio distribuidos por toda la ciudad. Los clientes donde se debe recolectar la basura corresponden a 247 hoteles y 948 restaurantes en Danang City, Vietnam. La empresa cuenta con 10 estaciones de transferencia y 327 vehículos. Se puede inferir que la empresa es de tamaño grande a juzgar por la cantidad de clientes que debe atender.

5.5.3 Brechas y Tendencias detectadas en la revisión bibliográfica

De acuerdo con la literatura revisada, el CVRP es una de las variantes más comunes en el estudio de ruteo de vehículos y la gestión logística de distribución. Esta característica ha permitido que los investigadores utilicen esta variante para modelar actividades de transporte con datos reales y en diferentes contextos empresariales, utilizando diversos métodos de solución.

Dichos métodos de solución han sido en su mayoría métodos metaheurísticos como el Algoritmo Genético, Recocido Simulado y Optimización por Enjambre de Partículas; y métodos híbridos que combinan heurísticas de inserción de rutas, búsqueda local, metaheurísticas iterativas y heurísticas de perturbación.

En relación al uso de técnicas de optimización para solucionar el CVRP se destacan las siguientes brechas y tendencias:

- De acuerdo con los resultados de la investigación de Mir, Hassani & Abolghasemi (2011) la PSO suele incurrir fácilmente en óptimos locales. Dicha convergencia podría evitarse ignorando la mejor posición conocida y atendiendo en su lugar a la mejor posición conocida del sub-enjambre circundante.
- Los autores que utilizan heurísticas de métodos de construcción de rutas como la Búsqueda de Amplitud (Das & Borthakur, 2006) y la Búsqueda Local (Toffoloa, Christiaens, Malderena, Wauters, Berghe, 2017) concluyeron que dichas herramientas generaban soluciones factibles que distaban por mucho de las mejores soluciones encontradas en la literatura. Por esta razón se sugiere utilizar otras metaheurísticas que arrojen soluciones iniciales más robustas, tales como el Algoritmo de Colonia de Hormigas y el Algoritmo de Inserción de Solomon - I1, que han demostrado

tener mayor desempeño entre las heurísticas de inserción para la optimización del problema de ruteo de vehículos con capacidad.

- El uso de metaheurísticas basadas en inteligencia artificial, donde se intenta imitar el razonamiento humano en la programación de los algoritmos es una tendencia prometedora para encontrar soluciones óptimas en tiempos de cómputo razonables. Para su implementación deberían tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:
 - Si la función a optimizar tiene muchos máximos/mínimos locales se requerirán más iteraciones del algoritmo para "asegurar" el máximo/mínimo global.
 - Si la función a optimizar contiene varios puntos muy cercanos en valor al óptimo, solamente se puede "asegurar" que se encontrará uno de ellos (no necesariamente el óptimo).
- Las heurísticas basadas en VNS (Búsqueda de Entorno Variable), (Chen, Huang & Dong, 2010), requieren el ajuste de muy pocos parámetros. Esta característica permite que la metaheurística VNS y sus extensiones sean útiles para diseñar rápidamente procedimientos heurísticos con los que se puedan proporcionar buenas soluciones con rapidez de manera muy simple.
- En relación a la utilización del Algoritmo Genético en las investigaciones de Bae, Hwang, Cho & Goan (2007) y de H. C. W. Lau, T. M. Chan, W. T. Tsui, & W. K. Pang (2010), se sugiere implementar artificios matemáticos que permitan mejorar el desempeño en la búsqueda de soluciones factibles y la salida de soluciones iniciales de óptimos locales.

Frente a las variables y restricciones usadas para modelar el CVRP, se identifican las siguientes brechas y tendencias:

- Inclusión de variables técnicas de los vehículos para minimizar las emisiones de CO₂ y disminuir el consumo de combustible en la flota para

aquellas investigaciones en las que las emisiones forman parte de la función objetivo. (Oliveira, Mauceri, Carroll Pallonetto, 2017)

- Inclusión de gradientes y pendientes de las carreteras que recorren los vehículos, que modelan de manera real los recorridos que hace la flota. Lo anterior permite calcular con más precisión las emisiones de CO₂.
- Desarrollo de herramientas gráficas que permitan al usuario tomar mejores decisiones a la hora de programar rutas de transporte y que faciliten la ubicación de las posiciones de clientes, vehículos y rutas basados en un sistema de posicionamiento global.
- Inclusión de restricciones adicionales (tiempos y demandas estocásticas) y funciones multiobjetivo. (Talarico, Sörensen & Springael, 2015).
- Agregar variables estocásticas para modelar la probabilidad de que un cliente sea servido en cualquiera de las clases de vehículos disponibles, cuando el problema se modela con flotas heterogéneas. (Toffoloa, Christiaens, Malderena, Wauters, Berghe, 2017).
- El trabajo de Garaix, Artigues, Feillet & Josselin (2010) ofrece al menos dos perspectivas importantes para el problema CVRP: la primera se refiere al uso de esta variante para actividades de transporte multimodales, y la segunda se refiere a la inclusión de variables que simulan la congestión de tráfico por carretera y el transporte por demanda.
- Otra tendencia importante a destacar en el estudio del CVRP es la utilización de vehículos eléctricos, donde algunos nodos representan estaciones de abastecimiento eléctricos, así como la utilización de restricciones de velocidad variable y la aplicación de una función de probabilidad para determinar la velocidad de los vehículos en un momento determinado de la iteración. (Poonthalir & Nadarajan, 2017).
- Uso de instancias e información relacionadas con actividades de transporte reales. (Coelho, Grasas, Ramalinho, Coelho, Souza & Cruz, 2016).

Los estudios empíricos que se ocupan de problemas a pequeña o gran escala podrían desempeñar un papel importante en el desarrollo de métodos de solución sólidos y efectivos para el CVRP. Por esta razón, un valioso indicador de futuras investigaciones relacionadas con el estudio del Ruteo de Vehículos con restricciones de capacidad es la contribución de los profesionales y gestores de operaciones que conocen el día a día de las actividades de distribución en contextos reales.

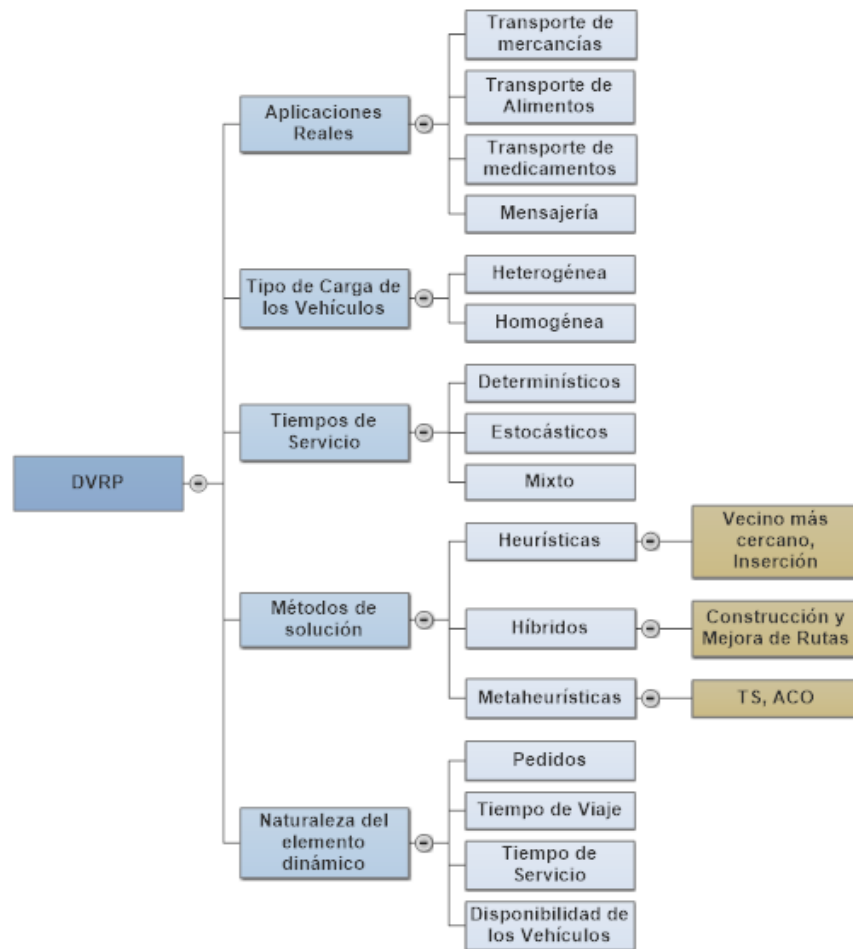
5.6 ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS DINÁMICO

Como se explicó en el subcapítulo 2.2.5.5, el Problema de Ruteo de Vehículos Dinámico (DVRP) es una extensión del problema de ruteo de vehículos donde se asume que algunos tipos de cambios pueden afectar el modelo, mientras el algoritmo intenta resolverlo. (Psaraftis, 1988). El DVRP posee las siguientes características:

- La información para estructurar el modelo de transporte no se conoce con anticipación.
- La información inicial puede cambiar una vez las rutas estén construidas. (Variable dinámica)
- La dimensión temporal juega un papel importante en la estructuración del problema dinámico.

Se estructuró a partir de la revisión de la literatura, un marco taxonómico donde se resaltan las principales características del DVRP.

Figura 11. Marco Taxonómico propuesto para el DVRP



Fuente: Autor

Del marco taxonómico propuesto para el DVRP se resaltan las siguientes características:

- Aplicación de la variante en contextos reales de distribución: transporte de mercancías, transporte de alimentos, transporte de medicamentos (de Magalhaes & de Sousa, 2006) y mensajería (Pillac, Guéret, Medaglia, 2012).
- Tipo de carga de los vehículos: heterogénea y homogénea. (Pillac, Gendreau & Medaglia, 2011)

- Tiempos de servicio: determinísticos (Chena, Chena, Wang, Gaoa & Sangaiah, 2017), estocásticos (de Magalhaes & de Sousa, 2006) y mixto.
- Naturaleza del elemento dinámico: pedidos (Pillac, Guéret, Medaglia, 2012), tiempo de viaje (De Magalhaes & de Sousa, 2006), tiempo de servicio, disponibilidad de los vehículos (Euchi, Yassine & Chabchoub, 2015).

5.6.1 Eficacia de los modelos utilizados para la solución del DVRP

El problema de ruteo de vehículos dinámico es un problema más robusto en comparación con el VRP convencional, y requiere para su solución algoritmos que suministren información en tiempo real, tales como herramientas metaheurísticas, heurísticas de construcción de rutas y métodos híbridos. La tabla 13 relaciona los métodos de solución utilizados por los autores seleccionados, para resolver el problema dinámico de ruteo de vehículos.

Tabla 13. Métodos de solución de la variante DVRP

Autores	Metaheurísticas		Heurísticas		Métodos Híbridos	
	PSO	ACO	In	VC	AD	CR y PSO
Chena, Chena, Wang, Gaoa & Sangaiah (2017)				X		
Mavrovouniotis & Yang (2015)		X				
Larsen, Madsen & Solomon (2008)	X					
Pillac, Gendreau, & Medaglia (2011)			X			
Pillac, Guéret, Medaglia (2012)	X					
de Magalhaes & de Sousa (2006)					X	
Euchi, Yassine & Chabchoub (2015)						X

Convenciones:

PSO: Algoritmo por Enjambre de Partículas

ACO: Optimización por Colonia de Hormigas

In: Heurística de Inserción.

VC: Heurística del Vecino más cercano

AD: Algoritmo Dinámico

CR: Construcción de Rutas

Fuente: Autor

Del conjunto de métodos de optimización utilizados, se destacan los aportes y avances de los siguientes autores:

Pillac, Guéret, Medaglia (2012) utilizaron heurísticas de inserción que opera en dos fases. En la primera fase se determina la cantidad de rutas a utilizar, junto con un cliente para inicializar cada una de las rutas. En la segunda fase se crean dichas rutas y se inserta el resto de los clientes en ellas, teniendo en cuenta la naturaleza dinámica de las variables del modelo, que para este estudio es la disponibilidad de la flota de vehículos. La función objetivo se mejora en promedio un 1,7% frente a datos reales de distribución.

Pillac, Gendreau, & Medaglia (2011) utilizan una heurística de inserción secuencial para obtener rutas compactas, donde los pedidos de los clientes es la variable dinámica del modelo. No se presta especial atención a la ubicación de los clientes dentro de cada ruta, pues de esta fase solo se conservan los clientes iniciales de cada ruta y la cantidad de rutas de la solución final. Dicha estructura de distribución es aplicable a empresas de mensajería y de domicilios de alimentos y productos farmacéuticos.

De Magalhaes & de Sousa (2006) proponen un algoritmo de tipo dinámico en cuatro fases: la primera fase permite crear clúster de clientes, la siguiente fase facilita crear rutas potenciales para servir a dichos clientes, la tercera parte del algoritmo permite seleccionar adecuadamente la ruta, y finalmente la ruta seleccionada es mejorada a través de un algoritmo de mejora de rutas. El modelo de De Magalhaes & de Sousa (2006) se estructura con dichas características, debido a que la compañía objeto de estudio, dentro de su política de servicio, desear mejorar la calidad del proceso de distribución prestado a los clientes, al

disminuir los tiempos de viaje, al mismo tiempo que se optimiza el costo de la rutas.

Al aplicar el método de optimización, los investigadores observaron que el costo de las rutas disminuía en promedio un 2,53% en relación a la estrategia de distribución que se implementaba antes de la utilización del algoritmo híbrido en sus sistemas de información de ruteo.

Euchi, Yassine & Chabchoub (2015) utilizan una estrategia híbrida entre una heurística de construcción de rutas y el algoritmo de enjambre de partículas para optimizar el problema de ruteo, cuya variable dinámica es el tiempo de viaje. Los indicadores de desempeño que se evaluaron con el modelo fueron: tiempo promedio de distribución, porcentaje de órdenes distribuidas en menos de una hora, porcentaje de órdenes distribuidas en dos horas, porcentaje de órdenes distribuidas en 3 horas, porcentaje de órdenes distribuidas en 4 horas, porcentaje de órdenes distribuidas al siguiente día. El algoritmo híbrido resultó eficaz para encontrar soluciones factibles en tiempo de cómputo cortos. Y mejorar la función objetivo en 1.9% frente a otros datos encontrados en la literatura.

En general se puede afirmar, que las estrategias de optimización utilizadas por los investigadores para resolver el problema de ruteo de vehículos es eficaz para encontrar soluciones factibles en tiempos de cómputo relativamente cortos, teniendo en cuenta que para esta variante, alguna de las variables de decisión es dinámica y sus resultados cambian a medida que se itera el modelo.

5.6.2 Características Empresariales

En el análisis de las características empresariales tenidas en cuenta para la utilización y posterior solución del problema de vehículos dinámico, se destacan las siguientes investigaciones:

Pillac, Guéret, Medaglia (2012) desarrollan un algoritmo de inserción de rutas para la solución del VRP Dinámico para un servicio de mantenimiento en hogares y apartamentos. Las características y elementos tenidos en cuenta por los investigadores para utilizar la variante DVRP fueron: vehículos con carga homogénea y disponibilidad dinámica, clientes con demandas definidas, costo de las rutas y un solo depósito donde deben partir y llegar los vehículos.

Al modelo se agregan solicitudes adicionales con demandas conocidas, una vez se han iniciado las rutas. Lo anterior implica la evaluación del costo de los vehículos para servir a los nuevos clientes que solicitan los servicios de mantenimiento. Se introduce una restricción que mide el nivel de satisfacción de los usuarios con el servicio que tiene que ver con el tiempo en que fueron atendidos.

En un contexto real, los pedidos de los clientes son solicitados a cualquier hora del día requiriendo servicios que no han sido planificados con antelación tales como los despachos o la reparación de equipos.

Una aplicación común de enrutamiento dinámico se puede encontrar en el área de mantenimiento. Las compañías de mantenimiento a menudo se comprometen con sus clientes a realizar visitas periódicas para realizar actividades de mantenimiento y también puede solicitar mantenimiento correctivo a corto plazo. Cada técnico recibe primero una ruta conocida al comienzo del día, mientras se insertan nuevas solicitudes urgentes dinámicamente durante todo el día.

De Magalhaes & de Sousa (2006) diseñan de una estrategia de distribución basada en un algoritmo de aproximación y mejora de rutas, tomando información real del proceso de distribución de una empresa farmacéutica en Portugal.

Dada una serie de pedidos y de vehículos disponibles se debe determinar el orden en que se deben distribuir los ítems, cuándo deben ser distribuidos y en qué vehículos deben distribuirse cierto tipo de órdenes, Para un número determinado de pedidos, el algoritmo decide si es mejor que un vehículo inicia una ruta, o si es mejor hacer que el vehículo espere por nuevas órdenes de clientes.

Las farmacias demandan tiempos cortos de distribución y entregas oportunas. Lo anterior hace que la planeación y programación de rutas sea compleja en entornos reales. El ruteo de vehículos dinámico modela las actividades de distribución, ya que se tienen en cuenta las variables relacionadas con órdenes que van llegando durante un día de operación normal en una farmacéutica de tamaño mediano. La distribución de productos farmacéuticos tiene una naturaleza dinámica, ya que la gestión de stocks debe ser ejecutada con una política de inventarios justo a tiempo.

En áreas densamente pobladas, las farmacias se hacen cada vez más y más pequeñas y el número de artículos es cada vez más grande. Por esta razón las farmacias tienden a ubicar múltiples órdenes a los distribuidores durante el día, es decir los distribuidores cargan con un considerable número de stocks en sus vehículos para evitar en lo posible, aprovisionarse en las farmacéuticas.

El trabajo de De Magalhaes & de Sousa (2006) fue desarrollado para una cooperativa de transporte de productos farmacéuticos que opera en el centro y norte de Portugal, que realiza tres grandes actividades, gestión de órdenes, picking y distribución.

5.6.3 Brechas y Tendencias detectadas en la revisión bibliográfica

En el DVRP (también conocido como VRP en línea o en tiempo real), las entradas de información se revelan o actualizan continuamente a través de nuevas

solicitudes de los clientes durante la ruta de los vehículos. Por ello, el problema de ruteo de vehículos dinámico es un problema más robusto en comparación con el VRP convencional, y requiere para su solución algoritmos y tecnologías de software eficientes que suministren información en tiempo real, para facilitar la toma de decisiones en la gestión logística de distribución.

La evolución de tecnologías tales como los Sistemas de Transformación Inteligente (ITS), los Sistemas de Gestión de Flotas Avanzados (AFMS) y Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), han convertido al DVRP en un tema de relativa importancia en el ámbito del modelamiento industrial. (Mavrovouniotis & Yang, 2015).

La disponibilidad de información en tiempo real abre la puerta a una serie de características y problemas que colocan al planificador o gestor logístico frente a un proceso de decisión más difícil, con más variables y menos tiempo para encontrar una solución. Por ejemplo, en el contexto de la llegada constante de solicitudes, surge un primer problema y es la posibilidad de aceptar o rechazar las solicitudes del cliente, si estas hacen que la capacidad del servicio disponible, colapse o sea insuficiente.

Por esta razón el DVRP se vislumbra como una tendencia fuerte en el estudio de problemas de ruteo, ya que mientras en el VRP estático la función objetivo trata de minimizar algún tipo de costo de viaje (distancias, tiempos, capacidad), en el DVRP la función objetivo puede introducir otras variables como el rendimiento (número de clientes atendida por unidad de tiempo), negaciones de servicios, tiempo de respuesta, y/o satisfacción del cliente.

Otro aspecto nuevo identificado en el estudio del DVRP es la introducción de desvíos. De acuerdo con Chena, Chena, Wang, Gaoa & Sangaiah (2017) el desvío de vehículos en ruta describe una situación en la que un vehículo está

viajando actualmente a un lugar de solicitud cuando se le asigna un destino más urgente. Dicha restricción hace más compleja la toma de decisiones para el gestor de las rutas, ya que el tiempo de respuesta impone un compromiso entre la reactividad y la calidad de la decisión. Por lo anterior, es importante la utilización en investigaciones futuras, de métodos de inserción más efectivos que contemplen por ejemplo, la probabilidad de que el cliente atienda el servicio y la urgencia de servir a los clientes.

Finalmente, es importante resaltar que un gran número de problemas dinámicos son formulados y resueltos como problemas estáticos con información estocástica. Sin embargo, en muchos casos, algunas rutas definidas a priori podrían no ser factibles si las condiciones iniciales no son verificadas correctamente. Por esta razón las aproximaciones con variables dinámicas son necesarias para resolver este tipo de problemas.

Por ejemplo, en la investigación de Pillac, Guéret, Medaglia (2012) donde se estudia el ruteo de servicios de mantenimiento, la central de llamadas tiene cierto grado de libertad para fijar las citas de servicio. En otras palabras, las ventanas de tiempo en que se deben servir a los clientes, pueden ser definidas o influenciadas por el operador del centro de llamadas. Como consecuencia, se desea que las respuestas de los operadores sean convenientes en términos de ahorro de tiempo en los servicios. La central telefónica debe estar conectada de alguna manera con la central que programa las rutas de vehículos.

En la investigación de De Magalhaes & de Sousa (2006) donde se estudia un sistema de distribución para productos farmacéuticos, es importante convertir esta estrategia de distribución en un centro que soporte las decisiones de logística donde se tengan en cuenta la integración de la información de ruteo con el sistema de información general de la empresa y un sistemas de gráfico de rutas que sea intuitivo.

6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y RECOMENDACIONES

La gestión logística y la distribución son funciones críticas de las empresas. Razón de ello es el impacto significativo en el precio final de productos o servicios ofertados cuando se toleran ineficiencias en dichas actividades, que también podrían disminuir los niveles de competitividad y satisfacción del servicio. Los profesionales en este campo desempeñan un papel clave en el cumplimiento eficiente de los objetivos de la gestión logística y las demandas de los clientes, a través del control de los envíos entrantes y salientes, la reducción de costos, el cumplimiento de metas estratégicas y la excelencia operacional de las compañías.

A menudo se dice que las personas son el activo más importante de una empresa. Sin embargo, la realidad es que las empresas no rinden homenaje a esta premisa. La excelencia en la distribución y la logística depende de que las empresas reconozcan a los trabajadores como una pieza extremadamente valiosa del rompecabezas corporativo. Después de todo, los procesos logísticos requieren mucha mano de obra; de ahí la importancia de las personas. Los procesos de distribución y logística no solo son, sino que seguirán siendo complejos y serán impulsados por las personas.

De la misma manera, muchas compañías están buscando estrategias eficaces para evitar las ineficiencias, a través del uso de tecnologías para la logística. El hecho es que la distribución y la logística tienen que ver con los procesos, la tecnología utilizada y las personas que ejecutan estos procesos. Entonces, la complejidad en la gestión logística no es necesariamente conceptual; más bien, se debe a la cantidad de errores producto de la multiplicidad de pasos, papeleos y reprocesos involucrados.

En este sentido, la investigación de operaciones en la toma de decisiones de la logística de transporte, juega un papel fundamental en la búsqueda de eficiencias

en las operaciones asociadas con la distribución de mercancías, debido a que integra casi todas las funciones esenciales de las cadenas de suministro, además de los procesos y las personas que participan en dichos procesos.

Uno de los aportes más significativos de la investigación de operaciones en la gestión y operación logística de transporte, es la aplicación de métodos analíticos avanzados que se aproximan a un contexto real para tomar decisiones asertivas en las organizaciones. Dichos métodos emplean técnicas de otras ciencias, tales como métodos numéricos, ciencias de la computación, análisis estadísticos y optimización matemática.

Debido a su énfasis en la interacción de las personas y la tecnología y a su enfoque en aplicaciones prácticas, la investigación de operaciones se ha superpuesto con otras disciplinas, especialmente la ingeniería industrial y la gestión de operaciones que han permitido encontrar soluciones óptimas o adecuadas ante problemas complejos de la gestión logística de una organización.

Como se ha mencionado en el desarrollo del presente trabajo, uno de los problemas más complejos en el área del modelamiento industrial y la gestión logística que más ha llamado la atención de la comunidad científica, es el problema de transporte conocido como ruteo de vehículos – VRP, por sus siglas en inglés - cuyo objetivo es satisfacer la demanda de bienes o servicios a un grupo de clientes localizados en ciertas zonas geográficas a través de una flota de vehículos con capacidad limitada, de tal manera que se pueda mejorar u optimizar cierta función objetivo asociada con restricciones de tiempo, costo de ruta o capacidad.

También se mencionó que la complejidad del VRP radica en la naturaleza e interrelación de las variables que lo componen y que para ello se han construido modelos y técnicas de optimización complejas que han permitido a empresas

dedicadas a la operación logística, tomar mejores decisiones al momento de invertir capital de trabajo y de planear las actividades de distribución.

Para entender el problema de ruteo de vehículos a la luz de los objetivos de investigación propuestos, se analizaron 50 artículos científicos de alto nivel publicados en el periodo 2005 – 2017, a través de una estrategia de búsqueda que permitió estudiar 6 variantes del problema de ruteo de vehículos, a saber: Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP), Vehicle Routing Problem with Backhauls (VRPB), Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP), Vehicle Routing Problem Pickups and Deliveries (VRPPD), Stochastic Vehicle Routing Problem (SVRP) y Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW).

Dicha revisión de literatura permitió conocer por cada una de las variantes estudiadas, las brechas y tendencias de conocimiento relacionadas con el VRP, las características empresariales tenidas en cuenta para modelar el problema de ruteo de vehículos, y la eficacia de los distintos modelos utilizados para la solución del VRP. Igualmente se propuso un marco taxonómico para entender y destacar las características teóricas de cada una de estas variantes.

Además del cumplimiento de los objetivos propuestos, es importante resaltar los siguientes puntos de discusión encontrados en la literatura analizada, que se dejan a consideración para futuras investigaciones:

- La mayoría de literatura encontrada se centra en modelos idealizados, en lugar de modelos robustos y adecuados a las necesidades de las industrias.
- En los modelos estudiados se evidencia falta de tratamiento de la incertidumbre de las variables y falta de estrategias referentes al riesgo asociado a operaciones logísticas.
- Los resultados de las investigaciones relacionadas con la aplicación de modelos para optimizar el Problema de Ruteo de Vehículos – VRP, cada

vez están disponibles para los tomadores de decisiones en las áreas de gestión logística.

- La gestión del transporte y los cambios en el entorno crean la necesidad de implementar modelos de carácter más dinámico.
- Algunos problemas de gestión logística de distribución (en el nivel operacional) necesitan respuestas rápidas, mientras que otros (en el nivel estratégico) pueden tener tiempos de solución más largos.
- La tendencia a estructurar modelos de transporte donde se involucren variables ambientales, como las emisiones de CO₂ o la sostenibilidad de la flota de transporte, pueden cambiar la configuración de los modelos VRP, tal y como se conocen en la literatura actual.
- Las industrias que gestionan cadenas de suministro necesitarán sistemas de información y tecnologías robustas como soporte a la toma de decisiones logísticas.
- Los avances relacionados con los modelos de planeación de rutas, cuyos resultados son eficientes en términos de tiempo de cómputo, deben integrarse a los sistemas de información de planeación de rutas y a los ERP de las empresas.
- La taxonomía propuesta no debe considerarse fija, sino que debería evolucionar y mejorarse para futuras investigaciones mediante la inclusión de nuevas variantes VRP y el aumento del número de artículos científicos considerados para la revisión del estado del arte, que sean publicados en revistas dedicadas a la ingeniería de sistemas, ciencias de la computación, las matemáticas, la optimización y la investigación de operaciones.

Como complemento a los resultados presentados, a continuación se relacionan y discuten temas específicos, producto de la literatura consultada, que también podrían tener gran impacto en investigaciones futuras:

Figura 12. Investigaciones futuras relacionadas con el estudio del VRP.



Fuente: Autor.

6.1 PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS PARA GRANDES CIUDADES

Con base en la literatura consultada, se identificaron algunas líneas de investigación potenciales para el problema VRP aplicado a contextos de transporte en grandes ciudades:

- Incluir en los modelos VRP clásicos, restricciones relacionadas con la regulación del tráfico, contaminación acústica y estrategias de respuesta rápida de los pedidos de los clientes. Dichas restricciones o limitaciones han recibido poca atención en la literatura, por lo que se requiere una mayor investigación en estas áreas.
- Mayor estudio sobre el desarrollo de métodos de solución eficientes. La mayoría de los métodos de solución descritos en el capítulo 5 se han basado en el uso de herramientas metaheurísticas. Es importante

considerar enfoques más robustos basados en la optimización híbrida, y la simulación con realidad virtual.

- Considerar todos los grupos de interés involucrados en el servicio de distribución del problema VRP en grandes ciudades, que incluya no solo a los clientes finales, sino también a los mensajeros, residentes, administradores y gestores de rutas.
- Generar un conjunto de datos de referencia para los VRP aplicados a contextos de las grandes ciudades. Al igual que otras variantes del VRP donde existen instancias y paquetes de datos, se requiere la creación de un set de problemas que facilite el desarrollo de las investigaciones relacionadas con el VRP en grandes ciudades.

6.2 NATURALEZA DINÁMICA DE LAS VARIABLES DEL VRP

Como se mencionó en el subcapítulo 5.6, el problema de ruteo dinámico o DVRP ha tomado fuerza en los últimos años debido a la inclusión de variables dinámicas dependientes del tiempo. La mayoría de artículos se han restringido al desarrollo de modelos estáticos, con poco intento de capturar la naturaleza variante de los parámetros en los problemas reales de transporte.

Las variables del VRP son intrínsecamente sensibles al tiempo, como se evidenció en el análisis de la variante con restricciones estocásticas (SVRP) y con ventanas de tiempo (VRPTW). Por lo tanto, la incorporación de la naturaleza dinámica a los modelos VRP mejoraría enormemente el realismo asociado con las operaciones logísticas de distribución en tiempo real o en línea. Lo anterior señala, que para los nuevos modelos de transporte es necesario el desarrollo de sistemas robusto de soporte a decisiones.

En relación al transporte de mercancías, el entorno más desafiante para el DVRP es la distribución en grandes ciudades, tal como se mencionó en el subcapítulo

anterior. La congestión del tráfico y otros eventos son más propensos a interrumpir los planes de rutas, además los clientes requieren entregas inmediatas para tiempos de reacción cortos donde se consideran cambios en las demandas. Para solucionar el problema de ruteo de dinámico en contextos de grandes ciudades, es importante considerar en futuras investigaciones el modelado de la red carreteras y la adquisición de datos en tiempo real que faciliten el enrutamiento dinámico de las flotas de vehículos.

Una aplicación típica de la logística dinámica en grandes ciudades es el servicio de mensajería presente en la mayoría de las áreas urbanas. Los mensajeros se envían a las ubicaciones de los clientes para recolectar los paquetes y enviarlos a su destino o a un depósito único. Dependiendo del nivel de servicio pagado por el cliente, los correos pueden consolidar recogidas de varios clientes o proporcionar un servicio personalizado. Las empresas que ofrecen servicios de mensajería a menudo tienen una gama flota de vehículos heterogénea compuesta por bicicletas, motos, automóviles y furgones.

El reto de los investigadores es gestionar las rutas dinámicamente, teniendo en cuenta no solo las solicitudes conocidas, su tipo, ubicación de recogida y entrega, sino también las condiciones de tráfico y los tiempos de viaje variables.

Otro servicio considerado en el DVRP es el transporte de personas, que es en general muy similar al transporte de mercancías, aunque se caracteriza por incluir restricciones adicionales tales como los tiempos de espera, viaje y servicio. El servicio de taxis es el sistema de transporte individual más común. Las solicitudes se componen de un lugar y hora de recogida, posiblemente junto con un destino. Las solicitudes de servicio se pueden conocer con antelación, por ejemplo, cuando un cliente reserva un taxi para el día siguiente, o pueden llegar de forma dinámica, en cuyo caso se debe enviar un taxi en el menor tiempo posible. Cuando los

clientes no pueden compartir un vehículo, el taxi gratis más cercano es el que toma el viaje, dejando un espacio limitado para la optimización de la ruta.

Otra aplicación importante en el DRVP son los sistemas de transporte bajo demanda en los principales hospitales, con servicios distribuidos en varios edificios o en varias sucursales. Dependiendo del procedimiento médico o la capacidad de la instalación, un paciente puede necesitar ser transferido con poca anticipación de un servicio a otro, posiblemente requiriendo personal capacitado o equipo específico para su cuidado.

Se puede encontrar una aplicación común de enrutamiento dinámico en el área de operaciones de mantenimiento. Las compañías de mantenimiento a menudo se comprometen por contrato con sus clientes, que especifican visitas periódicas o planificadas para realizar el mantenimiento preventivo, y también pueden solicitar mantenimiento correctivo con poca anticipación. Por lo tanto, cada técnico recibe primero una ruta con solicitudes conocidas al comienzo del día, mientras que las nuevas solicitudes urgentes se insertan dinámicamente a lo largo del día.

Una tendencia que ha llamado la atención en el estudio del DVRP, es el relacionado con la contaminación y la congestión del tráfico. En los documentos revisados sobre DVRP, la contaminación no se considera explícitamente. Sin embargo, los lectores interesados en la logística ecológica pueden encontrar información sobre Green VRP (GVRP) y Pollution Routing Problem (PRP) en la investigación de Lin, Choy, Ho, Chung, & Lam (2014).

6.3 VRP CON VARIABLES AMBIENTALES

6.3.1 Transporte de Residuos Sólidos

Hamdi, Labadie, & Yalaoui (2014) y Son (2014) estudian el problema CVRP y VRPTW para actividades de transporte de residuos sólidos urbanos. De acuerdo con los autores, la generación de residuos sólidos urbanos aumenta con la rápida urbanización y el crecimiento de la población. Para mejorar el servicio, los municipios y ciudades han optado por promover campañas de reciclaje a escala local, en lugar de depender de las instalaciones regionales de tratamiento y los rellenos sanitarios.

Sin embargo, en las investigaciones relacionadas con el ruteo de vehículos recolectores de residuos sólidos, se evidencia que el uso de estrategias de separación de residuos y recolección diferenciada complica los esquemas de ruteo ya que se necesitarían más tipos de contenedores en cada punto de recolección. El análisis de sistemas de estrategias de recolección de residuos ha crecido en importancia, pero se ha vuelto más complicado.

De acuerdo con Hamdi, Labadie, & Yalaoui (2014), los VRP de recolección de residuos se pueden formular como modelos de programación enteros diseñados para minimizar el número de vehículos y los costos de las rutas (es decir, las distancias totales de viaje). Se agrega un objetivo implícito para equilibrar la carga de trabajo entre los vehículos. Las principales restricciones que deben ajustarse al análisis de este tipo particular de problemas de ruteo son, entre otras:

- El número de arcos o rutas que entran y salen de cada vértice, asegurando la continuidad del flujo de la flota de vehículos.
- La capacidad de ruta, que impone la carga de trabajo máxima para un vehículo. La anterior restricción es importante para equilibrar la carga de trabajo entre los vehículos.
- La duración de las rutas, que limitan el tiempo de viaje para cada vehículo.
- Las ventanas de tiempo.
- El equilibrio entre oferta y demanda.

Los modelos VRP y los algoritmos heurísticos dan solución del problema de ruteo de vehículos de residuos sólidos si se integran con tecnologías de información tales como el GPS (Sistema de Posicionamiento Global) o el RFID (Identificación por Radio-Frecuencia) con el propósito de contribuir al desarrollo de un sistema inteligente de recolección de residuos.

Sin embargo, de acuerdo con Hamdi, Labadie, & Yalaoui (2014) dichos sistemas solo tienen una integración de nivel básico. Si se pudieran mejorar algunas barreras técnicas, estos métodos podrían mejorar la eficiencia y la relación costo-eficacia de todo el proceso de recolección de residuos con menor impacto ambiental.

6.3.2 VRP con vehículos eléctricos

Una de las tendencias identificadas en el estudio de problemas de ruteo con variables ambientales, es la utilización de flotas de vehículos eléctricos. (Zhenfeng, Yang, Xiaodan & Sheng, 2017). Al realizar una búsqueda en bases de datos, se evidencia que en los últimos años la comunidad científica ha despertado interés por el estudio de este tipo de problemas, sin embargo no se han estructurado modelos aplicables a contextos reales, debido a la falta de información de industrias y sectores que utilicen vehículos de este tipo.

De acuerdo con lo anterior, se requiere un estudio integrado del problema por parte de los investigadores, que incluya un análisis sistemático del entorno del mundo real para capturar perspectivas de la industria y empezar a explotar antecedentes científicos. Los modelos propuestos para el VRP con vehículos eléctricos podría enriquecerse con restricciones tales como una flota heterogénea de vehículos, el nivel de degradación de baterías, la ubicación de estaciones de servicio y los costos de recarga.

6.3.3 Uso de Variables Ambientales

Llama la atención el uso de restricciones relacionadas con la emisión de CO₂ y el consumo de combustible en varios de los modelos estudiados. Lo anterior vislumbra una nueva tendencia en el estudio de actividades de transporte y su impacto con el medio ambiente.

Por ejemplo, en las investigaciones de Oliveira, Mauceri, Carroll Pallonetto (2017) y Huang & Lin (2015) utilizan estrategias de optimización para el ruteo de vehículos, basados en el Algoritmo Genético y otras metaheurísticas, con el objetivo de minimizar las emisiones de CO₂ de la flota de vehículos en cada ruta.

Se destacan las siguientes características empresariales utilizadas en dichos modelos que utilizan variables ambientales: vehículos con carga homogénea, clientes con demandas definidas, costos de Rutas relacionados con emisiones de CO₂, un sólo depósito, velocidad de los vehículos. En algunas corridas del algoritmo se incluyen datos reales de la carga de los vehículos y las pendientes de las carreteras, para calcular las emisiones de los vehículos. La función objetivo es minimizar las emisiones de CO₂ de las flotas de vehículos cuando recorren las rutas.

El modelo incluye ventanas de tiempo, penalizaciones por entrar a rutas congestionadas y el nivel de emisiones de CO₂. Los efectos ambientales generalmente no son considerados cuando se modelan problemas de distribución clásicos. Las anteriores características aplican para empresas interesadas en el medio ambiente y en la reducción de los gastos por combustible para sus flotas de transporte.

6.4 TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN PARA EL VRP

A continuación se discuten algunos apartes importantes a tener en cuenta frente a la utilización de técnicas de optimización para el problema de ruteo de vehículos, con base en la literatura analizada.

El uso de técnicas metaheurísticas se ha utilizado preferentemente sobre otras técnicas de optimización combinatoria debido en gran parte a su capacidad de encontrar buenas soluciones en tiempos razonables de ejecución.

La tendencia más reciente en el uso de técnicas metaheurísticas es el uso de hibridaciones, es decir la combinación de una o más técnicas de optimización para potenciar la búsqueda de soluciones factibles a problemas de alta complejidad.

El uso de técnicas híbridas fundamenta su interés en mejorar el rendimiento del algoritmo final combinando las mejores características individuales de sus predecesores. Como se mencionó en el capítulo 5, algunas aplicaciones de estas técnicas en modelos de transporte usan algoritmos genéticos y heurística de vecindades para fortalecer el nivel de intensificación en la búsqueda de soluciones factibles del VRPPD; o algoritmo de Colonia de Hormigas con heurísticas de búsqueda local para la solución del problema VRPTW.

La conclusión general del análisis de cada una de las variantes encontradas en la literatura es que, a pesar de ser estrategias que resultan ser eficaces para la búsqueda de soluciones en tiempos de cómputo razonables, dichas estrategias siempre son susceptibles de mejora. Algunos de los puntos que se podrían tener en cuenta para mejorar la selección y utilización de técnicas de optimización en problemas de ruteo de vehículos, de acuerdo con la literatura revisada, son los siguientes:

- La selección del mejor algoritmo debe evaluarse en términos de flexibilidad y complejidad computacional, cuando se desea utilizar la técnica de optimización para la toma de decisiones en contextos reales. Como se mencionó, los algoritmos genéticos son los menos flexibles ya que están restringidos a operar con un único tipo de algoritmo, pero son los menos complejos desde el punto de vista computacional, ya que el único requisito de búsqueda adicional es el descubrimiento o modificación de la probabilidad de encontrar soluciones factibles a problemas combinatorios. (Lawrence, 1991)
- Las metaheurísticas son las técnicas más flexibles ya que se pueden combinar con otras técnicas para crear algoritmos nuevos que trascienden los límites de búsqueda de los algoritmos tradicionales.
- Los algoritmos evolutivos, como el algoritmo genético, se utilizan en aquellos casos en los que las técnicas de programación no lineal puede estancarse en óptimos locales.
- Los problemas con múltiples variables pueden aumentar el espacio de búsqueda de soluciones y se requerirán ejecuciones más largas. Por esta razón es importante involucrar algún tipo de análisis de los algoritmos a través de operadores de rendimiento, que permitan ponderar y conocer con anticipación si el algoritmo es eficaz para solucionar cierto tipo de problema de transporte. El operador de rendimiento podría analizar variables como los tiempos de ejecución del algoritmo, la calidad de las respuestas, el uso del algoritmo en la literatura, etc.
- Si las soluciones encontradas se categorizan como de tipo determinista, los métodos exactos son eficientes para la búsqueda de soluciones factibles. Si por el contrario, al iterar un modelo de optimización se encuentran múltiples soluciones factibles, es conveniente utilizar heurísticas, metaheurísticas o métodos híbridos.

- Uno de los desafíos clave en la investigación de técnicas de optimización de los problemas de gestión logística, es el despliegue de los algoritmos estudiados en plataformas de hardware y software que se utilizan para apoyar la toma de decisiones y mejorar la comprensión de los problemas de optimización en gestión logística.
- Las particularidades de los problemas de transporte reales pueden requerir una variedad de implementaciones de algoritmos especializados. Las investigaciones futuras deberían enfatizar el desarrollo de software y técnicas que permitan la visualización en tiempo real del proceso de optimización.
- La gran cantidad de enfoques que se han tomado para la implementación de algoritmos plantea varios desafíos de investigación. Puede existir una variabilidad significativa en el rendimiento en diferentes implementaciones del mismo algoritmo lo que complica aún más las comparaciones de algoritmos, ya que no está claro que dos implementaciones diferentes de la misma técnica de optimización produzcan resultados idénticos.

Finalmente, es importante resaltar que la optimización del problema de ruteo de vehículos, así como de cualquier problema de gestión logística (almacenamiento, alistamiento, picking, distribución, incluso estrategias de Cross-docking), debe verse como una forma de explorar posibles alternativas de gestión, no solo enfocadas a encontrar la mejor solución o solución óptima, sino que permitan de alguna manera la integración y participación de los interesados en la toma de decisiones logísticas, el aporte de expertos y el uso de tecnologías para la mejora de los procesos.

7. CONCLUSIONES

Los objetivos propuestos para la revisión de literatura del problema de ruteo de vehículos – VRP - se cumplieron en su totalidad. Se definió una estrategia de búsqueda basada en los siguientes criterios: palabras clave, operadores de búsqueda, ecuaciones de búsqueda, bases de datos, periodo de publicación (2005 – 2017), disciplinas y áreas de interés. Para seleccionar la información se aplicaron dichos criterios de aceptación y se seleccionaron 50 artículos de alto nivel científico que cumplieron con las características relacionadas en el diseño metodológico.

Una vez seleccionada la información, se procedió a realizar una lectura crítica y discusión de los siguientes temas: análisis de la eficacia de los modelos y técnicas de solución (heurísticas, metaheurísticas y métodos exactos) del VRP, principales limitaciones halladas para el modelamiento y solución del VRP, de acuerdo con las variantes encontradas en la literatura seleccionada; identificación de las características empresariales que se han tenido en cuenta para la solución del VRP, de acuerdo con las restricciones seleccionadas del problema; diferencias teóricas de los estudios realizados; identificación de brechas y tendencias del conocimiento identificadas en el estudio del VRP como problema de la gestión logística de distribución.

Como resultado del análisis de información, se estudiaron 6 variantes del problema de ruteo de vehículos – VRP - y se propuso un marco taxonómico que sirve como herramienta para entender y resaltar las principales características de cada una de dichas variantes.

Con relación a la eficacia de los modelos utilizados para la solución del VRP, se observa que los algoritmos metaheurísticos y técnicas híbridas son las herramientas más eficientes para la resolución de los modelos de transporte

presentes en cualquier sector industrial, debido a que son capaces de encontrar soluciones factibles más allá de óptimos locales, en tiempos de cómputo razonables. Cabe destacar también que los investigadores buscan que los métodos de solución involucren variables y restricciones que reflejen la realidad de los problemas de transporte.

Frente al análisis de las características empresariales tenidas en cuenta para la solución de cada caso particular del VRP, se evidencia que de los 50 artículos analizados, 28 estudian modelos teóricos de transporte, cuyo objetivo de investigación es probar la eficacia de técnicas de optimización matemática a problemas de ruteo. Los demás artículos (22) tienen un enfoque más práctico al utilizar instancias, datos e información de sectores reales, tales como el transporte de mercancía, de pasajeros, de desperdicios, de alimentos, comunicaciones, servicios farmacéuticos, pacientes, valores y materiales eléctricos.

De los 22 artículos con enfoque práctico, 8 pertenecen a la Variante del Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW), que también es la variante donde se encontró mayor información aplicada a contextos reales, y la variante en general donde se encontró mayor información del problema de ruteo de vehículos (18 artículos).

Además de las actividades de transporte anteriormente mencionadas, se encontró que cada variante estudiada posee una función objetivo principal que se pretende maximizar o minimizar a través de las diferentes técnicas de optimización, así como variables adicionales que acompañan la función objetivo principal. En este sentido se encuentran problemas que contemplan múltiples depósitos, flotas heterogéneas, variables estocásticas, ubicación de los productos dentro de los vehículos, consumo de combustible, emisiones de CO₂, velocidad de los vehículos, satisfacción del servicio de transporte, entre otros aspectos.

Igualmente se propuso para cada variante estudiada la relación de brechas y tendencias. Cada una de ellas se abre como una línea nueva de investigación para aquellos interesados en estudiar la gestión logística distribución y los problemas de transporte. Las principales tendencias y brechas identificadas se resumen en lo siguiente:

- Considerar en investigaciones futuras, los procesos de producción sumados a actividades de distribución para evaluar modelos asociados a la optimización de los costos en toda la cadena de suministro.
- Desarrollar análisis de sensibilidad para algoritmos utilizados. Se encontró que al depurar y simplificar algunos pasos, así como excluyendo restricciones redundantes al problema, se logra disminuir el costo de la función objetivo de manera significativa.
- Orientar los modelos de distribución a un sistema de operaciones logísticas multiobjetivo.
- Incluir variables estocásticas que permitan modelar las actividades de distribución, atendiendo las condiciones reales de la gestión logística.
- Incluir variables de tipo medioambiental en el desarrollo de modelos de transporte. (vehículos eléctricos, restricciones relacionadas con emisión de CO₂ y consumo de combustible)
- Utilizar herramientas híbridas de construcción y mejora de rutas, que han demostrado ser eficaces para solucionar el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo.
- Integrar las heurísticas propuestas a los códigos de programación de los softwares planeadores de rutas.
- Incluir variables de satisfacción del servicio, relacionadas con el cumplimiento del servicio.
- Utilización de modelos dinámicos cercanos a la realidad del transporte.

Finalmente, se discutieron los resultados del análisis del VRP a la luz de los objetivos de investigación propuestos. Como resultado de dicha discusión se concluye que la gestión del transporte y los cambios en el entorno crean la necesidad de implementar modelos de carácter más dinámico y que la mayoría de la literatura encontrada se centra en modelos idealizados, en lugar de modelos robustos y adecuados a las necesidades de las industrias y empresas. Igualmente se hace énfasis en la importancia de la aplicación de las técnicas de optimización de transporte a herramientas de hardware y software que faciliten la toma de decisiones logísticas y la participación de cada una de las personas involucradas en los procesos logísticos.

Los desafíos de la investigación relacionados con la optimización para la toma de decisiones incluyen la necesidad de avances tecnológicos en algoritmos y herramientas de apoyo a la toma de decisiones; demostración mejorada de cómo la optimización puede aplicarse a problemas del mundo real como parte de un proceso más amplio de toma de decisiones; y una mejor comunicación y acceso a la información sobre cómo aplicar los métodos de optimización.

En última instancia, la optimización en la gestión logística de distribución es una herramienta utilizada para apoyar la toma de decisiones y mejorar la comprensión de problemas del mundo real. Tomar buenas decisiones es difícil, altamente subjetivo y depende de las opiniones de las partes interesadas. Casi todos los problemas se caracterizan por tener múltiples puntos de vista que pueden llegar a ser conflictivos, combinados con puntos de vista contradictorios sobre la definición de lo que hace una "buena" decisión. Por esta razón es importante involucrar a los tomadores de decisiones en el proceso de optimización de los problemas de distribución logística para mejorar su capacidad de tomar decisiones acertadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Aldin, N., & Stahre, F. (2003). Electronic commerce, marketing channels and logistics platforms—a wholesaler perspective. *European Journal of Operational Research*, 270-279.
- Alexander, P., Armstrong, H., & McCulloh, I. (2011). Towards supply chain excellence using network analysis. *Proceedings of the 2011 IEEE 1st International Network Science Workshop, NSW 2011* (págs. 90-97). New York: International Network Science Workshop.
- Bae, S.-T., Hwang, H. S., Cho, G.-S., & Goan, M.-J. (2007). Integrated GA-VRP solver for multi-depot system. *Computers and Industrial Engineering*, 233-240.
- Baldacci, R. (2008). An exact algorithm for the vehicle routing problem based on the set partitioning formulation with additional cuts. *Mathematical Programming*, 351–385.
- Ben, H., Absi, T. N., Feillet, D., & Quillio, D. (2017). Empirical analysis for the VRPTW with a multigraph representation for the road network. *Computer and Operation Research*, 103 - 116.
- Berhan, E., Beshah, B., & Beshah, B. (2014). Stochastic Vehicle Routing Problem: A Literature Survey. *Journal of Information and Knowledge Management*. Addis Abeba: Addis Abeba University.
- Bodin, L., Golden, B., Assad, A., & Ball, M. (1983). Routing and scheduling of vehicles and crews. The state of the Art. *Computers and Operations Research*, 69-211.
- Boonkleaw, A., Suthikarnnarunai, N., & Srinon, R. (2010). Strategic Planning for Newspaper Delivery Problem Using Vehicle Routing Algorithm with Time Window (VRPTW). *Operations Research and Management Science*, 18-28.
- Boussaïd, I. L. (2013). A survey on optimization metaheuristics. *Information Sciences*, 82-117.
- Braekers, K., Ramaekers, K. M., & Van Nieuwenhuysse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers and Industrial Engineering*, 300 - 313.

- Calvet, L., Pagès-Bernaus, A., Travesset-Baro, O., & Juan, A. A. (2016). A Simheuristic for the Heterogeneous Site-Dependent Asymmetric VRP with Stochastic Demands. *Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence*, (págs. 408-417). Salamanca, España.
- Chen, C.-H., & Ting, C.-J. (2005). A hybrid ant colony system for vehicle routing problem with time windows. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 417-426.
- Chen, M.-C., Hsiao, Y.-H., Reddy, H., & Tiwari, M. K. (2015). A Particle Swarm Optimization Approach for Route Planning with Cross-Docking. *7th International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology*, (págs. 1-12). Ankara, Turkey.
- Chen, M.-C., Hsiao, Y.-H., Reddy, R. H., & Tiwari, M. K. (2016). The Self-Learning Particle Swarm Optimization approach for routing pickup and delivery of multiple products with material handling in multiple cross-docks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 208-226.
- Chen, P., Huang, H.-k., & Dong, X.-Y. (2010). Iterated variable neighborhood descent algorithm for the capacitated vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 1620-1627.
- Chena, S., Chena, R., Wang, G.-G., Gaoa, J., & Sangaiah, A. K. (2017). An adaptive large neighborhood search heuristic for dynamic vehicle routing problems. *Computers and Electrical Engineering*, 596-607.
- Christofides, N. (1981). Exact Algorithms for the Vehicle Routing Problem. *Mathematical Programming*, 255-282.
- Cissé, M., Yalçındağ, S., Kergosien, Y. L., Şahin, E., Lenté, C., & Matta, A. (2017). OR problems related to Home Health Care: A review of relevant routing and scheduling problems. *Operations Research for Health Care*, 1-22.
- Clarke, G., & Wright, W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operation Research*, 568-581.
- Coelho, V. N., Grasas, A., Ramalhinho, H., Coelho, I. M., Souza, M. J., & Cruz, R. C. (2016). An ILS-based algorithm to solve a large-scale real heterogeneous fleet VRP with multi-trips and docking constraints. *European Journal of Operational Research*, 367-376.

- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2014). Logistics inefficiencies in latin american landlocked countries. *FAL Bulletin*, 7.
- Cordeau, J.-F. (2007). Vehicle Routing. *Handbook in OR & MS*, 368.
- Cordeau, J.-F., Laporte, G., Savelsbergh, M., & Vigo, D. (2007). *Handbook in OR & MS*. Montreal: Elsevier B.V.
- Dabia, S., Ropke, S., Woensel, T. v., & De Kok, T. (2012). Branch and Price for the Time Dependent Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Transportation Science*, 1-17.
- Dantzig, B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 80-91.
- Das, S., & Borthakur, M. (2006). A Mixed Constrained (Identical) Vehicle Routing Problem for Time Minimisation. *OPSEARCH*, 31–48.
- de Magalhaes, J. M., & de Sousa, J. P. (2006). Dynamic VRP in pharmaceutical distribution - a case study. *Central European Journal of operations Research*, 177–192.
- Dechampai, D., Tanwanichkul, L., Sethanan, K., & Pitakaso, R. (2017). A differential evolution algorithm for the capacitated VRP with flexibility of mixing pickup and delivery services and the maximum duration of a route in poultry industry. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1357 - 1376.
- Dong, G., Tang, J., Keung Lai, K., & Kong, Y. (2009). An exact algorithm for vehicle routing and scheduling problem. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 789 - 799.
- Dorigo, M. (1992). Ant Colony Optimization: An overview and Recent Advances. En M. Dorigo, *Ant Colony: A new Heuristic* (pág. 34). Bruxelles: Institut de Recherches Interdisciplinaires.
- Dror, M. L. (1993). Vehicle routing with stochastic demands and restricted failures. *Mathematical methods of Operation Research*, 273–283.
- Ekşioğlu, B., Vural, A. V., & Reisman, A. M. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers and Industrial Engineering*, 1472-1483.

- Ertogral, K., Darwish, M., & Ben-Daya, M. (2007). Production and shipment lot sizing in a vendor–buyer supply chain with transportation cost. *European Journal of Operational Research*, 1592-1606.
- Euchi, J., Yassine, A., & Chabchoub, H. (2015). The dynamic vehicle routing problem: Solution with hybrid metaheuristic approach. *Swarm and Evolutionary Computation*, 41-53.
- Ferrucci, F., Bock, S., & Gendreau, M. (2013). A pro-active real-time control approach for dynamic vehicle routing problems dealing with the delivery of urgent goods. *European Journal of Operational Research*, 130-141.
- Figliozzi, M. A. (2010). An iterative route construction and improvement algorithm for the vehicle routing problem with soft time windows. *Transportation Research Part C*, 668-679.
- Fu, Q., Zhou, K., Qi, H., & Wu, T. (2016). Application of Discrete Ant Colony Optimization in VRPTW. *Communications in Computer and Information Science*, 204-218.
- Garaix, T., Artigues, C., Feillet, D., & Josselin, D. (2010). Vehicle routing problems with alternative paths: An application to on-demand transportation. *European Journal of Operational Research*, 62-75.
- García Jiménez, B., & Gómez González, F. (2013). Logistic Model For the Distribution of Goods in the E-Grocery. *15th Int. Conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistics Modeling and Simulation, HMS 2013*, (págs. 111 - 118). Athens, Greece.
- Gillett, B. E., & Miller, L. R. (1974). A Heuristic Algorithm for the Vehicle-Dispatch Problem. *Operations Research*, 340 - 349.
- Glover, F. (1989). Tabu Search - Part 12. *Journal of Computing*, 190 - 207.
- Granville, V., Krivanek, M., & Rasson, J. (1994). Simulated annealing: A proof of convergence. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 652–656.
- Hamdi, K., Labadie, N., & Yalaoui, A. (2014). Vehicle routing problem for Hazardous Materials transportation: An overview. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, (págs. 632-636). Selangor; Malaysia.

- Hoang, S. L., & Louati, A. (2016). Modeling municipal solid waste collection: A generalized vehicle routing model with multiple transfer stations, gather sites and inhomogeneous vehicles in time windows. *Waste Management*, 34-49.
- Huang, M., & Hu, X. (2012). Large scale vehicle routing problem: An overview of algorithms and an intelligent procedure. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 5809-5819.
- Huang, S.-H., & Lin, P.-C. (2015). Vehicle routing–scheduling for municipal waste collection system under the “Keep Trash off the Ground” policy. *OMEGA*, 24-37.
- Jiang, J., Gee, Bong, S., Arokiasam, W. A., & Chen, K. T. (2014). Solving Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand Using Multi-objective Evolutionary Algorithm. *Proceedings - 2014 International Conference on Soft Computing and Machine Intelligence*, (págs. 121-125.). New Delhi, India.
- Jiang, J., Gee, S., Arokiasami, W., & Tan, K. (2014). Solving vehicle routing problem with stochastic demand using multi-objective evolutionary algorithm. *Solving vehicle routing problem with stochastic demand using multi-objective evolutionary algorithm* (págs. 121-125). New Delhi: 1st International Conference on Soft Computing and Machine Intelligence.
- Johnson, J. (1999). Strategic Integration in Industrial Distribution Channels: Managing the Interfirm Relationship as a Strategic Asset. *Journal of the Academic of Marketing Science*, 4-18.
- Kara, I., & Bektas, T. (2006). Integer linear programming formulations of multiple. *European Journal of Operational Research*, 1449–1458.
- Karaoglan, I., & Altiparmak, F. (2010). A Hybrid Genetic Algorithm for the Location-Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery. *Computers and Operations Research*, 25 - 32.
- Kim, G., Ong, Y. S., Heng, C., Tan, P., & Zhang, N. (2015). City Vehicle Routing Problem (City VRP): A Review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1654-1666.
- Lai, W., Li, R., Xie, L., & Qi, M. (2016). The vehicle routing for power grid material distribution: a case study in China. *13th International Conference on Service Systems and Service Management*, (págs. 1-13). Nanjing, China.

- Laporte, G. S. (2002). Classical heuristics for the capacitated VRP. *SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications.*, 109–128.
- Larsen, A., Madsen, O. B., & Solomon, M. M. (2008). Recent Developments in Dynamic Vehicle. *Recent Developments in Dynamic Vehicle*, 199-218.
- Lau, H. C., Chan, T. M., Tsui, W. T., & Pang, W. K. (2010). Application of Genetic Algorithms to Solve the Multidepot Vehicle Routing Problem. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 50-62.
- Lawrence, D. (1991). *Handbook of genetic algorithms*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Lii, P., & Kuo, F.-I. (2016). Innovation-oriented supply chain integration for combined competitiveness and firm performance. *International Journal of Production Economics*, 142-155.
- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G., Chung, S. H., & Lam, H. Y. (2014). Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 1118-1138.
- Lin, S., & Kernighan, B. W. (1973). An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem. *Operations Research*, 498–516.
- Malakooti, B. (2013). Operations and Production Systems with Multiple Objectives. *Supply Chain and Transportation*, 51.
- Markov, I., Varone, S., & Bierlaire, M. (2015). Integrating a heterogeneous fixed fleet and a flexible assignment of destination depots in the waste collection VRP with intermediate facilities. *Transportation Research Part B: Methodological*, 256-273.
- Mavrovouniotis, M., & Yang, S. (2015). Ant algorithms with immigrants schemes for the dynamic vehicle routing problem. *Information Sciences*, 456-477.
- Mentzer, J., DeWitt, W., Keebler, J., Min, S., Nix, N., & Smith, C. (2001). Defining Supply Chain Management. *Journal of Business Logistics*, 3-5.
- Michel, V. P., Gendreau, C. G., & Medaglia, A. (2011). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 1-11.
- Min, H. (1989). The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick up points. *Transportation Research*, 377-386.

- Min, H., Current, J., & Schilling, D. (1992). The multiple depot Vehicle Routing Problem with Backhauling. *Journal of Business Logistics*, 259-288.
- Mir, A., Hassani, S., & Abolghasemi, N. (2011). A particle swarm optimization algorithm for open vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 58-70.
- Oliveira, R. R., Mauceri, S., Carroll, P., & Pallonetto, F. (2017). A Genetic Algorithm for a Green Vehicle Routing Problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 65-74.
- Petrović, G., Madić, M., & Antucheviciene, J. (2018). An approach for robust decision making rule generation: Solving transport and logistics decision making problems. *Expert Systems with Applications*, 263-276.
- Pillac, M. V., Gendreau, C. G., & Medaglia, A. (2011). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 1-11.
- Pillac, V., Guéret, C., & Medaglia, A. L. (2012). An event-driven optimization framework for dynamic vehicle routing. *Decision Support Systems*, 414-423.
- Pino, R., Villanueva, V., Martínez, C. A., Lozano, J., Del Pino, B., & Andrés, C. F. (2011). Heuristic solutions to the vehicle routing problem with capacity constraints. *Proceedings of the 2011 International Conference on Artificial Intelligence*, (págs. 634-640). Las Vegas, Nevada, Estados Unidos.
- Poonthalir, G., & Nadarajan, R. (2017). A Fuel Efficient Green Vehicle Routing Problem with varying speed constraint (F-GVRP). *Expert Systems With Applications*, 131-144.
- Psaraftis, H. (1988). Dynamic vehicle routing problems. *Vehicle Routing: Methods and Studies*, 223-248.
- Ralphs, T., Hartman, J., & Galati, M. (2001). *Capacitated vehicle routing and some related problems*. Newark, USA: Rutgers University.
- Ramachandiran, R., Suresh Joseph, K., & Ravisasthiri, P. P. (2015). A comprehensive study on the recent variants of the VRP and its solving methodologies. *International Journal of Applied Engineering Research*, 43635-43644.
- Reimann, M., Tavares, R., & Bogendorfe, E. (2014). Joint Optimization of Production Planning and Vehicle. *Pesquisa Operacional*, 189-214.

- Renko, S., & Ficko, D. (2010). New logistics technologies in improving customer value in retailing service. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 216-223.
- Sabri, E., & Beamon, B. (2000). A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *The international Journal of Management Science*, 581-598.
- Silva, E. R., Kokkinogenis, Z., Câmara, Á., & Ulisses, J. (2016). An exploratory study of taxi sharing schemas. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, (págs. 247-252). Rio de Janeiro.
- Solomon, M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problem with time. *Operations Research*, 254–265.
- Son, L. H. (2014). Optimizing Municipal Solid Waste collection using Chaotic Particle Swarm Optimization in GIS based environments: A case study at Danang city, Vietnam. *Expert Systems with Applications*, 8062-8074.
- Soonpracha, K., Mungwattana, A., & Janssens, G. K. (2014). Heterogeneous VRP review and conceptual frameworks. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*. Hong Kong.
- Taha, H. (2004). *Investigación de Operaciones*. México DF, México: Pearson Educación.
- Talarico, L., Sörensen, K., & Springael, J. (2015). The k-dissimilar vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 129-140.
- Tlilia, T., Harzia, M., & Krichen, S. (2016). Swarm-based approach for solving the ambulance routing problem. *Internation Conference on Knowledge based and intelligent information and engineering* , (págs. 350-357). Belgrade, Serbia.
- Toffoloa, T. A., Christiaens, J., Malderena, S. V., Wauters, T., & Berghe, G. V. (2017). Stochastic local search with learning automaton for the swap-body vehicle routing problem. *Computers and Operations Research*, 68-81.
- Toth, P. V. (2002). An overview of vehicle routing problems. *SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications*. SIAM, 1–26.

- Verhoeven, M., & Aarts, E. (1995). A parallel 2-opt algorithm for the Traveling Salesman Problem. *Future Generation Computer Systems*, 175-182.
- Wang, Y., He, Y., He, L., & Xing, L. (2016). Bio-inspired algorithms applied to the multi-objective vehicle routing problem: Frameworks and applications. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 3997-4009.
- Wassan, N., Wassan, N., Nagy, G., & Salhi, S. (2016). The Multiple Trip Vehicle Routing Problem with Backhauls: Formulation and a Two-Level Variable Neighbourhood Search. *Computers & Operations Research*, 454-467.
- Webster, J., & Watson, R. T. (2002). Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. *MIS Quarterly*, 13 - 23.
- Wei, L., Zhang, Z., Zhang, D., & Leung, S. C. (2017). A simulated annealing algorithm for the capacitated vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. *European Journal of Operational Research*, 843-859.
- Wen, L., & Eglese, R. (2014). Minimum cost VRP with time dependent speed data and congestion charge. *Computers and Operations Research*, 41-50.
- Xu, Z., & Tang, J. (2014). A Coordination-based Two stage Algorithm for Pickup and Delivery of Customers to Airport. *7th International Conference on Management Science and Engineering Management*, (págs. 815-826). Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- Yanik, S., Bozkaya, B., & deKervenoael, R. (2013). A new VRPPD model and a hybrid heuristic solution approach for e-tailing. *European Journal of Operational Research*, 879-890.
- Yeng, Y., & Lan, C. (2016). Adaptive memory artificial bee colony algorithm for green vehicle routing with cross docking. *Applied Mathematical Modelling*, 9302-9315.
- Yiko, K. (2014). Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time-dependent vehicle routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 157-165.
- Young Hae, L., & Sook Han, K. (2002). Production–distribution planning in supply chain considering capacity constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 169-190.

- Zachariadis, E. E., Tarantilis, C. D., & Kiranoudis, C. T. (2015). Vehicle routing strategies for pick-up and delivery service under two dimensional loading constraints. *Operational Research International Journal*, 115–143.
- Zhen, T., & Zhang, Q. (2010). Iterated variable neighborhood descent algorithm for the capacitated vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 1620-1627.
- Zhenfeng, G., Yang, L., Xiaodan, J., & Sheng, G. (2017). The Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows Using Genetic Algorithm. *Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference*. Dalian, China: 635 - 639.