

**ESTADO DEL ARTE PARA EL DISEÑO DE UNA CADENA DE RECUPERACIÓN DE
LLANTAS USADAS EN EL CONTEXTO URBANO CONSIDERANDO LAS
DECISIONES DEL RUTEO DE VEHÍCULOS**



AUTOR

CARLOS MANUEL RINCÓN PARRA

**UNIVERSIDAD DE IBAGUÉ
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE INDUSTRIAL**

Ibagué, Tolima

2018

**ESTADO DEL ARTE PARA EL DISEÑO DE UNA CADENA DE RECUPERACIÓN DE
LLANTAS USADAS EN EL CONTEXTO URBANO CONSIDERANDO LAS
DECISIONES DEL RUTEO DE VEHÍCULOS**



AUTOR

CARLOS MANUEL RINCÓN PARRA

Presentado para optar al título de: Ingeniero Industrial

DIRECTORES

Profesor. ANDRÉS ALBERTO GARCÍA LEÓN

Profesor. FLAMINIO VERA MÉNDEZ

UNIVERSIDAD DE IBAGUÉ

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA DE INDUSTRIAL

Ibagué, Tolima

2018

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	1
Objetivos	1
General.....	1
Específicos	1
Metodología	2
Introducción	3
1. Capítulo I: El problema de ruteo de vehículos como principal herramienta para el diseño de rutas y su relación con las cadenas de suministro	4
1.1 VRP homogéneo	6
1.1.1 VRP con ventanas de tiempo <i>VRPTW –VRP with Time Windows-</i>	6
1.1.2 VRP con Backhails <i>VRPB –VRP with Backhails</i> -.....	9
1.1.3 Problema de enrutamiento de vehículos capacitados con restricciones de distancia <i>DCVRP –Distance and Capacitated VRP</i> –.....	11
1.1.4 Problema de enrutamiento de vehículos con entrega dividida <i>SDVRP –Split Delivery VRP–</i>	12
1.2 VRP heterogéneo	12
1.2.1 VRP estocástico <i>SVRP –Stochastic VRP–</i>	13
1.2.2 VRP con flota heterogénea <i>HFVRP –Heterogeneous Fleet VRP–</i>	14
1.2.3 VRP con múltiples depósitos <i>MDVRP –Multi-Depot VRP-</i>	15
1.2.4 VRP con múltiples viajes <i>MTVRP –Multi-Trip VRP-</i>	16
1.2.5 VRP Periódico <i>PVRP – Periodic VRP-</i>	18
1.3 Nuevas tendencias	18
1.3.1 Problema de enrutamiento de vehículos verde	18
1.3.2 Implementación de nuevas tecnologías	20
1.3.3 El problema de enrutamiento del vehículo eléctrico <i>EVRP -Electric Vehicle Routing Problem-</i>	23
2. Capítulo II: Caracterización de casos empíricos relacionados con el diseño de cadenas de abastecimiento inversas considerando decisiones del VRP	29
2.1 Caso I: Planificación de un sistema de recolección para aceite de cocina post-uso en Portugal.....	29
2.2 Caso II: Sistema de recolección de materiales reciclables en Portugal	35

2.3 Caso III: Enrutamiento de vehículos para la recolección eco-eficiente de desechos plásticos domésticos en la ciudad de Wageningen, Países Bajos	41
2.4 Caso IV: Enrutamiento de vehículos en logística inversa para el reciclaje de productos electrónicos de consumo al final de su vida útil en Corea del Sur	48
2.5 Caso V: Una Solución al Enrutamiento de Vehículos en Ciudades Montañasas Considerando Aspectos Ambientales y Económicos, caso Manizales.	55
3. Capítulo III: Aspectos relevantes del ruteo de vehículos para el diseño de una cadena dedicada a la recuperación de llantas usadas en el contexto urbano	59
3.1 Red de carreteras	59
3.2 Depósitos.....	60
3.3 Clientes.....	61
3.4 Vehículos.....	62
3.5 Conductores.....	63
3.6 Recolectores	64
Conclusiones, contribuciones y limitaciones	67
Conclusiones	67
Contribuciones	67
Limitaciones	67
Bibliografía.....	68

Resumen

En el siguiente documento se presenta el resultado de una exhaustiva revisión bibliográfica relacionada con el diseño de rutas bajo el enfoque del problema de ruteo de vehículos y su aplicabilidad en el diseño de cadenas de abastecimiento, que se expone y analiza mediante el desarrollo de tres ejes principales, cada uno de ellos representado por un capítulo en este estudio.

En el primer capítulo se constituye una base teórica que permite identificar los conceptos fundamentales del instrumento más importante para el diseño de rutas en la investigación operativa y en el sector industrial en la actualidad, el problema de ruteo de vehículos, a través del análisis de su evolución histórica y paralelamente de las diferentes formas de operación que brinda este método. En el segundo Capítulo, con el objetivo de consolidar y afianzar la información propuesta inicialmente, se realiza la caracterización de cinco casos reales propuestos en la literatura, donde se aplican diferentes variantes fundamentadas en la herramienta mencionada anteriormente para la construcción de rutas y finalmente, en el tercer capítulo se realiza la identificación de los aspectos relevantes del problema de ruteo de vehículos para el diseño de un sistema de recolección. Además de la situación actual de la ciudad de Ibagué respecto a estos componentes, de forma tal que con base en información de distintas entidades se procede a realizar diferentes proposiciones; todo lo anterior a fin de establecer un conjunto consolidado de información que sea de utilidad para el modelamiento de una cadena de recuperación de llantas usadas en el sector urbano (caso Ibagué) y dar cumplimiento a los objetivos planteados para esta asistencia de investigación que se referencian a continuación.

Objetivos

General

Identificar las bases conceptuales, premisas teóricas y elementos a considerar para el diseño de una cadena de abastecimiento dedicada a la recuperación de llantas usadas en el contexto urbano considerando las decisiones en el diseño de rutas de vehículos.

Específicos

- Construir un marco teórico que permita identificar las bases conceptuales que intervienen en el diseño de cadenas de suministro desde la perspectiva del diseño de rutas de vehículos.
- Caracterizar casos empíricos referenciados en la literatura científica relacionados en el diseño de cadenas de abastecimiento inversas, considerando las decisiones del diseño de rutas de vehículos.
- Identificar los aspectos relevantes del ruteo de vehículos para el diseño de una cadena dedicada a la recuperación de llantas usadas en el contexto urbano.

Metodología

La metodología que se utilizó para la elaboración del estado del arte se basa en el enfoque propuesto por Newbert (2007), el cual consta de siete fases tal y como se puede observar en la *Figura 1*. La primera etapa tuvo por objeto encontrar las palabras clave, y la selección de los artículos más relevantes al problema, y a partir de estos se desarrollaron nuevas palabras y sinónimos. En la segunda etapa se hizo uso de las palabras clave para formar frases o cadenas de búsqueda que ayudaran a encontrar literatura relevante. En la tercera etapa, la búsqueda se limitó a artículos de revistas de alto impacto en la clasificación de *Scimago SJR* (ubicadas en los cuartiles Q_1 y Q_2) para asegurar la calidad de las publicaciones. Se incluyeron solamente revistas en idioma inglés disponibles en las bases de datos de *ScienceDirect* y *Scopus* principalmente. La búsqueda estuvo restringida al título, resumen y palabras clave de los artículos. El filtro temporal consideró los últimos diez años (2007-2018).

En la cuarta etapa se consolidaron los resultados de búsqueda de las bases de datos y se realizó la eliminación de duplicados. En la quinta etapa se leyeron todos los resúmenes de los artículos restantes para así descartar aquellos que no tuvieran relevancia para el tema. En la sexta etapa se hizo una completa revisión de los artículos seleccionados y por último, se clasificaron los artículos seleccionados.

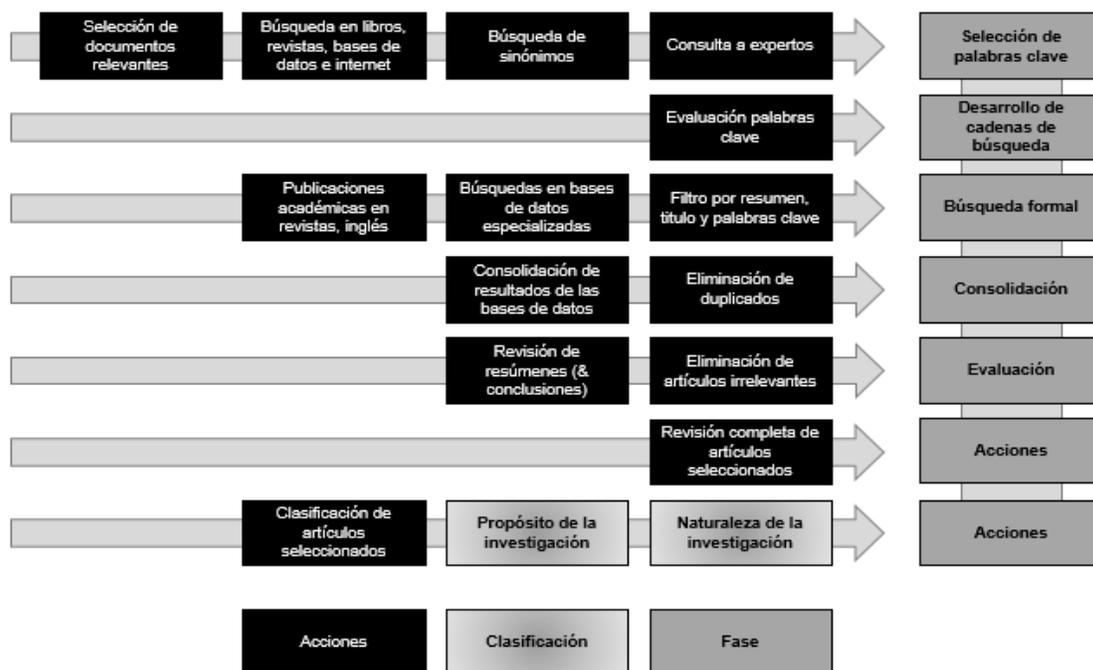


Figura 1. Metodología de la revisión estructurada de la literatura derivada y basada en el trabajo de Newbert (2007)

Fuente: Adaptado de Wolpert & Reuter (2012)

Introducción

El crecimiento rápido y constante de la población en las urbes del mundo es la principal causa del incremento en la generación de residuos sólidos municipales (Costa-Salas, Sarache, & Überwimmer, 2017) afectando directamente distintos ámbitos, generando problemáticas a nivel social, ambiental y con una gran repercusión en la economía.

Producto de lo anterior, la “Logística Verde” basada en la gestión de cadenas de suministro inversas se ha convertido en un tema de relevancia para las organizaciones empresariales y los gobiernos del mundo (Lin, Choy, Ho, Chung, & Lam, 2014), pues para efectos de esta investigación, los neumáticos usados tienen efectos contradictorios sobre la salud humana y el medio ambiente (Costa-Salas et al., 2017) temas de gran importancia para los gobiernos y por otro lado, la imperante necesidad de las organizaciones empresariales ligadas a estas piezas de integrar la logística inversa en sus cadenas de suministro para potenciar su economía mediante la recuperación del valor económico de estos elementos y para dar cumplimiento a las normativas ambientales cada vez más rigurosas por la situación actual del planeta en este sentido (Dhouib, 2014). Los neumáticos cuentan con características que permiten dar distintos usos a estos al final de su vida útil, como: material combustible, en aplicaciones de ingeniería civil como material para choques, material de pavimento en carreteras, en aplicaciones marinas como material rompe olas, en la construcción de arrecifes artificiales, y como componente en la construcción de otros materiales, entre otras características.

La logística inversa se ha convertido debido a las tendencias actuales, en una de las operaciones principales en el diseño y gestión de las cadenas de abastecimiento (Govindan, Soleimani, & Kannan, 2015); dentro del diseño de la red es de vital importancia la recolección y el transporte del material, para este caso de las llantas usadas (Dhouib, 2014); reafirmando este concepto, Jaunich (2016) afirma que el proceso de recolección de desechos representa más del 40% del costo total de la gestión de desechos sólidos municipales.

Por lo anterior, existe un interés creciente en el problema de enrutamiento de vehículos (*-Vehicle Routing Problem VRP-* por sus siglas en inglés) como una alternativa de solución viable y efectiva para el diseño de rutas (Soleimani, Chaharlang, & Ghaderi, 2018), mediante el estudio de nuevos métodos basados en la minimización del tiempo y de los costos que simultáneamente incrementen el margen de ganancia y minimicen el impacto ambiental; este ahorro generaría la posibilidad de implementar diferentes actividades; *“Los ahorros en el costo del transporte podrían tener un impacto potencial en las actividades de comercialización de productos reciclados y remanufacturados en cadenas de logística inversa”* (Soleimani et al., 2018). Por este motivo, la implementación del VRP para la recolección de residuos es uno de los temas más estudiados actualmente.

La contribución de esta asistencia es proporcionar una exhaustiva revisión de literatura relacionada con el *problema de ruteo de vehículos* que permite identificar las bases conceptuales

que intervienen en el diseño de cadenas de suministro desde la perspectiva del diseño de rutas. En adición, la caracterización de casos empíricos relacionados en el diseño de cadenas y finalmente, el planteamiento de perspectivas para posteriores estudios a través de la identificación de componentes relacionados y una serie de proposiciones para el modelamiento de una cadena de recolección en el contexto urbano de la ciudad de Ibagué.

El resto de este documento está organizado de la siguiente manera: **1. Capítulo I:** *El problema de ruteo de vehículos como principal herramienta para el diseño de rutas y su relación con las cadenas de suministro*, **2. Capítulo II:** *Caracterización de casos empíricos relacionados con el diseño de cadenas de abastecimiento inversas considerando decisiones del VRP*, **3. Capítulo III:** *Aspectos relevantes del ruteo de vehículos para el diseño de una cadena dedicada a la recuperación de llantas usadas en el contexto urbano* y finalmente las *Conclusiones, contribuciones y limitaciones*.

1. Capítulo I: El problema de ruteo de vehículos como principal herramienta para el diseño de rutas y su relación con las cadenas de suministro

El problema de ruteo de vehículos es una de las técnicas más estudiadas en el campo de la investigación operativa; esta inicialmente tiene como finalidad la construcción de R rutas para una flota v de V vehículos, con el objetivo de servir a un determinado número C de clientes. Dentro de las condiciones generales de este problema de optimización combinatoria, se encuentra que un determinado vehículo de la flota V , debe visitar a cada cliente exclusivamente una vez, su recorrido debe iniciar y finalizar en un determinado depósito D , y finalmente el cumplimiento de determinadas restricciones laterales (Çağrı Koç & Laporte, 2018), planteadas según la variante específica de estudio, las cuales son analizadas detalladamente a continuación basados en la evolución histórica de este problema. Es importante resaltar que esta investigación se enfoca y direcciona bajo este problema debido a que es la principal herramienta para el diseño de rutas.

Problema de ruteo de vehículos VRP –Vehicle Routing Problem-

El problema de ruteo de vehículos **VRP** fue introducido por **George Bernard Dantzig** y por **J.H Ramser** en **1959** (Braekers, Ramaekers, & Van Nieuwenhuyse, 2016), presentando el “Problema de despacho de camiones” el cual modela y describe un problema del mundo real relacionado con la distribución de combustible desde un centro de operaciones a diferentes estaciones de servicio; este tiene como objetivo construir rutas para una flota de vehículos homogéneos con el fin de servir a un conjunto de clientes minimizando la distancia recorrida incidiendo directamente en otros factores producto del objetivo mencionado (Çağrı Koç & Laporte, 2018). Cuando el número de clientes aumenta, las posibilidades de ruta incrementan drásticamente, lo que permite potenciar y optimizar el resultado de la prueba a realizar reflejado en la carga (Lin et al., 2014). Los autores referenciados anteriormente, propusieron para el desarrollo del problema de enrutamiento un algoritmo basado en programación lineal entera con el objetivo de acercarse a la solución óptima.

El problema de ruteo de vehículos, es el resultado de la generalización del problema del agente viajero TSP -*Travelling Salesman Problem*- por sus siglas en inglés, introducido por Merrill M. Flood en 1956 y su nombre se debe a que el problema describe una situación donde un vendedor debe visitar un determinado número de ciudades, teniendo en cuenta que debe iniciar y terminar su recorrido en una “ciudad origen”. El objetivo es determinar la ruta que permita al vendedor visitar cada una de las ciudades exclusivamente una vez regresando al punto origen, minimizando la distancia total del recorrido (Medina, Rotta, & Castro, 2011). La diferencia entre los dos problemas referenciados hasta el momento radica en el número de rutas m , puesto que el problema del agente del viajero se basa en una única ruta, número de vehículos $n = 1$, mientras el VRP en un número $n > 1$ de vehículos, es decir más de una ruta, por tal motivo se entiende como la generalización del problema ya mencionado. En la *Figura 2*. se referencia un esquema tomado de Daneshzand (2011), donde se muestra de forma gráfica el conjunto de características relacionadas con este planteamiento .

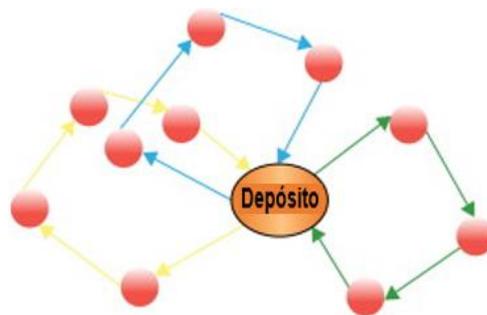


Figura 2. Esquema problema de ruteo de vehículos clásico
Fuente: Adaptado de Daneshzand (2011)

El VRP puede considerarse como un problema de ruteo de vehículos con restricción de capacidad *CVRP -Capacitated Vehicle Routing Problem-* ya que cada vehículo tiene una capacidad que es conocida de antemano y que restringe su carga para el proceso de transporte (Daneshzand, 2011). Existen dos variantes al CVRP: El problema de ruteo de vehículos capacitado asimétrico *ACVRP -Asymmetric CVRP-* que referencia que la matriz de costos o distancias es asimétrica, es decir, no se incurre en la misma distancia, ni tiene el mismo costo ir desde un nodo A a un nodo B, que ir desde el nodo B al nodo A. La otra variante, es el problema de ruteo de vehículos capacitado simétrico *SCVRP -Symmetric CVRP-*, que referencia el caso contrario, cuando la matriz de costos y distancias es simétrica, es decir se incurre en los mismos costos y distancias al ir desde el nodo A hasta el nodo B, que al ir desde el nodo B hasta el nodo A (Daneshzand, 2011). Los supuestos para este modelo son: Las demandas son determinísticas, las demandas no pueden dividirse, La flota de vehículos es homogénea, los vehículos están basados en un único depósito central y se imponen las restricciones de capacidad en los vehículos.

Así mismo, desde este problema se pueden proyectar dos extensiones principales teniendo en cuenta el tipo de flota de vehículos (Leggieri & Haouari, 2017): el VRP con flota homogénea y

el VRP con flota heterogénea. El mayor registro de publicaciones se ha centrado en el VRP homogéneo, lo cual difícilmente es adaptable a la realidad debido a que las flotas heterogéneas son más comunes en la industria (Hoff, Andersson, Christiansen, Hasle, & Løkketangen, 2010). Estos autores clasifican las características de los vehículos y recursos de transporte en tres categorías principales: Dimensiones físicas, restricciones de compatibilidad y costos.

- **Dimensiones físicas:** Referencia aspectos tales como, la longitud, anchura y altura del vehículo que definen su capacidad; El número de bodegas y su capacidad; las dimensiones de las carreteras a transitar, el peso del vehículo, la velocidad del vehículo que se considera como una restricción física.
- **Restricciones de compatibilidad:** Hace referencia a las limitaciones del vehículo, en cuanto al tipo de productos que puede transportar y a los lugares que se puede dirigir.
- **Costos:** Señala los costos en los que se incurre en el mantenimiento y funcionamiento de la flota de vehículos según sea el caso.

Según Hoff et al. (2010), cuando estas características varían entre los vehículos de una misma flota para un determinado caso, se denomina *VRP heterogéneo*, en el caso contrario, se denomina *VRP homogéneo*. Otro enfoque para la homogeneidad y heterogeneidad se plantea para las características de los productos (Hoff et al., 2010). Las extensiones con características de homogeneidad en el problema de ruteo de vehículos se describen en la *Figura 3.* y se analizan detalladamente a continuación.

1.1 VRP homogéneo

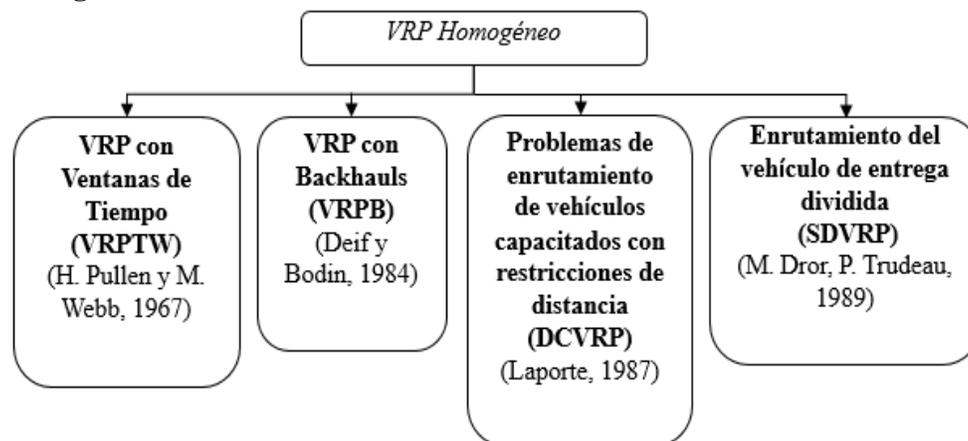


Figura 3. Extensiones del problema de ruteo de vehículos homogéneo

1.1.1 VRP con ventanas de tiempo VRPTW –VRP with Time Windows-

Esta variante fue introducida por **H. Pullen** y **M. Webb** en **1967** (Desaulniers, Madsen, & Ropke, 2014), y considera intervalos de tiempo dentro de los cuales se debe realizar el servicio a cada cliente según corresponda. Esta variante es muy aplicada en diferentes actividades de suministro (directas e inversas), como: entrega de comidas, bebidas, entrega y recolección de

paquetes pequeños, en el transporte de personas y en la recolección de residuos industriales (Schneider, Schwahn, & Vigo, 2017).

Este problema se define como un gráfico dirigido $G = \{V, A\}$, donde V representa el conjunto de nodos y A el conjunto de arcos que conectan estos agentes. El conjunto de nodos V , a su vez se divide en dos subconjuntos $V = \{N, D\}$, donde N representa un conjunto de clientes $N = \{1, \dots, n\}$, y D el conjunto de depósitos, siendo esto adaptable según el caso de estudio. De igual forma, se considera un conjunto de camiones R asociado a una variable m que denota la cantidad de vehículos pertenecientes a este y como Q_k la capacidad del vehículo k . Asociado a los clientes, cada N_i debe tener una demanda no negativa q_i , un tiempo de servicio de igual forma no negativo s_i y una ventana de tiempo $[a_i, b_i]$, intervalo durante el cual el cliente N_i debe ser atendido (Schneider et al., 2017). Hasta el momento en las variantes estudiadas se había señalado como objetivo la minimización de costos de viaje y de la distancia recorrida, para este caso se adiciona la reducción de los tiempos de espera, el número de vehículos requeridos y de tiempos totales de viaje de la flota de vehículos (El-Sherbeny, 2010). Los supuestos de este modelo diferentes a los supuestos del VRP clásico son: Para cada cliente C_i el servicio comienza dentro de la ventana de tiempo, $[a_i, b_i]$, y el vehículo se detiene por S_i instantes de tiempo (Daneshzand, 2011).

Variantes del VRPTW

El VRPTW se puede analizar inicialmente desde tres grandes ejes según la atención oportuna al cliente en el intervalo determinado (Miranda & Conceição, 2016) y a la multiplicidad en las ventanas de tiempo, estas son respectivamente: VRP con ventanas de tiempo suave **VRPSTW** – *VRP with Soft Time Windows*-, VRP con ventanas de tiempo rígidas o difíciles **VRPHTW** – *VRP with Hard Time Windows*-, y el VRP con múltiples ventanas de tiempo **VRPMTW** – *VRP with Multiple Time Windows*-. Debido al impacto y eficacia de esta variante, posteriormente surgieron otras extensiones ligadas a las ventanas de tiempo que se analizan posteriormente. En la *Figura 4*. se referencian las principales extensiones de esta variante:

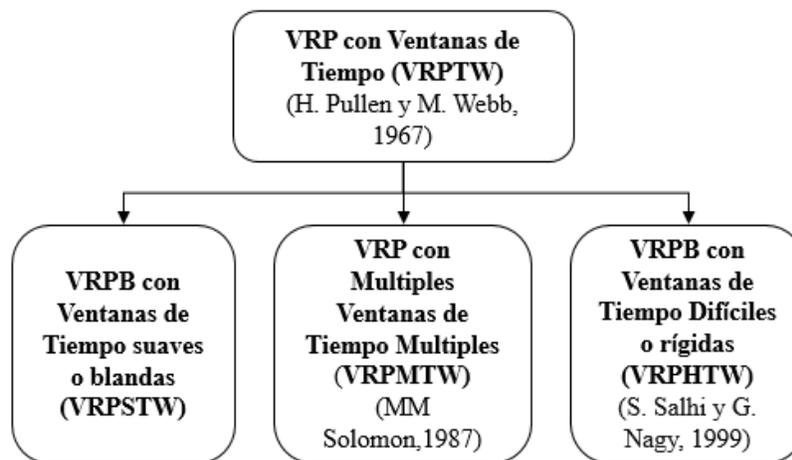


Figura 4. Extensiones del VRP con ventanas de tiempo

1.1.1.1 VRP con ventanas de tiempo suaves **VRPSTW** -VRP with Soft Time Windows-

Esta variante considera la existencia de una penalización por anticipación en la llegada o por tardanza en la misma (Miranda & Conceição, 2016). Producto de esto, las ventanas de tiempo bajo esta característica pueden ser infringidas, sin embargo, se incurrirá en una penalización (costo) que se tiene en cuenta en el modelamiento según sea el caso aplicado. Dada la situación, en que los vehículos no cuentan con la disponibilidad de un lugar para la espera predomina la variante de ventanas de tiempo suave, un claro ejemplo de la aplicación de esta variante se refleja en el problema *Dial a Ride* (Desaulniers et al., 2014), que consiste básicamente en la planeación de rutas y horarios, especificando estaciones entre un punto de origen y un punto destino. El objetivo de este problema es minimizar los costos de viaje del vehículo, maximizando el número de viajeros recogidos en el ya mencionado trayecto.

1.1.1.2 VRP con ventanas de tiempo difíciles o rígidas **VRPHTW** -VRP with Hard Time Windows-

En este caso se prohíbe radicalmente la anticipación en la llegada o la tardanza en la misma (Miranda & Conceição, 2016). Ejemplos de aplicación de esta variante en cadenas de abastecimiento se pueden encontrar el servicio de patrulla de seguridad, entregas bancarias, entregas postales, recolección de desechos industriales, entrega de comestibles, enrutamiento de autobuses escolares y distribución urbana.

1.1.1.3 VRP con múltiples ventanas de tiempo **VRPMTW** -VRP with Multiple time Windows-

Esta variante fue introducida por **MM Solomon** en **1987** (Belhaiza, Hansen, & Laporte, 2014). La aplicabilidad de esta variante se evidencia en operaciones de cadenas de abastecimiento, tales como: en el proceso de entrega de la industria de muebles y minoristas eléctricos, en el cual a los clientes se les ofrece la posibilidad de múltiples periodos de entrega. También, es aplicable a transportes de larga distancia debido a la gran variabilidad en los tiempos a causa de los distintos factores incidentes en este proceso.

La diferencia respecto al VRPTW se basa en la inclusión de un conjunto $W_i = \{[l_i^p, u_i^p], p = 1, \dots, p_i\}$ de p_i ventanas de tiempo, siendo el objetivo la construcción de m rutas de vehículos, con el menor tiempo total de duración posible satisfaciendo los siguientes puntos (Belhaiza et al., 2014):

- Se debe visitar a un cliente exclusivamente una vez, debido a ello un único vehículo debe realizar la visita.
- El servicio al cliente debe ejecutarse durante una de sus ventanas de tiempo, definidas en un conjunto como se expuso anteriormente. Presentado el caso de que el vehículo llegue antes de uno de los intervalos establecidos (conjunto de ventanas de tiempo) debe esperar hasta su inicio.
- La demanda total de los clientes de determinada ruta, no exceden la capacidad del vehículo.

- la duración total de una ruta asignada a un vehículo k no puede exceder un límite superior preestablecido D_k (Duración máxima de la ruta K).

Otras variantes han sido estudiadas en la literatura con una gran relevancia, como lo son: VRP con ventanas de tiempo y backhauls (**VRPBTW** –VRP with Backhauls and Time Windows-), VRP con ventanas de tiempo y flota heterogénea (**HFVRPTW** –Heterogeneous Fleet VRP with Time Windows-) y VRP con Ventanas de Tiempo y Entregas Fraccionadas (**SDVRPTW** –Split Delivery VRP with Time Windows-) que serán analizadas de igual forma en esta revisión. No obstante, dicho estudio se referencia en el espacio respectivo en el que se analice el problema con el cual se liga el VRPTW. Por ejemplo, el **VRPBTW** se referencia en el punto donde se analiza el VRPB, lo anterior con el objetivo de contar con las herramientas suficientes para el entendimiento de la extensión del problema mencionado.

1.1.2 VRP con Backhauls **VRPB** –VRP with Backhauls -

El problema de ruteo de vehículos con backhauls o con retroceso VRPB, divide a los clientes en dos sub-conjuntos (Daneshzand, 2011): Clientes de línea *linehaul* y clientes de línea *backhaul*. El primer tipo de cliente requiere que le sea entregada una cantidad acordada de producto, mientras que los clientes de línea *backhaul* requieren que una cantidad determinada de producto sea recogida. La variante fue expuesta por **I. Deif** y **L.D Bodin** en **1984** y tiene como objetivo la conformación de un conjunto de rutas que satisfagan los siguientes puntos (Çağrı Koç & Laporte, 2018):

- La ruta de cada vehículo debe iniciar y terminar su recorrido en el depósito fijado.
- Cada vehículo se encarga exactamente de una ruta.
- Cada cliente debe ser visitado por un único vehículo.
- En cada ruta primero se visitan los clientes de la línea *linehaul* y luego los clientes de *backhaul*.
- Para cada ruta, las demandas totales asociadas a los clientes *linehaul* y *Backhaul* no excede la capacidad del vehículo.
- El costo total de viaje es minimizado.
- Cada ruta debe contener por lo menos un cliente *linehaul*, mientras que las rutas que contengan solo clientes *backhaul*, no son permitidas.

Las características expuestas anteriormente representan una distribución de tipo mixto, esto representa un impacto directo en ahorros por costos de transporte debido a la reducción significativa en la distancia recorrida en cada ruta. Esta reducción es clave, no simplemente desde la perspectiva económica sino ambiental y social, lo que desde el punto de vista de las cadenas de abastecimiento inversas, base de esta investigación es fundamental.

El objetivo primordial es lograr el equilibrio entre estos tres pilares fundamentales: sociedad, ambiente y economía, y es donde toma relevancia un concepto clave, la *sostenibilidad*, que “Es

una preocupación creciente de la sociedad que exige una postura activa de las organizaciones” (Rodrigues, Ramos, Isabel, & Barbosa-póvoa, 2014). Sin embargo, el VRPB en términos específicos no es óptimo desde este punto de vista debido a que se deben tener más factores en cuenta para acercarse al término expuesto anteriormente. Los sistemas logísticos sostenibles desde su diseño, planificación y ejecución son casi inexistentes por las altas exigencias requeridas (Rodrigues et al., 2014). No obstante, esta variante es una de las posibilidades de mayor trascendencia a tener en cuenta para la planeación de la cadena de abastecimiento inversa por las razones expuestas anteriormente; pero además de ello, es importante considerar otros aspectos de las nuevas tendencias en esta área, por ejemplo la sustitución de combustibles fósiles por otros tipos de energía, el uso de tecnologías (Ej. Google Maps), el estudio de problemas Bi-Objetivo, donde el fin es reducir las emisiones de CO₂ al medio ambiente a través de la minimización en el consumo de combustible y el tiempo de conducción (Demir, Bektaş, & Laporte, 2014), entre otros que serán analizados con mayor profundidad en el punto 1.3 Nuevas tendencias del Capítulo I.

Variantes del VRPB

Debido a la importancia y aplicabilidad en el mundo real de esta variante ha sido objeto de múltiples estudios que han dado como resultado diferentes variantes a este problema, en la *Figura 5*. se presentan las más importantes y son analizadas a continuación:

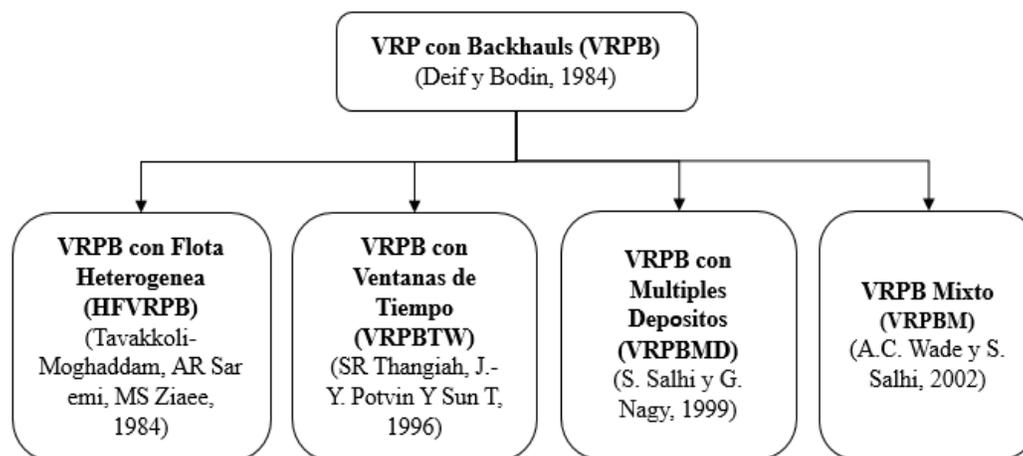


Figura 5. Extensiones del VRP con Backhauls

1.1.2.1 El VRPB con flota heterogénea –VRPB with Heterogeneous Fleet– **HFVRPB**

Fue estudiado por primera vez por **Tavakkoli-Moghaddam , AR Saremi , MS Ziaee** en el **1984** (Çağrı Koç & Laporte, 2018), mediante formulación matemática, en el cual se deben tomar decisiones sobre la estructuración de la flota.

1.1.2.2 VRPB con ventanas de Tiempo **VRPBTW** -*VRPB with Time Windows*-

El problema de ruteo de vehículos con backhauls y con ventanas de tiempo VRPBTW, fue introducido por **SR Thangiah, J.-Y. Potvin y Sun T** en el año 1996 (Çağrı Koç & Laporte, 2018), cuenta con las mismas características del VRPB clásico, con la diferencia de que existen intervalos de tiempo fijos definidos dentro de los cuales el cliente debe ser atendido. Esta variante básicamente es la integración entre el VRPB y el VRPTW.

1.1.2.3 VRPB Con Múltiples Depósitos **VRPBMD** -*VRPB with Multiple Deposits*-

Esta variante fue presentada por **S. Salhi y G. Nagy** en 1999 (Çağrı Koç & Laporte, 2018). La diferencia de esta variante respecto al VRPB clásico radica en el número de depósitos, para este último se realiza el análisis con un único depósito, mientras que para esta variante se tiene en cuenta más de uno y cada uno de los depósitos dependiendo del caso específico de estudio cuenta con sus propios clientes .

1.1.2.4 VRPB Mixto **VRPBM** -*Mixed VRPB*-

Esta variante fue estudiada por primera vez por **A.C. Wade y S. Salhi** en el año 2002 (Çağrı Koç & Laporte, 2018) y consiste en la no obligatoriedad de visitar primero a todos los clientes de la línea *linehaul* y luego a los clientes *backhaul*. Lo anterior, mediante la implementación de un esquema constructivo de inserción basado en la heurística de inserción codiciosa. Posteriormente, se realizaron pruebas bajo parámetros ya conocidos con el objetivo de determinar la eficacia de esta variante identificando que una solución que permite rutas mixtas puede producir costos de ruta significativamente más bajos que una solución para el VRPB clásico (Yazgi Tütüncü, Carreto, & Baker, 2009). Resolver este tipo de problemas tiene una mayor complejidad respecto al VRPB clásico, la razón principal es la restricción de capacidad de los camiones, ya que al permitir realizar entregas y recogidas simultáneas de producto existe una variación significativa en la carga, lo que obliga a realizar una revisión en cada uno de los arcos de la ruta planteada (Yazgi Tütüncü et al., 2009).

Un claro ejemplo de esta variante en las cadenas de abastecimiento es en el proceso de distribución de bebidas en envases retornables, donde de forma simultánea se realiza la entrega de los recipientes llenos del líquido respectivo y la recolección de los envases vacíos.

1.1.3 Problema de enrutamiento de vehículos capacitados con restricciones de distancia **DCVRP** -*Distance and Capacitated VRP* -

Esta variante al CVRP clásico, fue estudiada inicialmente por **G. Laporte** en el año de 1987 (Kek, Cheu, & Meng, 2008), además de la restricción impuesta de capacidad en el vehículo, existe una limitación de distancia, la que impone una distancia máxima que el vehículo puede recorrer.

Supuestos del modelo (diferentes al modelo VRP o CVRP)

- Se imponen restricciones de distancia.

1.1.4 Problema de enrutamiento de vehículos con entrega dividida SDVRP –*Split Delivery VRP*–

Este problema considera un conjunto de vehículos homogéneos y capacitados que deben cumplir con entregas oportunamente a un conjunto de clientes basados en un depósito, el objetivo es minimizar el costo total del viaje. **M. Dror y P. Trudeau en 1989** (Archetti, Bianchessi, & Speranza, 2014) adicionaron esta variante y ha tenido un interés creciente en los últimos años debido a su eficacia demostrada en la reducción de costos con respecto al VRP clásico.

El problema se representa por medio de un grafo no dirigido con un conjunto de nodos y un conjunto de arcos a diferencia del planteamiento del VRP clásico que se representa como un grafo dirigido. Los supuestos que se adicionan en este problema son: La demanda de un cliente N_i puede ser satisfecha por más de un vehículo y la demanda de una determinada ruta, puede ser mayor a la capacidad del vehículo (Archetti et al., 2014).

VARIANTES DEL SDVRP

El problema de enrutamiento de vehículos con entregas divididas cuenta con una variante de gran relevancia y es la conjugación de esta extensión con las ventanas de tiempo. En la *Figura 6*. se detallan características de la variante mencionada.

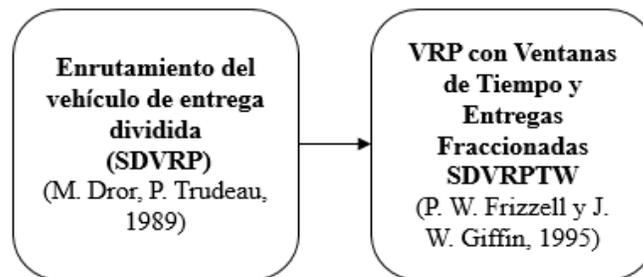


Figura 6. Principal extensión del VRP con entregas divididas

1.1.4.1 VRP con Ventanas de Tiempo y Entregas Fraccionadas **SDVRPTW** –*Split Delivery VRP with Time Windows*–

Esta variante, según Desaulniers, Madsen & Ropke (2014), fue introducida por P. W. Frizzell y J. W. Giffin en el año 1995, mediante la construcción de heurísticas diseñadas especialmente para el problema con una estructura de red especial.

1.2 VRP heterogéneo

Las variantes con características de heterogeneidad son de gran importancia en la aplicación de casos reales, pues en la industria, en la mayoría de los casos se cuenta con flotas heterogéneas debido a una razón clave: la adquisición de una flota regularmente se da para un largo periodo de tiempo (Hoff et al., 2010), lo que genera que los vehículos respecto a los adquiridos posteriormente tengan diferentes características debido al desarrollo tecnológico y a otras situaciones del mercado. Según el mismo autor, los costos ligados a los vehículos (operación,

mantenimiento y depreciación) varían a lo largo de la vida útil de los mismos, lo que soporta el argumento inicial.

Existen dos razones fundamentales para mantener este tipo de flota: Las limitaciones operativas y los beneficios inherentes a la versatilidad. Estos son aspectos claves a tener en cuenta en el diseño de las rutas para las cadenas de abastecimiento inversas, base de esta investigación. De igual forma, para efectos de la aplicabilidad de este caso en el contexto urbano se debe tener en cuenta la decisión si la flota para el proceso de recolección de las llantas será propia teniendo en cuenta los costos de poseer y mantener o se opta por la subcontratación. Existen distintas variantes a este planteamiento (Çaři Koç, Bektaş, Jabali, & Laporte, 2016), que se resumen en la *Figura 7.* y son descritas a continuación:

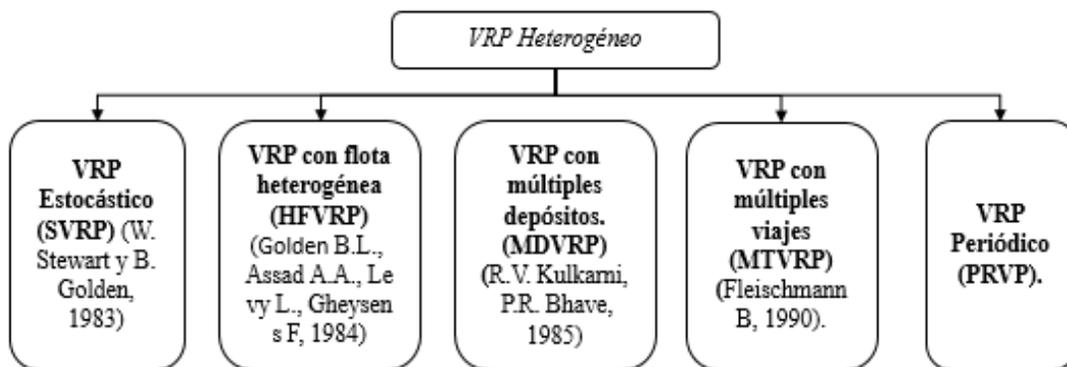


Figura 7. Variantes principales del VRP con características de homogeneidad

1.2.1 VRP estocástico SVRP –*Stochastic VRP*–

El VRP estocástico fue introducido formalmente por **W. Stewart y B. Golden** en **1983** (Bertazzi & Secomandi, 2016) al considerar eventos aleatorios en la definición de las variables del problema tales como: demanda de los clientes, costos y tiempos de viaje. Se puede considerar esta variante desde la aplicabilidad al diseño de rutas para cadenas de abastecimiento inversas ya que no existe certeza en relación a algunos parámetros clave en el proceso de acopio. Un ejemplo es que la cantidad de llantas a recolectar en los determinados puntos de recolección están ligadas a una incertidumbre que depende de variables exógenas al recolector y al punto generador. Esta cantidad será conocida en la llegada a la ubicación del generador comercial. De igual forma, parámetros como el tiempo de servicio que depende a su vez de las llantas a recolectar, y el tiempo de viaje están ligados a una variabilidad. En el primer caso, porque el proceso de carga al vehículo recolector depende del número de llantas y el segundo caso, a distintas variables que hacen que no exista certeza de la duración de un recorrido, analizando la situación desde un enfoque más ajustado a la realidad. En la *Figura 8.* se resumen las principales variantes a esta extensión:

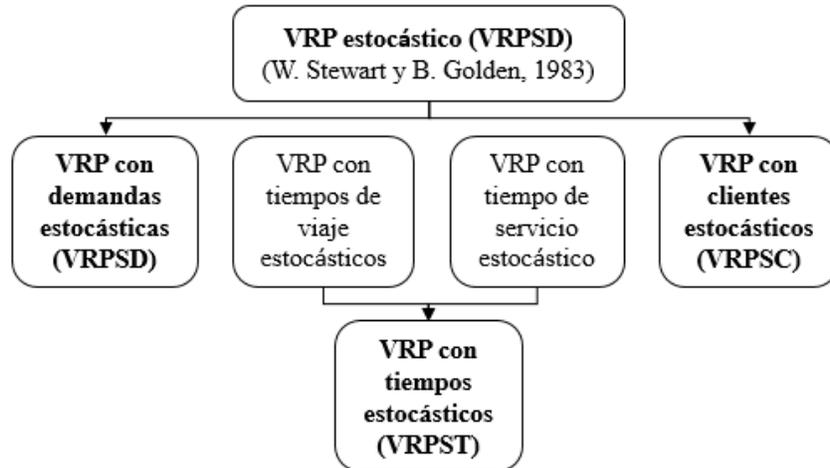


Figura 8. Extensiones del VRP estocástico

1.2.1.1 VRP con demandas estocásticas **VRPSD** –*VRP with Stochastic Demands* –

D. Bertsimas entre los años de 1988 y 1992 realizó las contribuciones más importantes a este problema y estableció las definiciones más relevantes en el área, proporcionando la mayor parte del conocimiento que se tiene actualmente sobre esta variante (Juan et al., 2011). El VRPSD se define como un gráfico $G = (V, E)$ al igual que el VRP clásico, donde V es un conjunto de nodos y E un conjunto de arcos; cuyo objetivo es la construcción de un conjunto de rutas que permitan satisfacer las demandas bajo incertidumbre de los clientes con un costo mínimo esperado. Las características inherentes al transporte y al depósito se mantienen igual, existe una variación clave y es como su nombre lo indica en el comportamiento de la demanda de los clientes. La demanda de cada cliente V_i tiene una variable aleatoria que se ajusta a su comportamiento denominada D_i , estas variables son completamente independientes y se conocen sus distribuciones de probabilidad; los mismos autores plantean que la demanda real de un cliente solo se conoce en el momento que se llega a la ubicación del mismo (Bertazzi & Secomandi, 2016).

1.2.1.2 VRP con tiempos estocásticos **VRPST** –*VRP with Stochastic Times*–

El problema de ruteo de vehículos con tiempos estocásticos, referencia básicamente que los tiempos de viaje y de servicio varían, este factor es de gran relevancia en la implementación del modelo.

1.2.1.3 VRP con clientes estocásticos **VRPSC** –*VRP with Stochastic Clients* –

En el problema de enrutamiento de vehículos con clientes estocásticos, no se conoce con certeza el conjunto de clientes y cada uno de ellos tiene una probabilidad p de estar presente o una probabilidad (1-p) de estar ausente.

1.2.2 VRP con flota heterogénea **HFVRP** –*Heterogeneous Fleet VRP*–

Esta variante fue propuesta por Golden B.L., Assad A.A., Levy L., Gheysens F en 1984 (Çalrı Koç et al., 2016) convirtiéndose en un área de alto interés de investigación. Esta considera una flota ilimitada de vehículos capacitados, donde cada uno de estos cuenta con un costo fijo con el

fin de servir a un conjunto de clientes con demandas conocidas. En esta variante, se debe decidir sobre las rutas de los vehículos como en el VRP clásico, pero además sobre la composición de la flota en aspectos tales como: número y tipo de vehículos, haciendo referencia este último a la capacidad de los mismos. Cabe resaltar que en dichas decisiones se deben considerar variables de mercado que afectan directamente la operación como: tasas de transporte, costos de transporte y demanda esperada.

R. Baldacci , M. Battarra , D. Vigo en el 2008 (Liu, 2013) clasifican el HVRP en dos variantes principales: HVRP con costos fijos y costos de enrutamiento dependientes del tipo de vehículo HVRPFD (*Heterogeneous VRP with Vehicle Dependent Routing Fixed Cost*) y HVRP con costos de enrutamiento dependientes del vehículo HVRPD (*Heterogeneous VRP with Vehicle Dependent Routing Cost*), como se muestra en la *Figura 9*.

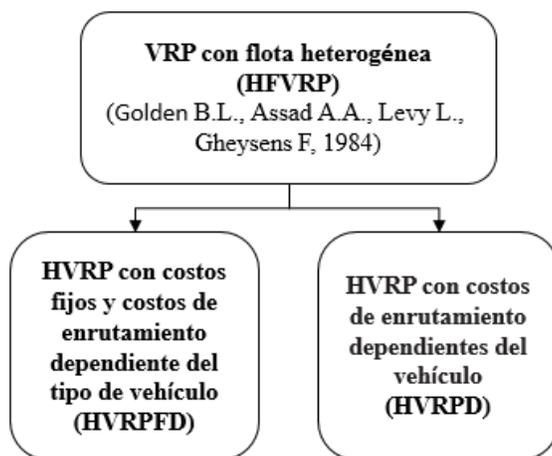


Figura 9. Extensiones del VRP con flota heterogénea

1.2.2.1 HVRP con costos fijos y costos de enrutamiento dependiente del tipo de vehículo **HVRPFD** -Heterogeneous VRP with Vehicle Dependent Routing Fixed Cost- : En Liu (2013) se menciona que C. Gencer, I. Top, E.K. Aydogan en 2006 consideraron conjuntamente los costos fijos y los costos dependientes del tipo de vehículo.

1.2.2.2 HVRP con costos de enrutamiento dependientes del vehículo **HVRPD** - Heterogeneous VRP with Vehicle Dependent Routing Cost- : Esta extensión fue introducida por **ED Taillard** en **1999** (Liu, 2013) al analizar los costos variantes dependientes del vehículo sin considerar los costos fijos.

1.2.3 VRP con múltiples depósitos MDVRP –*Multi-Depot VRP*-

El problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos aparece aproximadamente hacia la década de los años 80 con los trabajos de R.V. Kulkarni, P.R. Bhave en el año 1985 apoyado y continuado por Laporte, Nobert, y Taillefer en el año 1988 y luego por Carpaneto, Dell’amico,

Fischeti, y Toth el año de 1989 (Montoya-Torres, López Franco, Nieto Isaza, Felizzola Jiménez, & Herazo-Padilla, 2015).

Al igual que el VRP clásico, el MDVRP se define como un gráfico $G = (V, E)$ donde V es el conjunto de nodos y E el conjunto de arcos. No obstante, para esta variante el conjunto V se divide en dos subconjuntos: $V_c = \{V_1, V_2, \dots, V_N\}$, que se define como el conjunto de clientes y $V_d = \{V_{N+1}, V_{N+2}, \dots, V_M\}$, que referencia el conjunto de depósitos. Los parámetros inherentes a los clientes y a la flota se definen igual al planteamiento inicial (Montoya-Torres et al., 2015). El objetivo de esta variante es determinar un conjunto de rutas de tal forma que se dé cumplimiento a los siguientes puntos: Cada ruta de vehículo debe iniciar y terminar en el mismo depósito, cada cliente debe ser atendido exclusivamente una vez por un vehículo, la sumatoria de las demandas de los clientes de una ruta no supera la capacidad del vehículo designado para el recorrido de la misma y minimiza el costo total de transporte.

El problema de enrutamiento de vehículos con múltiples depósitos puede verse como un modelo de agrupamiento, puesto que el objetivo es determinar un conjunto de rutas de vehículos agrupados por depósitos (Daneshzand, 2011) y es posible solucionar esta variante en dos etapas: los clientes deben asignarse a los depósitos según su ubicación y mediante el enfoque VRP cada agrupación de clientes con el mismo depósito, debe estar unida por la misma ruta.

En la *Figura 10*. se referencia un gráfico que detalla la diferencia entre el VRP clásico y el VRP con múltiples depósitos.

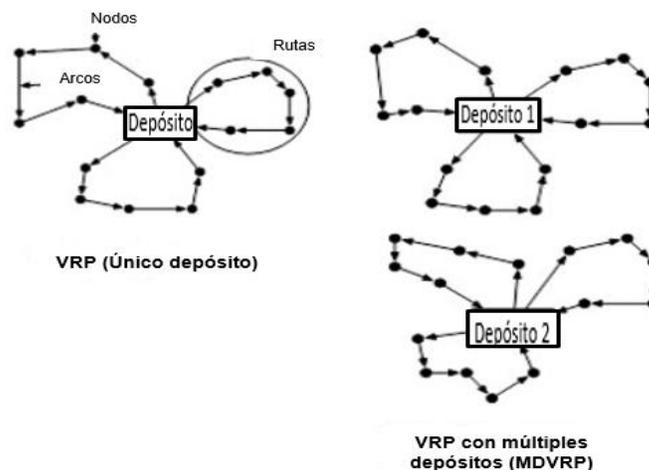


Figura 10. Diferencia grafica entre el VRP clásico y el VRP multi-depósito
Fuente: Adaptado de Montoya-Torres et al. (2015)

1.2.4 VRP con múltiples viajes MTVRP –Multi-Trip VRP-

El MTVRP fue propuesto por **Fleischmann B.** en **1990** (Olivera & Viera, 2007) al plantear que: “Cuando la capacidad del vehículo es pequeña o cuando el período de planificación es grande, la única solución práctica es realizar más de una ruta por vehículo”; en consecuencia, esta variante es analizada bajo un enfoque más realista. Sumado a ello, en la realidad la flota de

vehículos es limitada, factor que no se tiene en cuenta en otros planteamientos del VRP y que obliga a las organizaciones a utilizar los vehículos en más de una ruta. Así mismo, en el transporte urbano donde los tiempos de distribución o recolección son relativamente cortos las empresas optan por cargar nuevamente los mismos vehículos para recorrer otra ruta (Olivera & Viera, 2007).

Este último punto es clave para efectos de esta investigación, debido a que los recorridos a realizar para la recolección de las llantas se van a ejecutar en un contexto urbano, por lo que deberían plantearse los siguientes interrogantes; teniendo en cuenta el contexto ¿Es necesario que cada vehículo ejecute una ruta? o ¿es mejor que alguno de ellos tenga múltiples viajes?

Esta variante se representa por medio de un grafo $G = (V, E)$, donde $V = \{0, 1, \dots, n\}$, es el conjunto de nodos y E el conjunto de arcos. Si $(i, j) \in E$ es posible viajar desde i a j incurriendo en un costo $C_{i,j}$ y un tiempo de viaje $t_{i,j}$. El nodo 0 representa el depósito desde el que inician y terminan el recorrido las diferentes rutas, que se realizan gracias a una flota K de vehículos $K = \{1, \dots, m\}$. Cada vehículo que compone la flota cuenta con una capacidad límite de carga Q , mientras que cada cliente cuenta con una demanda q_i ; así mismo, se tiene en cuenta un horizonte de tiempo T que limita el tiempo de un día de trabajo (Olivera & Viera, 2007).

El MTVRP busca la construcción de un conjunto de rutas que minimicen los costos totales del recorrido, adicionando la condición de que un mismo vehículo tenga la posibilidad de ejecutar más de una ruta (Coelho et al., 2016). Además se debe dar cumplimiento a las siguientes condiciones: La ruta debe iniciar y terminar el recorrido en el depósito, cada cliente está asignado a una única ruta, la sumatoria de la demanda de los clientes de una ruta no excede la capacidad del vehículo Q asignado, cada vehículo puede realizar una (viaje único) o dos rutas (viaje múltiple) y la duración de las rutas asignadas al mismo vehículo no supera el horizonte de tiempo asignado T . En la *Figura 11*. se expone gráficamente la diferencia de esta variante respecto al VRP clásico.

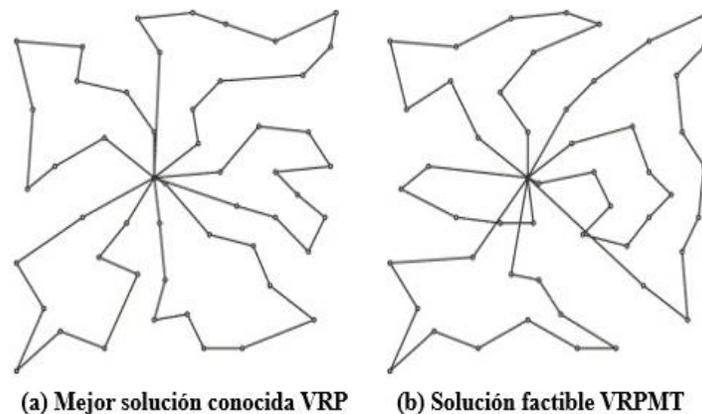


Figura 11. Diferencia grafica entre el VRP clásico y el VRP con múltiples viajes

Fuente: Adaptado de Olivera & Viera (2007)

1.2.5 VRP Periódico PVRP – Periodic VRP-

En esta variante del VRP heterogéneo los clientes requieren el servicio de recolección o distribución en más de una ocasión durante un horizonte de tiempo determinado, mientras que el VRP clásico analiza bajo el enfoque de un único periodo (De Bruecker, Beliën, De Boeck, De Jaeger, & Demeulemeester, 2018). La solución de este problema conduce a tomar dos decisiones bajo un enfoque integrado o de dos etapas:

1. Debe determinarse la **frecuencia semanal de servicio**, es decir, *la frecuencia con que se atiende a cada cliente* y el **patrón de servicio**, en otras palabras, *definir a que clientes se atenderá en que día de la semana*.
2. Resolver el VRP para cada día, teniendo en cuenta a los clientes seleccionados para el día determinado, bajo los planteamientos del VRP clásico.

Para cada día del horizonte de tiempo se deben definir las rutas de tal forma que todos los clientes cuyo horario sea asignado en ese determinado día, sean atendidos. Cabe resaltar que esta variante se ajusta a los requerimientos iniciales de esta investigación, debido a que las características de este problema permiten que sea aplicado en gran medida a problemas de recolección de desechos en los que cada cliente debe ser atendido en varias ocasiones en un periodo de tiempo determinado (Daneshzand, 2011).

1.3 Nuevas tendencias

1.3.1 Problema de enrutamiento de vehículos verde

En los últimos años el problema de ruteo de vehículos VRP ha estado enfocado a la implementación de nuevas tecnologías para el potenciamiento de la productividad en esta área y a la reducción del impacto ambiental que produce la actividad base de este planteamiento (Erdoğan & Miller-Hooks, 2012)(Demir et al., 2014).

El interés en la logística verde ha suscitado una creciente atención en todas las partes interesadas en un determinado proceso de transporte, debido a que las actuales estrategias de logística de distribución en las cadenas de abastecimiento no son sostenibles en el largo plazo (Lin et al., 2014); por lo tanto, esta estrategia plantea tener en cuenta los efectos ambientales, ecológicos y sociales además de los factores económicos del planteamiento inicial para el diseño de políticas logísticas y la respectiva medición de sus factores. Existe una gran variedad de proposiciones en materia de transporte ecológico (Lin et al., 2014), tales como: La promoción de combustibles alternativos, la implementación de vehículos eléctricos de nueva generación, los sistemas de transporte verdes e inteligentes y otras infraestructuras ecológicas.

La variante de mayor relevancia en relación al problema de ruteo de vehículos respecto a la logística verde, es el **problema de ruteo de vehículos verde o GVRP** -*Green Vehicle Routing*

Problem- que trata básicamente la optimización del consumo de energía del transporte a través de la armonización de los costos ambientales y económicos mediante la implementación para el cumplimiento de las medidas ambientales y los parámetros financieros de la organización. En Lin et al. (2014) se plantean tres extensiones principales del problema de ruteo de vehículos verde:

1.3.1.1 Problema de ruteo de vehículos verde **GVRP** -*Green Vehicle Routing Problem*-

El costo total del combustible a base de petróleo representa un porcentaje significativo del costo total de transporte y por ende su consumo es un índice importante en esta variante (Xiao, Zhao, Kaku, & Xu, 2012). Reducir tal índice es el objetivo principal no únicamente por el beneficio económico, sino por la afectación positiva que esta disminución puede causar en el medio ambiente a través de la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero producto del uso de combustibles fósiles. Para la introducción del concepto general detallado anteriormente en un modelo de enrutamiento, es necesario tener en cuenta una serie de variables que influyen en el consumo de combustible y que de acuerdo con el informe del departamento de energía de los Estados Unidos en el 2008 (Lin et al., 2014) son: la velocidad de desplazamiento, el peso de la carga y la distancia de transporte; aspectos a considerar en la cadena de abastecimiento base de esta investigación para minimizar el impacto ambiental, de tal forma que el proyecto sea coherente con su objetivo central.

Haciendo énfasis en una de las proposiciones, la implementación de vehículos que funcionan a base de combustibles alternativos es una gran oportunidad para la ejecución eficiente de la operación de transporte en cadenas de abastecimiento dedicadas a la recolección de desechos, pues por sus características la operación sería congruente con el propósito inicial; no obstante, existe un enorme obstáculo en nuestra región y es la no existencia de estaciones de recarga o reabastecimiento lo que impide su utilización.

1.3.1.2 Problema de Enrutamiento de Contaminación **PRP** -*Pollution Routing Problem*-

El transporte es una actividad fundamental en todas las economías del mundo, su necesaria operatividad genera un gran porcentaje de gases de efecto invernadero y de dióxido de carbono CO_2 . Ejemplo de este hecho es el resultado de un estudio realizado en el Reino Unido, el cual señala que el 6% del total de las emisiones en dicha región se deben al transporte de mercancías por carretera, lo cual tiene un efecto directo en los seres humanos y en todo el ecosistema (Demir et al., 2014), esto corrobora lo planteado por T. Bektaş, G. Laporte en el año 2011 con el objetivo básico de definir un sistema de distribución con menor contaminación mediante un modelo que tiene dos objetivos principales: Minimizar el consumo de combustible y minimizar el tiempo de conducción.

El **PRP** es una aproximación al VRPTW, el cual busca la construcción de un conjunto de n rutas para la satisfacción de la demanda de v clientes dentro de las ventanas de tiempo preestablecidas. Sin embargo, existe una variación fundamental respecto a todas las variantes estudiadas hasta el momento; en este planteamiento, además de determinar la ruta, se establece la velocidad del vehículo en cada segmento de la misma (Demir, Bektaş, & Laporte, 2012), debido a que la

velocidad es uno de los factores que afecta la generación de los gases de efecto invernadero. Lo anterior, es realizado con el fin de minimizar una función objetivo que comprende los costos de combustible, por emisiones y del conductor.

El planteamiento y conclusiones del problema han dado paso al estudio del mismo con flotas de vehículos con características heterogéneas y con condiciones dependientes del tiempo (Lin et al., 2014). Por otro lado, se referencia el interés investigativo actual relacionado con el impacto que tienen las condiciones del tráfico en la generación de emisiones fundamentado en la velocidad del desplazamiento y el cambio constante de aceleración, dando entrada a un concepto tecnológico que puede ser significativo para dar solución a este tipo de problemas y es la información en tiempo real (ejemplo: Google Maps), que permitiría indicar al vehículo en cuestión la ruta más beneficiosa en el momento evitando la afectación ambiental por las razones expuestas anteriormente.

1.3.1.3 VRP en Logística Inversa **VRPRL** –*VRP in Reverse Logistic*-

El VRP es un planteamiento del cual surgen un gran número de extensiones debido a su flexibilidad y aplicabilidad en distintos escenarios, razón por la cual este es pertinente para la formulación de problemas de logística inversa, pues la literatura que relaciona este tema con el problema de ruteo de vehículos es bastante escasa (Lin et al., 2014). La ausencia de investigación ha generado una brecha considerable entre los modelos de enrutamiento de vehículos para la logística inversa y los enfoques de solución para el VRP presentes en la literatura, por ello es pertinente analizar y adaptar la situación determinada a la variante que más se ajuste a los requerimientos del análisis.

1.3.2 Implementación de nuevas tecnologías

El transporte de mercancías ha tenido un crecimiento significativo en los últimos años; por ejemplo en Estados Unidos el incremento fue del 63% entre 1980 y 1997 y se duplicó entre 1970 y 2000 (Santos, Coutinho-Rodrigues, & Antunes, 2011), así mismo, el transporte de mercancías en las ciudades puede representar entre el 20% y 30% del total de distancia recorrida por vehículos en general y del 16% al 50% del total de los contaminantes generados en esta actividad, sumado a esto los costos significativos en el contexto económico y ambiental han generado la necesidad de implementar tecnologías en búsqueda de ventajas competitivas desde el punto de vista de la eficiencia en los procesos de recogida y distribución y en el contexto ambiental.

Para efectos de esta investigación, se analizan dos planteamientos relevantes en relación a la implementación de tecnologías, la primera hace referencia a un sistema de soporte de decisión espacial web (*wSDSS -web-based Spatial Decision Support System-*) para enrutamiento de vehículos utilizando Google Maps, y en la segunda, el problema de enrutamiento del vehículo eléctrico *EVRP –Electric VRP-*.

Sistema de soporte de decisión espacial web (wSDSS) para enrutamiento de vehículos utilizando Google Maps

El objetivo principal de este planteamiento es paralelo al objetivo del problema de ruteo de vehículos clásico, atender a un conjunto de clientes a lo largo de una red de transporte. No obstante, para este caso se tienen una serie de objetivos específicos para la optimización del proceso de distribución los cuales serán detallados más adelante.

El wSDSS implementa Google Maps TM, además de una base de datos, una heurística y una metaheurística de colonia de hormigas (Santos et al., 2011), con el objetivo de construir las rutas óptimas para cada vehículo y la realización de un mapa detallado para la ruta específica y la efectividad de este planteamiento se basa en la adaptabilidad a características reales y específicas del sistema, como lo son: la capacidad del vehículo, las restricciones de tiempo y las restricciones de red (Vías en un solo sentido y giros prohibidos).

En cuanto a los detalles de implementación, en primera medida se definieron los requisitos de entrada y salida y las capacidades analíticas de planificación deseada, esto hace referencia a la posibilidad que brinda el modelo de generar soluciones con enfoques algorítmicos, la generación de mapas e instrucciones para rutas, la generación de una solución y la producción de información de resultados detallada. Respecto a los requerimientos son necesarios (Santos et al., 2011): datos brutos, capacidad de análisis, administración de información de datos y capacidad de visualización gráfica; tales aspectos se evidencian en la Figura 13 .

Con base en los requerimientos mencionados anteriormente y en la naturaleza de los datos, los autores del planteamiento determinaron utilizar el sistema de Google Maps; entonces, el *sistema de soporte de decisión espacial web*, se implementó mediante la inclusión de algoritmos actuales, como heurísticas y metaheurísticas y la implementación de la herramienta web, los datos de cada problema se almacenan en una base de datos. En la *Figura 12*. se presenta la interfaz resultado del planteamiento estudiado.



Figura 12. Interfaz del Sistema de soporte de decisión espacial web (wSDSS)
Fuente: Santos et al. (2011)

De igual forma, en la *Figura 13*, se representa un diagrama de flujo que resume la implementación del planteamiento wSDSS:

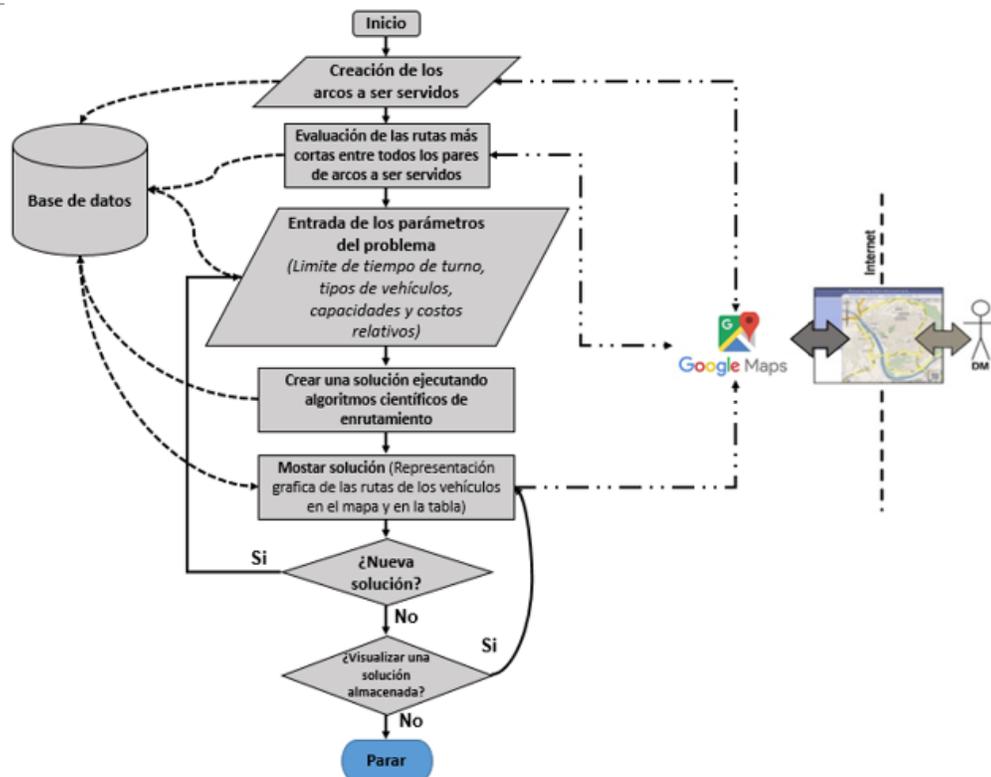


Figura 13. Diagrama de flujo que resume la implementación del wSDSS
Fuente: Adaptado de Santos et al. (2011)

1.3.3 El problema de enrutamiento del vehículo eléctrico EVRP -*Electric Vehicle Routing Problem*-

Existe una tendencia significativa en los últimos años en la utilización de vehículos eléctricos por parte de las organizaciones en sus distintas operaciones, en Montoya, Guéret, Mendoza, & Villegas (2017) se plantean algunos ejemplos que refuerzan el planteamiento inicial, uno de ellos es el caso de la empresa francesa de distribución de electricidad ENEDIS, que al 2016 el 10% de su flota estaba compuesta por vehículos eléctricos, es decir cerca de 2000; una proporción significativa para ser un tema relativamente nuevo. Sin embargo, toda vía existen fuertes limitaciones técnicas en esta área que se han convertido en un impedimento para la adquisición de este tipo de vehículos a gran escala, como lo pueden ser los tiempos de la carga de la batería, la capacidad de la misma y la dificultad del acceso a estaciones de recarga.

Los autores plantean unas estimaciones en relación a los vehículos eléctricos más utilizados en las operaciones de servicio, referenciando que:

- Tiempo mínimo de carga: 0,5 Horas.
- Capacidad de la batería: 22 kWh
- Rango de manejo: 142 km

No obstante, este rango podría ser mucho menor porque el consumo de energía aumenta según algunos factores como lo son: las pendientes, las velocidades de desplazamiento, el uso de calefacción y aire acondicionado, entre otros. El EVRP se comenzó a estudiar a mediados del año 2012, este planteamiento tiene en cuenta las limitaciones de los vehículos eléctricos referenciadas anteriormente y además incluyen rutas con desvíos planificados a estaciones de recarga, generalmente surgen en las operaciones rurales y semi-urbanas donde los tiempos y condiciones de transporte son más altos.

Inicialmente este enfoque se basó en variantes teóricas y progresivamente se ha ido adaptando a la realidad. La mayoría de estudios referentes a esta variante considera suposiciones tales como (Montoya et al., 2017):

- **Consumo de energía de los vehículos eléctricos:** directo y exclusivo por distancia recorrida.
- **La propiedad de la infraestructura de la carga (privado):** Lo que refiere a que siempre existe disponibilidad; no obstante, en la realidad según los autores la mitad de la carga en una ruta se realiza en estaciones públicas, por lo que la disponibilidad es incierta.
- **La capacidad de las estaciones de carga:** Se supone que un número ilimitado de vehículos se puede cargar simultáneamente, lo que no sucede en la práctica, pues las estaciones de carga están dotadas con pocos cargadores.
- **Proceso de carga de la batería:** Se definen la política y la función de la carga.

Se puede determinar que el EVRP aún se encuentra en la transición de ser un planteamiento teórico a uno práctico, lo que se refleja en la distancia existente respecto a la realidad; aunque ha tenido un gran impacto y son muchas las investigaciones que se realizan con el objetivo de adaptarlo en mayor medida a las condiciones del contexto.

Para efectos de esta investigación, *las nuevas tendencias* son una gran oportunidad para la implementación bajo la perspectiva del diseño de rutas, pues los planteamientos de vanguardia van dirigidos a la disminución del impacto ambiental de la actividad de transporte sin dejar de un lado la productividad; al igual que el objetivo del proceso de recolección de llantas, disminuir el impacto ambiental de este residuo a través de su reprocesamiento o reutilización. Por lo anterior, es trascendental para el desarrollo de una recolección de residuos que exista coherencia entre el objeto y el medio utilizado para alcanzarlo, por lo que se propone una conjugación de estos conceptos con el fin de dar cumplimiento a uno de los requerimientos principales del proyecto.

Se presenta a continuación en la Tabla 1. el resumen de la información tratada a lo largo del Capítulo I: **“El problema de ruteo de vehículos como principal herramienta para el diseño de rutas y su relación con las cadenas de suministro”**. En dicha tabla se identifican las diferentes extensiones a la versión general, el o los autores respectivos, las principales consideraciones y su objetivo.

Tabla 1. Cuadro resumen información Capítulo I

Problema de Ruteo de Vehículos –<i>Vehicle Routing Problem VRP-</i>		
Variante /autor(es)	Consideraciones	Objetivo
VRP Homogéneo		
VRP con ventanas de tiempo -VRP with Time Windows-	Considera intervalos de tiempo dentro de los cuales se debe realizar el servicio a cada cliente.	Minimizar costos de operación a través de la mínima distancia recorrida y el menor número de rutas.
H. Pullen y M. Webb en 1967		
VRP con ventanas de tiempo suaves -VRP with Soft Time Windows-	Considera la existencia de una penalización por anticipación en la llegada o por tardanza en la misma.	
VRP con ventanas de tiempo difíciles -VRP with Hard Time Windows-	En este caso se prohíbe radicalmente la anticipación en la llegada o la tardanza en la misma.	
VRP con múltiples ventanas de tiempo -VRP with Multiple time Windows-	La diferencia respecto a la versión general se basa en la inclusión de un conjunto de ventanas de tiempo.	
MM Solomon en 1987		
VRP con Backhauls -VRP with Backhauls-	Clasifica a los clientes en dos sub-conjuntos: Clientes linehaul : requieren entrega de producto. Clientes backhaul : requieren recogida de producto. Primero deben ser atendidos los clientes linehaul .	
I. Deif y L.D Bodin en 1984		
VRPB con ventanas de Tiempo -VRPB with Time Windows-	<i>Mismas características de la versión general, pero existen intervalos de tiempo definidos dentro de los cuales el cliente debe ser atendido.</i>	
SR Thangiah, J.-Y. Potvin y Sun T en 1996		
VRPB Con Múltiples Depósitos -VRPB with Multiple Deposits-	<i>Mismas características de la versión general pero se tiene en cuenta más de un depósito.</i>	
S. Salhi y G. Nagy en 1999		

VRPB Mixto –Mixed VRPB–	Considera la no obligatoriedad de visitar primero a todos los clientes de la línea <i>linehaul</i> y luego a los clientes <i>backhaul</i> .	Minimizar costos de operación a través de la mínima distancia recorrida y el menor número de rutas .
A.C. Wade y S. Salhi en 2002		
Problema de enrutamiento de vehículos capacitados con restricciones de distancia –Distance and Capacitated VRP–	Además de la restricción impuesta de capacidad en el vehículo, existe una limitación que impone una distancia máxima que el vehículo puede recorrer.	
G. Laporte en 1987		
Problema de enrutamiento de vehículos con entrega dividida –Split Delivery VRP–	La demanda de un cliente N_i puede ser satisfecha por más de un vehículo y la demanda de una determinada ruta, puede ser mayor a la capacidad del vehículo.	
M. Dror y P. Trudeau en 1989		
VRP con Ventanas de Tiempo y Entregas Fraccionadas –Split Delivery VRP with Time Windows–	Además de las consideraciones de la versión general, tiene en cuenta intervalos de tiempo en los que se debe atender a los clientes según corresponda.	
P. W. Frizzell y J. W. Giffin en 1995		
VRP Heterogéneo		
VRP estocástico –Stochastic VRP–	Considera eventos aleatorios en la definición de las variables del problema.	Minimizar costos de operación a través de la mínima distancia recorrida y el menor número de rutas .
W. Stewart y B. Golden en 1983		
VRP con demandas estocásticas –VRP with Stochastic Demands –	Se considera que la demanda de cada cliente V_i tiene una variable aleatoria que se ajusta a su comportamiento denominada D_i . Estas variables son completamente independientes y se conocen sus distribuciones de probabilidad .	
D. Bertsimas entre 1988 y 1992		
VRP con tiempos estocásticos –VRP with Stochastic Times–	Referencia básicamente que los tiempos de viaje y de servicio varían.	

<p>VRP con clientes estocásticos -VRP with Stochastic Clients -</p>	<p>No se conoce con certeza el conjunto de clientes y cada uno de ellos tiene una probabilidad p de estar presente o una probabilidad $(1-p)$ de estar ausente.</p>	<p>Minimizar costos de operación a través de la mínima distancia recorrida y el menor número de rutas.</p>
<p>VRP con flota heterogénea -Heterogeneous Fleet VRP-</p>	<p>En esta variante, se debe decidir sobre las rutas de los vehículos como en el VRP clásico, pero además sobre la composición de la flota en aspectos tales como: número y tipo de vehículos.</p>	
<p>Golden B.L., Assad A.A., Levy, Gheysens F en 1984</p>		
<p>HVRP con costos fijos y costos de enrutamiento dependiente del tipo de vehículo -Heterogeneous VRP with Vehicle Dependent Routing Fixed Cost-</p>	<p>Se consideran conjuntamente los costos fijos y los costos dependientes del tipo de vehículo.</p>	
<p>C. Gencer, E.K. Aydogan en 2006</p>		
<p>HVRP con costos de enrutamiento dependientes del vehículo - Heterogeneous VRP with Vehicle Dependent Routing Cost-</p>	<p>Se analizan los costos variantes dependientes del vehículo sin considerar los costos fijos.</p>	
<p>ED Taillard en 1999</p>		
<p>VRP con múltiples depósitos- Multi-Depot VRP-</p>	<p>A diferencia de la versión general, en esta variante se considera más de un depósito.</p>	
<p>R.V. Kulkarni, P.R. Bhave en 1985</p>		
<p>VRP con múltiples viajes -Multi-Trip VRP-</p>	<p>Considera la posibilidad de que un vehículo pueda realizar más de una ruta, lo que en la versión general no es permitido.</p>	
<p>Fleischmann B. en 1990</p>		
<p>VRP Periódico - Periodic VRP-</p>	<p>Considera que los clientes requieren el servicio de recolección o distribución en más de una ocasión durante un horizonte de tiempo determinado.</p>	

Nuevas tendencias		
Problema de enrutamiento de vehículos verde <i>-Green Vehicle Routing Problem-</i>	Busca la optimización del consumo de energía del transporte a través de la formulación de una función objetivo que considera: <ul style="list-style-type: none"> ✓ La pendiente. ✓ La velocidad. ✓ La aceleración. ✓ La masa. ✓ La resistencia aerodinámica y al rodamiento. 	Minimizar costos de operación e impacto ambiental.
Problema de Enrutamiento de Contaminación PRP <i>-Pollution Routing Problem-</i>	En esta variante además de determinar la ruta, se considera que se debe establecer la velocidad del vehículo en cada segmento de la misma.	
VRP en Logística Inversa <i>-VRP in Reverse Logistic-</i>	Es pertinente analizar y adaptar la situación del sistema estudiado a la variante que más se ajuste para el proceso de formulación.	
El problema de enrutamiento del vehículo eléctrico <i>-Electric Vehicle Routing Problem-</i>	Considera la sustitución de vehículos de consumo de combustibles por vehículos por de consumo de energía eléctrica. Existen diferentes limitaciones relacionadas con la infraestructura que imposibilitan su aplicación en el contexto local.	
Sistema de soporte de decisión espacial web para enrutamiento de vehículos utilizando Google Maps.	El objetivo principal de esta invención es paralelo al de la versión general. La diferencia radica en que el sistema define cambios durante la ruta, para evitar congestiones.	

Tabla 2. Convenciones clasificación extensiones en Tabla 1.

Convenciones	
	Extensión general
	Extensión primaria
	Extensión secundaria

2. Capítulo II: Caracterización de casos empíricos relacionados con el diseño de cadenas de abastecimiento inversas considerando decisiones del VRP

En esta capítulo se analizan de forma general una serie de casos empíricos referenciados en la literatura, relacionados con el diseño de cadenas de abastecimiento inversas bajo el enfoque del problema de ruteo de vehículos (VRP), estos cuentan con características de gran utilidad para una posible aplicación en el proyecto base de esta investigación bajo la perspectiva del diseño de rutas.

2.1 Caso I: Planificación de un sistema de recolección para aceite de cocina post-uso en Portugal

Contextualización y descripción del caso

La disposición final dada al aceite de cocina ha generado la necesidad de buscar alternativas que permitan reducir el impacto negativo que tiene la eliminación incontrolada de este tipo de productos, a fin de extender su ciclo de vida, evitando el vertimiento directo de estos a las fuentes hídricas previniendo en cierta medida su contaminación (Ramos, Gomes, & Barbosa-Póvoa, 2013). Los mismos autores refuerzan su planteamiento inicial señalando la utilidad que tiene el aceite de cocina posterior a su uso en la elaboración de otros productos; por ejemplo en la industria química este producto es un componente fundamental en la fabricación de jabón, detergentes, lubricantes, pintura, grasa, entre otros; igualmente, este producto puede ser utilizado en la producción de biodiesel con todas las ventajas a nivel ambiental que la utilización de un combustible con estas características trae consigo, al utilizar este existe una reducción significativa en las emisiones de dióxido de carbono CO_2 , material particulado, y monóxido de carbono CO en comparación con el uso de combustibles fósiles (Ramos et al., 2013), sin embargo el alto costo es el principal impedimento para su comercialización, esta situación se convierte en una clara oportunidad para el sistema de recolección planteado, pues según los autores la materia prima significa el 75% del costo de fabricación de biodiesel, y el uso de aceite residual puede reducir de dos a tres veces los costos por este concepto en comparación con los aceites vírgenes (Zhang, Dubé, McLean, & Kates, 2003).

La situación expuesta anteriormente, motiva al desarrollo del estudio de una compañía que opera en Portugal en once municipios, dedicada al reciclaje de diferentes tipos de residuo entre ellos el aceite de cocina.

En cuanto a información de la **operación de transporte**, la empresa cuenta con tres depósitos donde los vehículos de recolección inician y terminan sus recorridos, cuentan con una flota subcontratada que implica un costo fijo por el número de rutas y un costo variable por kilómetro recorrido (Ramos et al., 2013). En cuanto a los generadores del aceite residual, son 303 sitios exactamente los que se deben visitar para la recolección de los contenedores de aceites; los sitios se clasifican de la siguiente manera:

- 188 Restaurantes
- 80 Escuelas

- 35 Cantinas

La empresa estableció que los contenedores de aceite se deben recolectar una vez a la semana, en esta operación al recoger una cantidad de n contenedores llenos de aceite residual, se debe hacer entrega de n contenedores vacíos y limpios que permitan la recolección objetiva semanal, es decir, la cantidad de aceite consumida en una semana por un establecimiento, cabe resaltar que los contenedores tienen una capacidad de 30 L. Es importante la clasificación dada a los sitios de recolección debido a que el volumen de aceite consumido en cada sitio varía a lo largo del año, razón por la cual la empresa considera dos periodos de tiempo:

Periodo normal: De septiembre a junio.

Periodo estacional: De julio a agosto.

En el periodo estacional, las escuelas no son tenidas en cuenta para el análisis debido a que no hay funcionamiento de los restaurantes en las mismas por el periodo vacacional; no obstante, se incrementa la cantidad de contenedores en los restaurantes ubicados en zonas vacacionales. Por los motivos anteriormente expuestos existen dos planes de enrutamiento, uno para cada periodo.

Plan de enrutamiento periodo normal: Implica 432 contenedores de aceite de 303 clientes (Restaurantes, escuelas y cantinas) agrupados en 100 sitios de recolección, que se repetirá cada semana entre septiembre y junio, 43 semanas.

Plan de enrutamiento periodo estacional: Implica 292 contenedores de 223 clientes (Restaurantes y cantinas) agrupados en 86 sitios de recolección, que se repetirá semanalmente entre julio y agosto, 9 semanas.

Es clave también identificar que los clientes se agrupan en sitios de recolección correspondientes a localidades o ubicaciones aisladas, estos puntos están compuestos por uno o más clientes y los contenedores de aceite correspondientes. Se considera una distancia promedio entre clientes de 0,5 Km, la velocidad de carretera dentro de las localidades de $30 \frac{Km}{h}$ y un tiempo de atención a cada cliente de 6 *Minutos*, se toma en cuenta que la recolección ocurre entre las 10:00 A.M y las 4:00 PM, fuera de las horas pico, los datos son obtenidos mediante bases de datos históricas y la experiencia de la empresa, además se asume la misma velocidad puesto que las localidades visitadas presentan características similares con respecto a la red de carreteras y al tráfico.

Otros aspectos importantes:

- Cada vehículo es contratado por un periodo de 7,5 horas, se debe tener en cuenta media hora para el almuerzo del conductor (T = 420 minutos).
- Capacidad del vehículo, 45 contenedores (Q = 45 contenedores).
- Las visitas deben realizarse en un periodo de 6 horas, entre las 10:00 A.M y las 4:00 PM,
- El periodo de recogida debe incluir el descanso para el almuerzo del conductor, entonces (E= 330 minutos).

- Tiempo de operación carga y descarga de contenedores 30 minutos ($L=30$ minutos)

En la *Figura 14*. se muestra un ejemplo gráfico de la operación de un vehículo (Ramos et al., 2013)

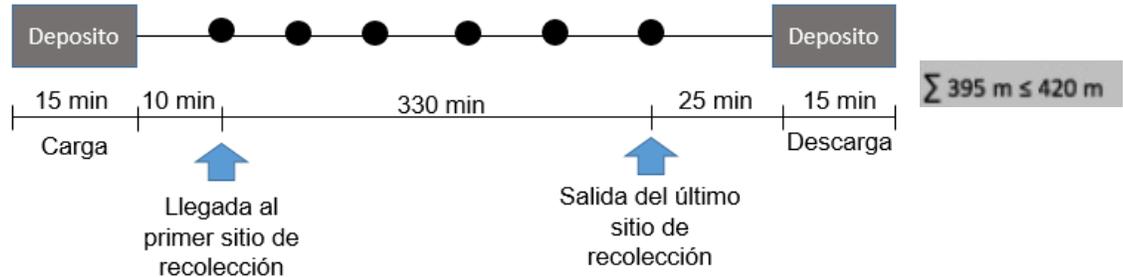


Figura 14. Operación de transporte de un camión en el proceso de recolección.

Fuente: Adaptado de Ramos et al. (2013)

El objetivo de la compañía es básicamente minimizar el costo total a través del número de rutas y la distancia recorrida por ellas al visitar todos los puntos de recolección. Con base en la explicación presentada anteriormente del problema, se puede identificar que presenta características del problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos MDVRP, es clave identificar que en esta variante los vehículos deben iniciar y terminar el recorrido en el mismo establecimiento; sin embargo, para el análisis de este caso se considera la opción de que un vehículo inicie su ruta en un depósito y pueda terminar la misma en un depósito diferente, esta variante se define como el problema de ruteo de vehículos abierto OVRP –*Open VRP* por sus siglas en inglés-. La conjugación de estas variantes tiene como resultado el problema de ruteo de vehículos de múltiples depósitos con rutas mixtas (cerradas y abiertas) entre estos MDVRP-MCO (*Multi-Depot Vehicle Route Problem with Mixed Closed and Open Inter-Depot Routes*), los autores proponen un modelo de programación lineal entero mixto para la resolución y mejoramiento de las rutas actuales planificadas por la compañía.

Situación a priori del estudio:

En la Tabla 4. se resumen los principales indicadores de la situación de la compañía en cuanto al sistema de reciclaje de aceite antes de la implementación del estudio. Los resultados se dividen en los dos periodos señalados anteriormente.

Tabla 3. Situación a priori a la implementación del modelo en estudio

Periodo Normal	Periodo Estacional
Número de vehículos: $11 \frac{\text{Vehiculos}}{\text{Semana}}$	Número de vehículos: $8 \frac{\text{Vehiculos}}{\text{Semana}}$
Distancia total recorrida: $1220 \frac{\text{Km}}{\text{Semana}}$	Distancia total recorrida: $1039 \frac{\text{Km}}{\text{Semana}}$
Costo total de contratación semanal: $2540 \frac{\text{€}}{\text{Semana}}$	Costo total de contratación semanal: $1999 \frac{\text{€}}{\text{Semana}}$
Rutas: 6 rutas cerradas – 5 abiertas.	Rutas: 5 rutas cerradas – 3 abiertas.
Número de clientes visitados por ruta: 28 clientes	Número de clientes visitados por ruta: 28 clientes
Número medio de contenedores recogidos por ruta: 39 contenedores (87% Aprov. Cap.)	Número medio de contenedores recogidos por ruta: 37 contenedores (81% Aprov. Cap.)
Promedio de duración de la recolección: 272 minutos (82% Aprov. Tiempo).	Promedio de duración de la recolección: 291 minutos (88% Aprov. Tiempo).

En la *Figura 15*. se muestra de forma gráfica la operación de transporte realizada inicialmente por la compañía para la recolección del aceite residual:

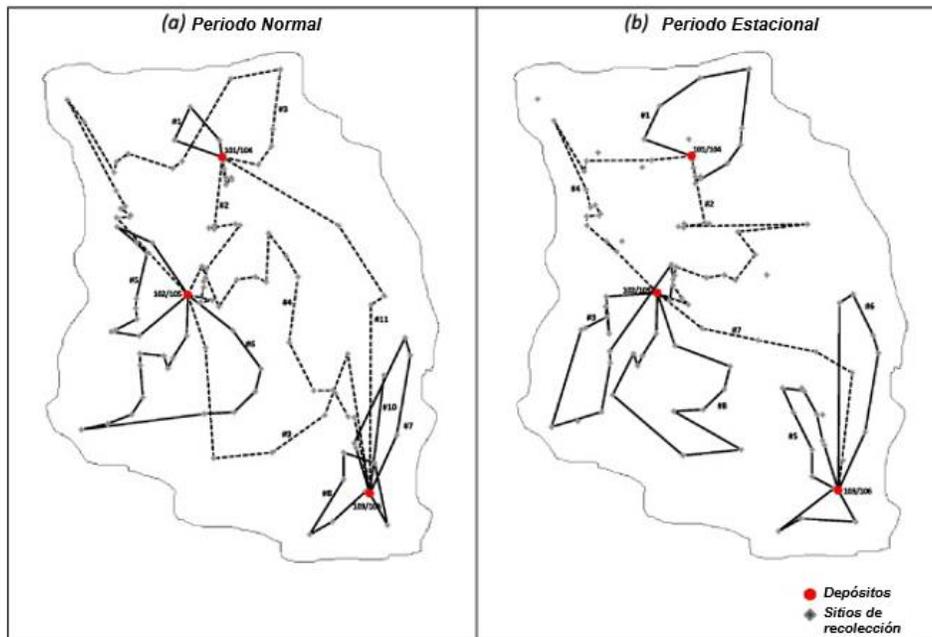


Figura 15. Rutas actuales para el (a) Período normal y (b) Período estacional

Fuente: Adaptado de Ramos et al. (2013)

Respecto a la *Figura 15*. cabe resaltar que las líneas punteadas referencian las rutas abiertas, estas son aquellas rutas que inician su recorrido en un depósito diferente al que terminan, así mismo las líneas solidas representan las rutas cerradas que se caracterizan por iniciar y terminar su recorrido en el mismo depósito.

Enfoque de solución

Con el objetivo de mejorar el estado inicial referente a la operación de transporte para la recolección de aceite bajo las condiciones especificadas anteriormente, en Ramos et al (2013) se

propone la formulación de un modelo de programación lineal entera del problema de ruteo de vehículos de múltiples depósitos con rutas mixtas abiertas y cerradas MDVRP-MCO, basada en la formulación de flujo de dos productos para el VRP capacitado propuesta por R. Baldacci, E. Hadjiconstantinou y A. Mingozzi; donde las rutas comienzan y terminan su recorrido en el mismo depósito. No obstante, se propone la generalización de este planteamiento de tal forma que se puedan llevar a cabo rutas cerradas y abiertas en una red de varios depósitos teniendo en cuenta a su vez las limitaciones de tiempo; lo anterior, con el fin de construir rutas más eficientes respecto a la situación preliminar de la empresa en este sentido.

Para dar claridad al concepto anterior, es importante resaltar que los problemas de enrutamiento de vehículos pueden formularse genéricamente de tres formas diferentes (Ramos et al., 2013): La formulación tradicional de flujo de tres índices del vehículo, la formulación de partición configurada y la formulación de flujo de dos productos; esta última, base del planteamiento en estudio y en donde X_{ij} es una variable binaria igual a 1 si el arco (i, j) se encuentra dentro de la solución, y Y_{ij}, Y_{ji} , son variables de flujo que representan la carga del vehículo y el espacio vacío respectivamente cuando se transita el arco (i, j) .

Haciendo énfasis ahora en la formulación del problema, se define el MDVRP-MCO como un gráfico $G = (V, A)$, donde el conjunto $V = \{1, \dots, N + W\}$ representa los nodos y el conjunto $A = \{(i, j): i, j \in V, i \neq j\}$ representa los arcos. A su vez el conjunto de nodos V está dividido en dos subconjuntos $V_c = \{1, \dots, N\}$ y $V_d = \{N + 1, \dots, N + W\}$, que representan el conjunto de puntos a visitar para la recolección y el conjunto de depósitos, respectivamente. Cada uno de los nodos $i \in V_c$ tiene una cantidad de contenedores para ser recolectados p_i y una duración de servicio no negativa s_i y finalmente se tiene en cuenta una matriz de distancia simétrica $D = d_{ij}$ asociada al conjunto de arcos. La formulación y ejecución de esta variante genera k rutas de vehículos dando cumplimiento a los siguientes puntos:

- I. Cada ruta comienza y termina en un depósito, no necesariamente debe ser el mismo.
- II. Cada sitio de recolección debe ser visitado exclusivamente por un vehículo.
- III. La demanda total de cada ruta no debe exceder la capacidad del vehículo.
- IV. La duración total de cada ruta, no debe exceder un límite de tiempo T preestablecido.
- V. Se minimiza el costo total de enrutamiento.

Para optimizar las rutas iniciales se procedió entonces a implementar el modelo desarrollado en el sistema de modelado GAMS 23.6 y se resolvió mediante el CPLEX Optimizer 12.1.0 obteniendo los resultados que se discuten a continuación.

Resultados

En la Tabla 4. se resumen los resultados obtenidos luego de la implementación del modelo.

Tabla 4. Situación operación de transporte luego de la implementación del modelo formulado

Periodo Normal	Periodo Estacional
Número de vehículos: $10 \frac{\text{Vehiculos}}{\text{Semana}}$	Número de vehículos: $7 \frac{\text{Vehiculos}}{\text{Semana}}$
Distancia total recorrida: $1067 \frac{\text{Km}}{\text{Semana}}$	Distancia total recorrida: $895 \frac{\text{Km}}{\text{Semana}}$
Costo total de contratación semanal: $2267 \frac{\text{€}}{\text{Semana}}$	Costo total de contratación semanal: $1735 \frac{\text{€}}{\text{Semana}}$
Rutas: 6 rutas cerradas – 4 abiertas.	Rutas: 5 rutas cerradas – 2 abiertas.
Número de clientes visitados por ruta: 30 clientes	
Número medio de contenedores recogidos por ruta: 43 contenedores (96% Aprov. Cap.)	
Promedio de duración de la recolección: 352 minutos (90% Aprov. Tiempo).	

Lo primero que se debe esclarecer es que el documento no entrega la totalidad de la información del resultado obtenido referente al periodo estacional, en aspectos como: el número de clientes visitados, el número medio de contenedores recogidos por ruta y el promedio de duración de la recolección; sin embargo, el documento brinda la información suficiente para analizar la eficacia del modelo en la construcción de las rutas. Lo primero que podemos determinar al realizar la comparación entre las dos situaciones (*ver Tablas 3 y 4*) es que para los dos periodos en la situación óptima propuesta se requiere de un vehículo menos para la operación de transporte. Haciendo énfasis ahora en el *PERIODO NORMAL*, se puede determinar que existe una disminución aproximada del 13% en la distancia total recorrida por los vehículos y del 11% respecto al costo total por concepto de contratación, en cuanto al resultado obtenido en el *PERIODO ESTACIONAL* se puede precisar que existe una disminución aproximada del 14% en cuanto a la distancia total recorrida por los vehículos y del 13% por concepto de costos de contratación. Lo anterior demuestra la eficacia del planteamiento en aspectos principales como el costo de operación y analizando más profundamente en el medio ambiente, pues al contar con un vehículo menos y una menor distancia recorrida como ocurre en los dos periodos de la situación óptima existe una disminución en la emisión de gases de efecto invernadero que perjudican en gran medida al medio ambiente (Demir et al., 2014). A continuación en la *Figura 16*. se ilustran las rutas determinadas para la operación en los dos periodos, obtenidas mediante la formulación e implementación del modelo.

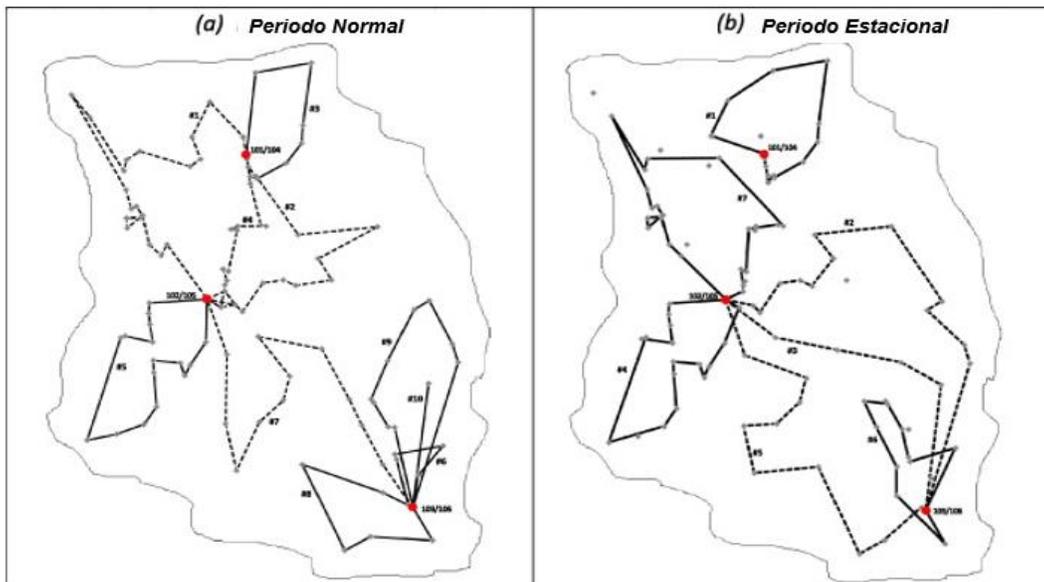


Figura 16. Solución propuesta para el (a) Período normal y (b) Período de estacional
Fuente: Adaptado de Ramos et al. (2013)

2.2 Caso II: Sistema de recolección de materiales reciclables en Portugal

Contextualización y descripción del caso

Es necesario antes de enfocar la situación presentada en el caso, definir que un sistema de recolección de materiales reciclables es “*un sistema que, dentro de un área geográfica determinada y de manera regular, recoge tres tipos de materiales reciclables (vidrio, papel y plástico/metálico) desechados por el consumidor final en contenedores especiales*” (Rodrigues et al., 2014). El caso que se plantea a continuación fue estudiado por Rodrigues, Ramos, Isabel, & Barbosa-póvoa (2014), quienes resaltan inicialmente que para ese momento en Portugal se encontraban varios sistemas de recolección de materiales reciclables en funcionamiento, cada uno de ellos encargado de un determinado número de municipios. El estudio planteado se enfoca en una compañía responsable del sistema de recolección que da cobertura a 19 municipios rurales con un área total de 7000 Km².

Haciendo énfasis en la operación de transporte implementada por la compañía, se encuentra que la misma opera con cuatro depósitos y una flota de 8 vehículos; bajo la perspectiva VRP, podemos identificar inicialmente que la operación cuenta con características ligadas al problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos MDVRP, estudiado anteriormente. Es importante resaltar que uno de los depósitos funciona también como centro de clasificación; por otro lado, el sistema global incluye el siguiente número de contenedores distribuidos en los 19 municipios en un total de 207 localidades:

- **1522** contenedores de vidrio.
- **1238** contenedores de papel.
- **1205** contenedores de plástico/metálico.

Tener en cuenta cada uno de los contenedores como un nodo (punto de recolección) generaría una alta complejidad en el tamaño del problema, por este motivo y debido a la proximidad existente de los contenedores dentro de una localidad, según los autores 500 metros en promedio, es posible manejar los contenedores de recolección que se encuentren dentro de una misma localidad como un solo nodo.

La determinación de la cantidad de residuos a recolectar en cada punto se logró mediante el análisis de una base de datos histórica de las rutas realizadas durante un año por la compañía, esta además cuenta con la siguiente información para cada una de las rutas:

- Día de la ruta.
- Tipo de material recolectado.
- Número de contenedores visitados.
- Cantidad de kilómetros recorridos.
- Duración de la ruta.
- Peso recolectado.

Con el objetivo de determinar el monto a recolectar en cada sitio y la frecuencia de este proceso, se determinó la cantidad promedio diaria dispuesta en un contenedor. En la *Figura 17*, se muestran de forma gráfica y detallada los depósitos dispuestos para la operación, al igual que los puntos de recolección en un mapa que define claramente los 19 municipios a los que debe dar cobertura la compañía.



Figura 17. Sitios de recolección y ubicaciones de depósito

Fuente: Adaptado de Rodrigues et al. (2014)

Basado en la información anterior, señala el autor que cada uno de los materiales reciclables presenta una frecuencia de recolección diferente: el vidrio debe recolectarse cada seis semanas, el plástico/metál cada tres semanas y el papel por su elevada generación en los hogares cada dos semanas, por lo que se supone un horizonte de tiempo de 6 semanas; de esto podemos inferir bajo el enfoque del problema de ruteo de vehículos que este planteamiento presenta también características del VRP periódico PVRP estudiado en el primer capítulo.

Existen otros aspectos importantes referentes al tema de transporte manejados por la compañía que se señalan a continuación: El primero de ellos es que los materiales deben recogerse en rutas separadas puesto que la flota no cuenta con compartimientos y los materiales no pueden mezclarse; de igual forma, por las restricciones volumétricas de capacidad del vehículo y la densidad de los materiales, es posible que cada vehículo pueda cargar un máximo de cada material: 8500 *Kg* de vidrio, 3000 *Kg* de papel y 1000 *Kg* de plástico/metál. Dentro del mismo sistema existe una operación de transporte distinta a la implementada en el proceso de recolección, el autor la denomina “Transporte de salida” que hace referencia al transporte de material desde los depósitos hacia la estación de clasificación, en este proceso de utilizan vehículos de mayor capacidad, 12,000 *Kg* para vidrio, 5000 *Kg* para papel y 3000 *Kg* para plástico / metál. Todas las rutas de recolección deben iniciar su recorrido en un depósito visitar una serie de localidades según corresponda recolectando un solo tipo de material y regresar al mismo depósito; no obstante, se permiten múltiples viajes por día, así como rutas entre depósitos, es decir que comiencen su recorrido en un depósito y terminen en uno diferente, sin embargo al final del día laboral todos los vehículos deben regresar a su nodo origen. La recolección se realiza 5 días por semana y 8 horas por día.

Situación a priori del estudio

Poco tiempo atrás al momento del estudio todas las operaciones (áreas de servicio de cada depósito y rutas de recolección) se administraban teniendo en cuenta los límites de los municipios lo cual resultaba muy costoso para la organización, situación que motivo a una reestructuración de las decisiones de planificación a nivel táctico y operativo. Es clave resaltar que la empresa planteó como objetivo primordial la **sostenibilidad del sistema**, mediante la integración de objetivos económicos, ambientales y sociales en su nuevo plan de operación.

En la propuesta de solución del autor referente al objetivo **económico**, fueron considerados únicamente los costos variables del sistema asociados principalmente con la distancia recorrida en las operaciones de transporte detalladas anteriormente; los costos fijos no son tenidos en cuenta puesto que habían sido definidos inicialmente por el recurso con el que cuenta la empresa como los son: número de depósitos, vehículos y conductores. El transporte es la principal actividad perteneciente al sistema de recolección propuesto por la compañía, por ende el objetivo **ambiental** se centra básicamente en tomar una postura responsable y promover prácticas con el objetivo de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero en las rutas de recolección. Finalmente el objetivo **social**, está ligado directamente a la promoción de la equidad entre el

recurso humano inmerso en esta actividad principalmente los conductores, puesto que en el planteamiento inicial los horarios de los mismos se encuentran significativamente desbalanceados, debido a que algunos conductores operan durante tiempos excesivos mientras otros se encuentran inactivos.

Los indicadores principales ligados a los objetivos señalados anteriormente respecto al planteamiento inicial de la compañía según el autor son los siguientes:

Objetivo **económico**: Distancia recorrida: $270.000 \frac{Km}{Año}$

Objetivo **ambiental**: Emisiones de CO_2 : $340.000 \frac{Kg}{Año}$

Objetivo **social**: Intervalo tiempo de trabajo por conductores: 220 horas – 100 horas en un horizonte de tiempo de 6 semanas.

Enfoque de solución

Como se mencionó anteriormente, el objetivo del caso de estudio es determinar y programar una serie de rutas en un sistema con múltiples depósitos, en el que se permiten múltiples viajes por vehículo y rutas entre depósitos. Por lo anterior, se puede establecer que el problema presenta características de tres extensiones al problema de ruteo de vehículos, como lo son: el problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos MDVRP, el problema de ruteo de vehículos con múltiples viajes MTVRP y el problema de ruteo de vehículos periódico PVRP; este último debido a que se considera un horizonte de planificación de varias unidades de tiempo, puesto que los autores parten del concepto de que los “clientes” tienen diferentes patrones en la generación de los residuos; cabe resaltar que estas variantes fueron detalladas en el capítulo anterior. Teniendo en cuenta las particularidades del caso, el problema es modelado como un problema de enrutamiento periódico de varios depósitos con rutas entre estos (MDPVRPI -*Multi-Depot Periodic Vehicle Routing Problem with Inter-depot routes*-) que consiste básicamente en la selección simultánea de un conjunto de días de visita para cada cliente, las áreas de servicio de cada depósito y el establecimiento de múltiples rutas para cada día del horizonte de planificación.

Haciendo énfasis ahora en la formulación del problema, se plantea un modelo multi-objetivo que considera objetivos económicos, ambientales y sociales; este se formula como un problema de división de conjuntos, donde K representa el conjunto de todas las rutas factibles y la variable T_{ktg} que es una variable binaria que toma el valor de 1 si la ruta k se realiza en el día t en el vehículo g y en el caso contrario toma el valor de 0.

Es importante resaltar que en este modelo se desarrollan tres funciones objetivo con el fin de aproximarse a las tres dimensiones de la sostenibilidad: El objetivo económico Z^{*1} , el objetivo ambiental Z^{*2} y el objetivo social Z^{*3} . Para la formulación del objetivo económico se tienen en cuenta únicamente los costos variables del proceso de recolección, puesto que los costos fijos en

aspectos como el número de depósitos, el número de vehículos y el número de conductores son decisiones que fueron tomadas anteriormente y no se pueden cambiar, este costo es estimado en función de la distancia total recorrida. En cuanto al objetivo ambiental, el indicador a tener en cuenta en el modelo son las emisiones de dióxido de carbono CO_2 producto del uso de combustibles fósiles en la flota vehicular; lo anterior, teniendo en cuenta el impacto negativo de estos gases en el medio ambiente, este índice es calculado teniendo en cuenta el tipo de vehículo, la carga y la distancia recorrida; finalmente, el objetivo social se modela mediante la minimización del máximo de horas de trabajo entre todos los conductores en el horizonte de planificación, de tal manera que se reduzca el intervalo que determina la significativa diferencia en el tiempo de trabajo entre los conductores.

Para dar solución al modelo formulado y explicado de forma general anteriormente, los autores desarrollaron un enfoque de solución de dos pasos, en el primero de ellos se generan las rutas factibles y en el segundo se resuelve el problema de múltiples objetivos. En la *Figura 18*. se resume dicho procedimiento.

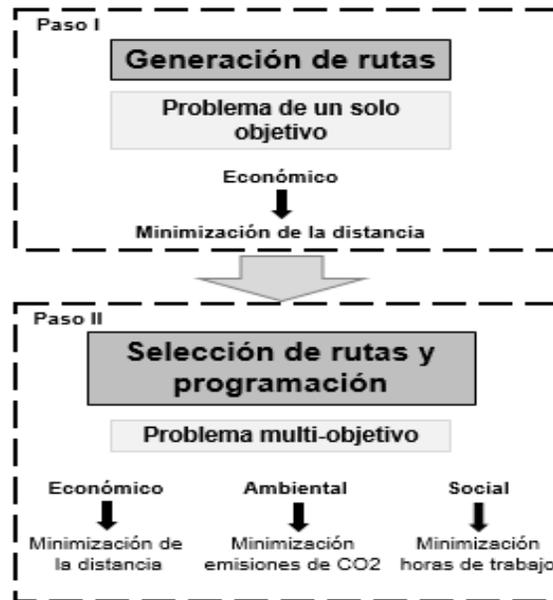


Figura 18. Visión general del enfoque de la solución
Fuente: Adaptado de Rodrigues et al. (2014)

Como ya se detalló anteriormente, el objetivo del paso I es básicamente determinar un subconjunto de rutas factibles K , debido a que determinar la totalidad de ellas presenta una alta complejidad; para ello es necesaria la implementación de tres procedimientos independientes que modelan las tres posibles soluciones, pues para la construcción de solo rutas cerradas se requiere resolver un modelo MDVRP, para la construcción de rutas cerradas y abiertas se debe resolver un modelo MDVRPI y para la construcción de rutas exclusivamente entre depósitos se resuelve una extensión del MDVRPI. Es importante destacar también que se debe declarar un conjunto de materiales M , en vista de que se está tratando un problema de múltiples productos y cada

material debe ser recolectado en rutas separadas, cada procedimiento del paso I se debe ejecutar de forma independiente para cada material y los problemas en los tres procedimientos son formulados como modelos de programación lineal entera mixta basados en la formulación de flujo de dos productos.

En el paso II se resuelve el problema multi-objetivo mediante la implementación del método de restricción ε , donde una de las tres funciones objetivo se optimiza mientras las otras dos se consideran restricciones por niveles admisibles, estos son luego modificados para generar todo el conjunto óptimo de Pareto (Gendreau & Potvin, 2009), posteriormente se aplica el método de solución de compromiso con el fin de obtener una solución sostenible para el caso. En este tipo de problemas difícilmente se presenta una situación en el que un solo punto optimice simultáneamente todas las funciones objetivo; por tal motivo, este concepto generalmente proporciona múltiples soluciones contenidas en el ya mencionado conjunto óptimo de Pareto. Finalmente, El enfoque de solución se implementó en GAMS 23.7 y se resolvió a través del CPLEX Optimizer 12.3.0.

Resultados

Luego de determinar el subconjunto de rutas factibles K teniendo en cuenta la cantidad de vehículos disponibles (8) y a que zona de servicio fueron adjudicados e implementar el método de restricción ε explicado anteriormente, se obtiene el resultado presentado en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores obtenidos por la optimización de cada función objetivo

	Z^1 (Km)	Z^2 (Km)	Z^3 (Km)
min Z^1	27.261	34.982	200
min Z^2	27.337	34.747	200
min Z^3	30.118	38.042	165

Fuente: Adaptado de Rodrigues et al. (2014)

Sobre estos resultados y con la finalidad de encontrar una solución sostenible para la red logística los autores implementaron el método de solución de compromiso para encontrar el punto ideal entre las diferentes soluciones óptimas generadas por el modelo, para ello se toman los valores mínimos de cada objetivo $z_I = (27,261 \text{ km}, 34,747 \text{ kg de CO}_2, 165 \text{ h})$ y los valores máximos $z_N = (30118 \text{ km}, 38.042 \text{ kg CO}_2, 200 \text{ h})$. Se deben entonces normalizar las funciones objetivo con la amplitud entre el punto ideal (valores mínimos) y los valores opuestos para obtener una solución sostenible mediante la minimización de la distancia de Tchebychef; obteniendo:

Objetivo **económico:** 28.013 km Objetivo **ambiental:** 35.653 kg de CO₂ Objetivo **social:** 174 h

Los anteriores resultados están orientados en un horizonte de tiempo de 6 semanas, es decir 30 días hábiles, por tal motivo y para poder realizar una comparación con la situación inicial de la compañía en estos aspectos es necesario calcular los valores para el periodo anual, siendo estos:

Objetivo **económico**: Distancia recorrida: $242.873 \frac{Km}{Año}$

Objetivo **ambiental**: Emisiones de CO_2 : $309.112 \frac{Kg}{Año}$

Objetivo **social**: Intervalo tiempo de trabajo por conductores: 174 horas – 100 horas

La solución sostenible expuesta anteriormente, presenta respecto a la situación inicial de la empresa de reciclaje una disminución significativa en los principales indicadores de la actividad de transporte; la distancia recorrida parámetro de medición del objetivo económico disminuyó en un 10%, las emisiones de CO_2 , principal indicador y factor medible del objetivo ambiental disminuyó en un 9% y en cuanto al máximo de horas de conducción se logró una disminución del 21% pasando de un tiempo máximo de 220 horas por año a tan solo 174, Los autores resaltan que este último aspecto es muy importante puesto que tiene una doble contribución, la primera de ellas es la equidad para los trabajadores en cuanto a la carga laboral y la segunda que al minimizar el máximo de horas de trabajo existe la oportunidad de que los conductores puedan desarrollar otras actividades, lo que contribuye a mejorar el desarrollo profesional y promueve la versatilidad dentro del recurso humano de la organización. Es preciso destacar que no se referencia un mapa de las rutas debido a que el resultado general entregado por el sistema de modelado es un tipo de cronograma diario para cada vehículo definiendo todas las rutas a ser operadas.

2.3 Caso III: Enrutamiento de vehículos para la recolección eco-eficiente de desechos plásticos domésticos en la ciudad de Wageningen, Países Bajos

Contextualización y descripción del caso

El plástico presenta un conjunto de características como el bajo peso, la durabilidad y los bajos costos respecto a otro tipo de materiales, que lo convierten en la principal opción como instrumento de embalaje y/o empaque para la comercialización de productos (Bing, de Keizer, Bloemhof-Ruwaard, & van der Vorst, 2014), esta situación se convierte en una dificultad para su recolección y separación en razón a los altos volúmenes generados y a la gran variedad en la composición de este material.

El impacto ambiental que tiene la generación indiscriminada de plástico y la potencialidad en su reutilización (un ejemplo de ello es la posibilidad de sustituir componentes en materiales de construcción como el concreto (Jacob-vaillancourt & Sorelli, 2018)) motivaron a Bing, de Keizer, Bloemhof-Ruwaard, & van der Vorst (2014) a proponer una mejora al diseño de un sistema de recolección de plásticos domésticos post-uso en la ciudad de Wageningen ubicada en los Países Bajos. Para llevar a cabo el rediseño y la construcción de las nuevas rutas para el sistema bajo el marco de la sostenibilidad, los autores proponen un enfoque de estudio de

escenarios para comparar las diferentes alternativas, pues la recolección y la separación que son dos procesos fundamentales para dar cumplimiento a dicho objetivo, pueden ejecutarse de distintas formas. En el caso de la recolección, existe la posibilidad de que se lleve a cabo mediante el establecimiento de un punto central de recolección en una localidad o simplemente en las aceras frente a las viviendas; por otro lado, la separación se puede realizar tanto en la fuente o mediante una separación posterior; el primer caso indica que el plástico es separado de otros materiales desde la fuente generadora, mientras que en la post-separación los plásticos en una fase inicial se mezclan con otros residuos y posteriormente en un centro de clasificación se realiza la respectiva selección. Los escenarios estudiados en el análisis se referencian en la *Figura 19*:

	Separación en la fuente	Post-Separación
Recolección en punto central	ESCENARIO 1	ESCENARIO 3
Recolección en la acera	ESCENARIO 2	ESCENARIO 4

Figura 19. Escenarios utilizados en el estudio

Fuente: Adaptado de Bing et al. (2014)

Es importante resaltar que estos escenarios se diseñan de acuerdo con las opciones de recolección y separación existentes actualmente en los Países Bajos, donde aproximadamente en el 90% de los municipios los habitantes realizan separación en la fuente y la recolección del 30% de este material se ejecuta mediante puntos fijos (Bing et al., 2014), por este motivo la operación de transporte actual de la compañía está basada en el primer escenario, que también es desarrollado en el estudio para la proposición de posibles mejoras, los otros escenarios son analizados con el objetivo de determinar si el desarrollo de nuevas estrategias puede ser una vía útil en el largo plazo, pues establecen los autores del estudio que cada uno de los más de 400 municipios de este país por determinación del gobierno deben adoptar un sistema de recolección; no existe obligación en el método de separación, pero si existe preferencia por parte del gobierno por la separación en la fuente, impulsando esto a través de incentivos fiscales y con diferentes estrategias comerciales.

En cuanto a la información referente a la operación de transporte, se puede determinar que la recolección se modela con base en el problema de ruteo de la contaminación PRP, teniendo en cuenta además un periodo de recolección semanal. La recopilación de los datos e información que se referencia a continuación para la construcción del modelo, se llevó a cabo mediante la

colaboración del municipio y otras fuentes de investigación por medio de entrevistas, informes industriales y literatura.

Es importante al describir una operación de transporte indicar las *características geográficas* del lugar en el cual esta se desarrolla, por ello se hace énfasis en que el área de estudio seleccionada para el análisis, es el municipio de Wageningen en Países bajos; según los autores, este territorio cuenta con una superficie aproximada de 30 Km^2 , en la cual residen cerca de 37.000 habitantes en 20.417 domicilios, con una densidad poblacional relativamente alta y un alto nivel cultural en temas de reciclaje. Así mismo, a través de entrevistas a la empresa de recolección y autoridades locales se logró establecer que son 15 los puntos centrales de recolección que están localizados en el centro del área residencial, cerca de centros comerciales y supermercados, mientras que los puntos de recolección a lo largo de las aceras de la municipalidad son 221. La cantidad de desechos plásticos que se logra obtener en total es aproximadamente de $3563 \frac{\text{Kg}}{\text{Semana}}$.

Así mismo, es importante destacar que los camiones utilizados para la recolección en puntos centrales y para la recolección en las aceras son diferentes; para el primer método se requiere que el vehículo esté equipado con una función de elevación que permita el manejo de los contenedores de tamaño considerable. En cuanto a las capacidades de carga existe también una disyuntiva pues cuando hay una separación en la fuente, la carga máxima del camión es de 3.600 Kg, mientras que cuando la separación se hace posterior al proceso de transporte la capacidad es de 7.200 Kg; los autores hacen este planteamiento teniendo en cuenta la densidad de los diferentes elementos recogidos y la tasa de llenado promedio del camión. Con respecto a los costos de funcionamiento, que comprenden el costo por consumo de combustible y costo por mano de obra, se debe resaltar que los autores plantean que el costo por el primer concepto es diferente durante la conducción y mientras el vehículo está encendido pero no es acelerado (ralentí), este caso se presenta en el momento en que el vehículo se detiene para ser cargado, el tiempo para la carga depende evidentemente del volumen de material en un determinado punto. Con relación al costo de mano de obra es importante mencionar que para la recolección en puntos centrales se requiere únicamente de un conductor, que a su vez opera el proceso de carga mecánicamente; en cambio, para el método de recolección en aceras se requiere de dos trabajadores, un conductor y un cargador. Finalmente y en búsqueda de una solución sostenible, se tiene en cuenta en el modelo un costo por emisiones producto del funcionamiento de la flota vehicular, por valor de $20 \frac{\text{€}}{\text{Ton CO}_2}$. En la Tabla 6. se resumen los datos requeridos para la construcción del modelo.

Tabla 6. Datos de entrada para el problema de enrutamiento del vehículo de recolección de residuos

Parámetros de entrada	Acera	Punto fijo	Unidad
Velocidad promedio en la ronda de recolección	50	50	Km/h
Precio del combustible	1,4	1,4	Euro/L
Tiempo promedio de parada	0,01	0,03	h
Consumo de combustible en conducción	0,33	0,4	L/Km
Consumo de combustible en ralentí	3	3	L/h
Costo laboral por año	30.000	30.000	Euro/año
Horas de trabajo regulares de conductor y cargador por año	1.650	1.650	h
Número de conductores por vehículo	1	1	-
Número de cargadores por vehículo	1	0	-
Número de puntos de recolección	221	15	-

Fuente: Adaptado de Bing et al. (2014)

Situación a priori del estudio

Como se mencionó anteriormente, la empresa encargada del proceso de recolección opera bajo las características del primer escenario planteado (ver Figura 19); es decir, ejecuta el procedimiento en puntos fijos de recolección con una previa separación en la fuente. En la Tabla 7. se resumen los principales indicadores que permiten evaluar la efectividad del modelo a explicar posteriormente.

Tabla 7. Principales indicadores de la situación inicial del proceso de recolección

Parámetro	Situación inicial
Distancia total (Km)	40,19
Tiempo total (h)	1,67
Costo total (Euro)	51,68
Costo total de emisión (Euro)	1,42
Otro Costo (Euro)	50,26

Fuente: Adaptado de Bing et al. (2014)

Enfoque de solución

Lo primero que se debe puntualizar en este caso, es que existen tres posibles variantes al problema de ruteo de vehículos en relación a la demanda, estas son: el VRP con demanda basada en nodos, el VRP con demanda basada en arcos y la combinación entre ellas (Bing et al., 2014). Es importante definir esto puesto que como se ha tratado a lo largo del desarrollo del caso, existen dos posibles métodos para realizar la recolección del material, mediante los puntos fijos de recolección o a través de la recolección en aceras; el primero de estos se puede entender como un VRP basado en nodos y el segundo como un VRP basado en arcos; sin embargo, los habitantes de esta municipalidad tienen la costumbre de juntar las bolsas con este residuo cerca o en las esquinas de las vías, conformando una especie de sección o punto de recolección que

puede ser servido por un único vehículo; por este motivo, existe la posibilidad de abordar este método también como un problema de enrutamiento de nodos. En la *Figura 20*. se muestra gráficamente un ejemplo de la conformación de los puntos de recolección.

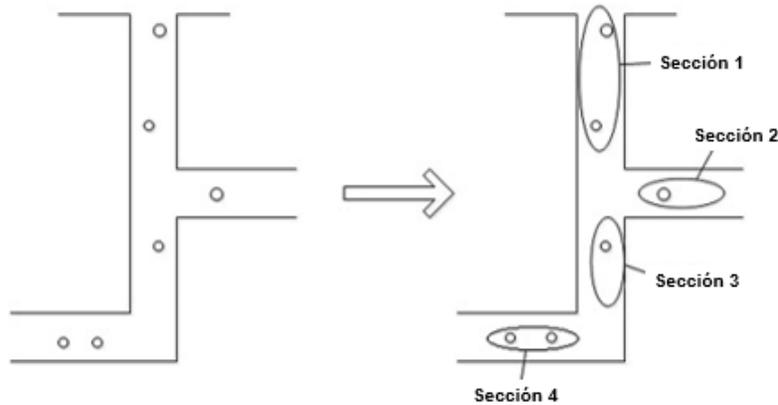


Figura 20. Conformación puntos de recolección

Fuente: Adaptado de Bing et al. (2014)

Se procede entonces a la formulación general del problema, que se define como un gráfico dirigido $G = (V, A)$, donde V representa el conjunto de nodos o puntos de recolección (con V_0 como depósito) y A el conjunto de arcos que conectan estos agentes. A su vez, el conjunto V está dividido en una serie de subconjuntos V_c y V_d , donde V_c denota los puntos de recolección en la acera y V_d los puntos de recolección fijos establecidos, estos cubren el servicio de toda el área. Del mismo modo, se define un conjunto de parámetros $\{q_i, t_i^s\}$ asociados a cada nodo V , donde q_i denota la cantidad de desechos esperada a recolectar en el nodo i y t_i^s que representa el tiempo de inactividad en el nodo respectivo. Para los dos subconjuntos V_c y V_d una solución es un conjunto de rutas R_1, \dots, R_k .

Complementando lo anterior, se define una función objetivo que minimiza el costo total de transporte teniendo en cuenta el costo por consumo de combustible y emisión cuando el vehículo está en movimiento, el costo por consumo de combustible y emisión cuando el vehículo está encendido pero no acelerado y el costo por mano de obra. El anterior planteamiento respalda la idea principal de los autores del estudio en relación a la sostenibilidad, pues mediante esta función se busca: disminuir los costos totales de la operación de transporte (factor económico), reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (factor ambiental) y unas mejores condiciones de trabajo para los colaboradores inmersos en la operación, al disminuir tiempos y permitir desarrollar actividades que despierten facultades como por ejemplo la versatilidad laboral (factor social). Del mismo modo, se definen unas restricciones para asegurar el buen funcionamiento del modelo en el momento de su ejecución, entre estas se encuentran: I. Cada punto de recolección debe ser visitado exclusivamente una vez, II. Un vehículo tiene que visitar un punto de recolección luego de haber visitado otro y aún contar con capacidad disponible, III. El tiempo de una ruta debe ser menor al tiempo total establecido para la operación, IV. Eliminar la formación bucles. Para resolver el modelo planteado se emplea un algoritmo de búsqueda

tabú, que se define elementalmente como una metaheurística que permite escapar de óptimos locales y continuar estratégicamente para encontrar mejores soluciones (Benjamin & Beasley, 2010); para su desarrollo se debe llevar a cabo una inicialización, que radica en plantear una solución inicial, para este caso por ejemplo se propone la forma en que opera originalmente la compañía de recolección, luego de ello se realiza una búsqueda de vecindario que es un método metaheurístico para la resolución de problemas de optimización global y finalmente se emplea una técnica de diversificación e intensificación probabilística. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada escenario y las conclusiones respectivas del caso.

Resultados

Inicialmente se presentan los resultados del primer escenario con la finalidad de realizar una comparación respecto a la situación inicial de la empresa y determinar la efectividad del modelo planteado, que fue solucionado a través del algoritmo diseñado para la obtención de una solución más allá de los óptimos locales; no obstante, por las dimensiones de este primer caso, se procedió también a resolverlo como un problema de programación lineal entera mixta por medio del solucionador ILOG Cplex y se obtuvo la solución que se muestra en la Tabla 8:

Tabla 8. Comparación de resultados para el escenario I

Parámetro	Situación inicial	Modelo	Óptimo
Distancia total (Km)	40,19	36,88	35,89
Tiempo total (h)	1,67	1,61	1,59
Costo total (Euro)	51,68	48,78	47,91
Costo total de emisión (Euro)	1,42	1,32	1,29
Otro Costo (Euro)	50,26	47,46	46,62
Reducción del costo total	0	6%	7%

Fuente: Adaptado de Bing et al. (2014)

Respecto a la tabla 8. se puede afirmar que el modelo estructurado y solucionado mediante la heurística de búsqueda tabú, proporciona una mejora respecto a la situación inicial del 6% en relación al costo total, este resultado demuestra su efectividad y la posibilidad de implementar mejoras en el sistema al reducir distintos parámetros relacionados como la distancia recorrida y el tiempo total del proceso mediante la modificación de algunas rutas, generando esto un impacto directo a nivel económico, ambiental y social; objetivo principal del estudio. La solución generada al resolver el modelo de programación lineal entera mixta indica una mejora general del 7% y se entiende como el valor óptimo, esto ratifica la eficiencia del modelo y la heurística de solución, pues entrega un resultado con una calidad relativamente buena.

Para obtener los resultados de los otros escenarios se aplica el mismo método de solución empleado hasta el momento, con la diferencia de que en cada caso se utilizan diferentes valores de entrada en parámetros como la frecuencia de recolección y la cantidad total de desechos a recolectar. Es importante destacar para el análisis de los resultados, que en la post-separación

existe una mayor eficiencia en el proceso de selección del plástico respecto a la separación en la fuente debido a que el procedimiento es desarrollado por máquinas especializadas; por este motivo en los escenarios donde se tiene en cuenta este método de separación la cantidad de plástico recolectado es mayor. En la Tabla 9. se muestran los parámetros más importantes del proceso de transporte con su respectivo resultado para cada escenario.

Tabla 9. Comparación de resultados de todos los escenarios

Sistema	Escenarios			
	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3	Esc. 4
	Separación en la fuente		Post-Separación	
	Punto fijo	Acera	Punto fijo	Acera
<i>Entrada</i>				
Cantidad total de residuos recolectados (Kg)	3.563	3.563	54.077	54.077
% de residuos plásticos	100%	100%	16%	16%
Cantidad de residuos plásticos recogidos (Kg)	3.563	3.563	8.598	8.598
<i>Resultado por ronda de recolección</i>				
Costos totales (Euro)	48,78	217,51	177,35	492,1
Costo de combustible (Euro)	24,31	59,05	96,91	132,65
Costo laboral (Euro)	23,15	155,25	75,18	352,25
Costo de emisión (Euro)	1,32	3,21	5,26	7,2
Desviación estándar del costo total	0,42	1	1,79	1,05
Tiempo total (h)	1,61	5,39	5,22	12,23
Distancia total (Km)	36,88	96,33	157,53	215,04
<i>Resultado por Kg de plástico</i>				
Costos totales unitarios (Euro/Kg/semana)	0,014	0,061	0,021	0,057

Fuente: Adaptado de Bing et al. (2014)

Con base en los resultados se puede determinar que la práctica actual de la empresa basada en la separación en la fuente y en puntos fijos de recolección presenta los costos unitarios más bajos; de operar la empresa mediante un sistema con separación posterior el costo total unitario, sin tener en cuenta los costos de un proceso de selección mecánica requerido para dicho proceso, incrementa aproximadamente en un 50%. Es evidente que operar mediante puntos fijos de recolección es mucho más conveniente en comparación a la recolección en aceras, dado que la distancia a recorrer en estos casos es significativamente menor y esto tiene un efecto en los distintos costos que componen el costo total, por ello y como una alternativa en el futuro a fin de obtener una mayor cantidad de material se propone establecer más puntos de recolección en localizaciones centrales e impulsar en mayor medida el sistema de separación en la fuente a través de medios educativos, incentivos económicos y estrategias comerciales. En la *Figura 21.* se presenta el resultado del programa utilizado para el desarrollo del modelo. Cabe destacar que los nodos están conectados mediante líneas rectas y la longitud de estas no refleja la distancia

real ya que se generaron las distancias reales de conducción como entrada del modelo mediante la herramienta Microsoft MapPoint.

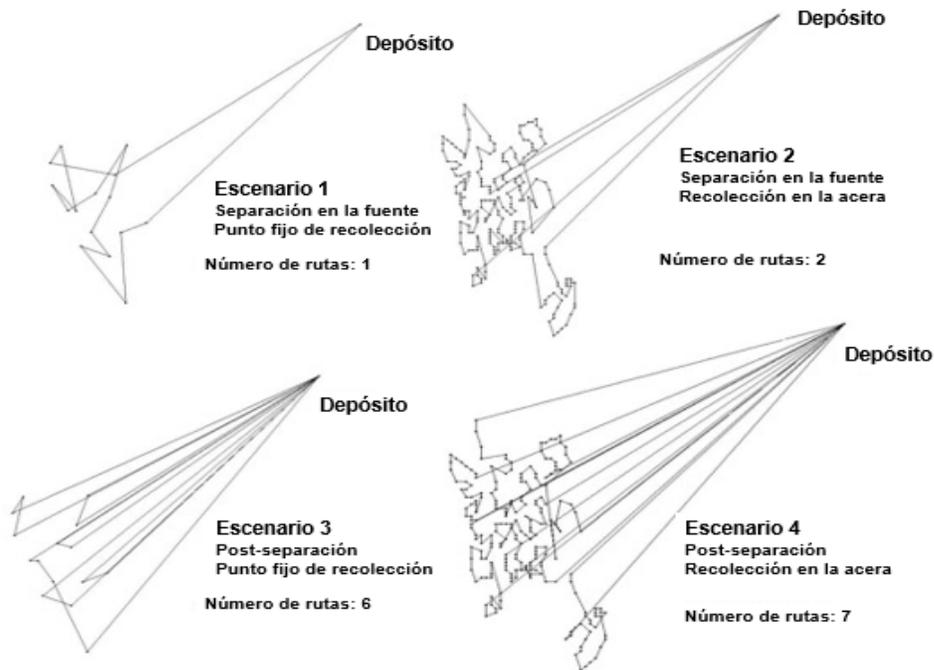


Figura 21. Visualización de soluciones para todos los escenarios

Fuente: Adaptado de Bing et al. (2014)

2.4 Caso IV: Enrutamiento de vehículos en logística inversa para el reciclaje de productos electrónicos de consumo al final de su vida útil en Corea del Sur

Contextualización y descripción del caso

El concepto de responsabilidad extendida del productor *EPR -Extended Producer Responsibility-* asigna la responsabilidad de reciclar los bienes y embalajes a los fabricantes de mercancías, al final de su vida útil (*Productos EOL -End Of Life-*) y descartadas del campo de fabricación, con el objetivo de garantizar un proceso amigable con el medio ambiente hasta la eliminación final del artefacto. En el año 2003 Corea en pro de su situación ambiental, emprendió la instauración de leyes que exigen a los fabricantes de productos electrónicos responder por el reciclaje de sus mercancías, de no dar cumplimiento con una cuota de reciclaje fija establecida dependiente de los volúmenes de producción, las empresas deberán pagar una sanción económica (Kim, Yang, & Lee, 2009).

La decisión anterior toma una mayor importancia si se tienen en cuenta los datos emitidos por la Asociación Coreana Electrónica del Medio Ambiente en el año 2006, que demuestran que la vida útil de los productos electrónicos se reduce ligeramente cada año (Kim et al., 2009); esta idea en la actualidad se podría relacionar con el concepto de obsolescencia programada que se define básicamente como la programación o determinación del fin de la vida útil de un producto, que es

impulsado por el cambio frecuente en los patrones de consumo. En la Tabla 10. se detallan las cantidades anuales de bienes electrónicos desechados entre los años 1999 y 2006.

Tabla 10. *La cantidad de bienes electrónicos de consumo de EOL desechados en Corea del Sur*

Año	Refrigerador	Lavadora	Aire acondicionado	Televisor
1999	1804	1493	141	695
2000	1765	1350	180	720
2001	1747	1534	274	698
2002	1743	1524	311	960
2003	1861	1545	297	968
2004	1840	1531	288	1061
2006	1869	1358	402	1245

Fuente: Adaptado de Kim et al. (2009)

En consecuencia, el gobierno aumentó continuamente la cantidad de reciclaje que los proveedores y fabricantes relacionados con productos electrónicos deben procesar; inicialmente se manejaba una cantidad en toneladas, pero en razón a la creciente generación de residuos se procedió a establecer un porcentaje respecto a los niveles de fabricación. El anterior escenario motivó a Kim, Yang & Lee (2009) a estudiar un enfoque de enrutamiento de vehículos para la recolección de estos elementos de tal forma que se minimice la distancia de transporte recorrida desde los puntos de recolección a los cuatro centros regionales de reciclado. Cabe destacar que este estudio fue realizado en el año 2009, por este motivo los años de los datos corresponden a los entregados.

Respecto a la información de la operación de transporte, partimos de que se tienen en cuenta cuatro centros regionales de recolección como instalaciones de reciclaje para el manejo de los productos electrónicos en Corea del Sur: MRC para la región metropolitana, ARC para la región del medio oeste (Chung Bu), CRC para la región del medio este (Yong Nam) y HRC para la región suroeste (Ho Nam); cada uno de estos cubre un área regional determinada y, por lo tanto, los bienes EOL eliminados de una determinada región deben entregarse al centro de manejo correspondiente. En la *Figura 22.* se evidencia de forma gráfica la situación explicada anteriormente.

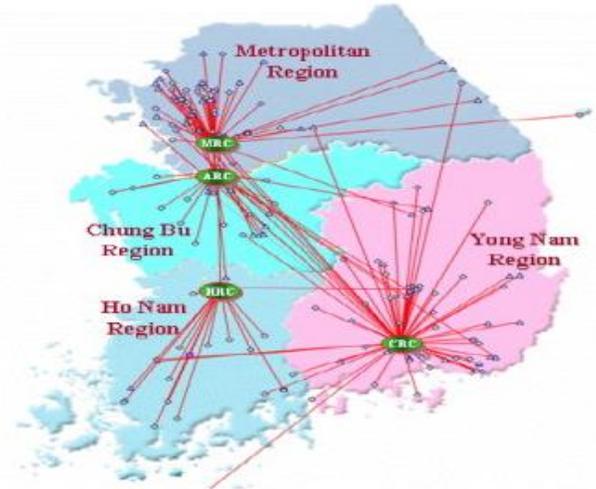


Figura 22. Centros de recolección regionales y áreas de cobertura en Corea del Sur
Fuente: Kim et al. (2009)

Así mismo, es importante destacar que son dos los canales de logística inversa para el reciclaje de productos electrónicos; el primero se emplea cuando los consumidores compran nuevos elementos; a través de este canal, un minorista hace entrega del nuevo producto en la ubicación del consumidor, en ese mismo momento el vendedor está obligado a recoger el elemento desechado si es el deseo del cliente y posteriormente realizar el envío a los centros de distribución de los fabricantes, este servicio es completamente gratuito. El segundo canal se emplea cuando un consumidor desea disponer de sus productos electrónicos usados, en este caso se debe pagar una tarifa a una autoridad local designada para su eliminación. Se realiza esta explicación con el objetivo de definir claramente los “clientes” del sistema de recolección que son los centros de recolección de autoridades locales y los centros de distribución de los productores, estos serán visitados por las distintas rutas para transportar los elementos electrónicos EOL a los centros regionales de recolección. En la *Figura 23.* se resume la anterior explicación.



Figura 23. Canales de recolección actuales para el reciclaje de productos electrónicos EOL
Fuente: Adaptado de Kim et al. (2009)

Conforme a la información suministrada por el caso, se puede establecer que los centros de recolección de autoridades locales son 126 y los centros de distribución de los fabricantes son 110, distribuidos en cada región como se muestra en la Tabla 11:

Tabla 11. *Centros de recolección de mercancías EOL asignados a cada centro regional*

Punto de recolección	MRC	ARC	CRC	HRC
Número de centros de recolección de la autoridad local	50	18	42	16
Número de centros de distribución del fabricante	20	22	59	9

Fuente: Adaptado de Kim et al. (2009)

Respecto a otros datos de la operación de transporte, es importante mencionar que cada centro de recolección regional representa un depósito, adicionalmente se considera una flota ilimitada de vehículos compuesta únicamente por camiones de 8 toneladas de capacidad. Se utilizan las distancias rectilíneas más cortas entre cada par de nodos al usar la longitud y la latitud de cada ubicación que fueron determinadas mediante un sistema de posicionamiento global (GPS) y la distancia máxima por ruta se establece uniformemente en 600 Km.

Situación a priori del estudio

El documento no presenta valores específicos a determinados parámetros que brinden una noción del funcionamiento de la operación de transporte antes de la aplicación del modelo propuesto; sin embargo, los autores afirman que el sistema de logística inversa para productos electrónicos EOL en Corea del Sur es **ineficiente** en términos del proceso de entrega de los bienes recogidos por los centros de recolección a su respectivo centro de manejo regional.

De igual forma, los autores brindan información del modo de operación inicial, indican por ejemplo que los centros de recolección cuentan con su propia flota vehicular y toman decisiones individuales con respecto a la entrega de los bienes recolectados; se puede asegurar en ese caso que no existe un procedimiento óptimo para determinar el tiempo y la cantidad de la entrega, generando una operación ineficiente en aspectos como: bajo porcentaje de utilización de la capacidad de los vehículos, horas extras, tiempo de inactividad en los centros regionales de recolección, entre otros. En consecuencia de lo anterior los autores proponen el siguiente enfoque de solución para optimizar el proceso.

Enfoque de solución

Se desarrolla un nuevo sistema de recolección dirigido a minimizar la distancia recorrida por los vehículos en un periodo de tiempo fijo, para ello se tienen en cuenta las siguientes modificaciones respecto al modo de operación inicial: cada centro de manejo regional cuenta ahora con su propia flota vehicular compuesta por una cantidad suficiente de camiones idénticos para visitar los diferentes puntos de recolección dentro de su propia región, teniendo en cuenta una distancia máxima de recorrido para cada uno de ellos; además, se presume que los centros de

manejo regional tienen la capacidad de evaluar el nivel de inventario en cada punto a través del uso de algún sistema de información computarizado para la toma de decisiones con respecto a las rutas y su frecuencia.

Con base en lo anterior, se puede determinar que la situación presenta características del problema simétrico de enrutamiento de vehículos capacitados con un único depósito y una distancia máxima de recorrido determinada. El problema se define como un gráfico $G = (V, E)$, donde el conjunto $V = \{0, 1, \dots, n\}$ representa el conjunto de nodos, siendo V_0 un depósito (Centro de recolección regional respectivo) mientras que los nodos restantes representan a los clientes (centros de recolección de autoridades locales y centros de distribución de los fabricantes), cada uno de ellos asociado con una demanda no negativa q_i . Por otro lado, el conjunto E representa los arcos que unen estas entidades, cabe resaltar que estos no son dirigidos y que a cada relación (i, j) se asocia un costo de longitud $c_{i,j}$; el objetivo es el diseño de m rutas con el menor costo total cada una comenzando y terminando en el depósito específico según sea el caso.

Otro aspecto importante a tener en cuenta en el modelo, es que se define una variable decisión X_{ij}^v que toma el valor de 1 si el vehículo v viaja en el arco (i, j) y 0 en el caso contrario, del mismo modo se definen una serie de restricciones para la obtención de un resultado bajo el contexto esperado, estas son: I. Cada nodo debe ser visitado por exactamente un vehículo, II. Cada vehículo debe abandonar el nodo que ya ha visitado, III y IV. No se excede la capacidad del vehículo ni la limitación en la duración máxima de la ruta y V. Se evita la generación de subciclos.

Para resolver el modelo explicado anteriormente de forma general, los autores emplearon el algoritmo TABUROUTE que en el momento era una de las mejores metaheurísticas para la solución de problemas de ruteo de vehículos relativamente grandes con restricciones de capacidad y largo de ruta. La versión principal de este algoritmo utiliza tres subprocesos: la inserción generalizada (GENI -*Generalized insertion*-), el desenrollado y el encordado (US -*the Unstringing and Stringing*-) que es un mecanismo para establecer soluciones vecinas al quitar un vértice de su ruta actual y colocarlo en otra ruta y a su vez el algoritmo TABUROUTE optimiza esta nueva ruta, de tal forma que mediante un procedimiento de búsqueda se encuentre la mejor solución posible entre soluciones vecinas; se dice que dos soluciones son vecinas si son cercanas entre sí. Finalmente, se utiliza una estrategia de diversificación donde se penalizan los nodos que se han movido con frecuencia para aumentar la probabilidad de considerar diferentes soluciones (Kim et al., 2009). A continuación se analizan los resultados luego de implementar el modelo y algoritmo de solución expuestos anteriormente.

Resultados

Es importante destacar que se resuelve el modelo para cada uno de los centros de recolección regionales de forma independiente; el TABUROUTE fue codificado en lenguaje Visual Basic y

se ejecutó en una PC con una CPU Intel Core 2 Quad a 2,4 GHz y 3,25 GB de RAM. A continuación se muestran los resultados para cada área.

Región metropolitana

Los resultados indican que para la recolección de todos los productos EOL de la región metropolitana cuyo depósito es el centro de manejo regional **MRC**, se requiere de 24 rutas con una distancia promedio de recorrido de 132,78 Km y un promedio de utilización de la capacidad de los vehículos del 83,46%, el resultado obtenido se resume en la Tabla:

Tabla 12. Rutas VRP generadas para MRC

Ruta	Rutas	Distancia (Km)	Utilización cap. del camión (%)
1	00-60-61-11-00	44,1	19
2	00-08-00	62,8	86
3	00-07-00	62,8	94
4	00-59-58-06-05-57-00	169,5	87
5	00-56-55-13-45-00	171,6	100
6	00-47-48-46-40-37-00	133	89
7	00-43-39-36-00	137,6	72
8	00-16-42-50-00	183,2	84
9	00-44-41-04-09-00	443,9	60
10	00-10-12-15-01-25-00	479,2	92
11	00-19-29-28-30-34-00	183	97
12	00-17-35-31-32-18-00	120	76
13	00-33-27-24-21-22-23-00	116,1	97
14	00-20-38-00	86,6	68
15	00-49-52-54-51-02-00	87,8	98
16	00-53-00	39,1	21
17	00-26-14-00	28,2	99
18	00-03-00	12,4	64
19	00-03-00	12,4	100
20	00-05-00	140,6	100
21	00-08-00	62,8	100
22	00-16-00	143,3	100
23	00-16-00	143,3	100
24	00-57-00	123,5	100

Fuente: Adaptado de Kim et al. (2009)

La *Figura 24.* refleja el resultado presentado anteriormente y también es emitida por la herramienta empleada para la solución del modelo.

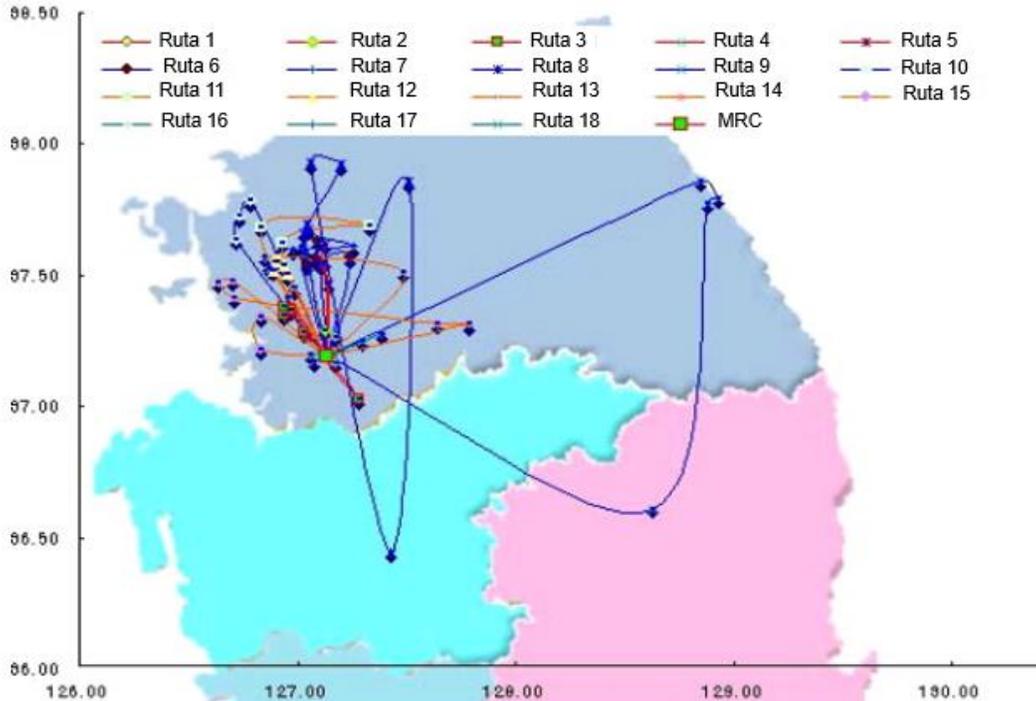


Figura 24. Mapa de rutas VRP generadas para MRC

Fuente: Adaptado de Kim et al. (2009)

Con relación al resultado presentado en la Tabla 12; son tres los aspectos clave que se deben considerar: el primero de ellos es que no se establece la cantidad de vehículos necesaria para dar cumplimiento a las rutas definidas; sin embargo, los autores determinan que se necesita una cantidad menor en relación a las rutas, pues teniendo en cuenta que ninguna de estas supera la limitante de distancia establecida, existe la posibilidad de que un vehículo realice múltiples viajes contribuyendo directamente a la disminución del costo por concepto de transporte. El segundo aspecto a tener en cuenta son las rutas con un bajo porcentaje de utilización de la capacidad, esto lo que representa es que los puntos de recolección relacionados no deben ser visitados diariamente sino en periodos por ejemplo semanales; finalmente es importante aclarar que existen rutas repetidas a causa de los altos niveles de suministro de bienes en algunos puntos de recolección.

Región del medio oeste (Chung Bu), región del medio este (Yong Nam) y la región suroeste (Ho Nam)

Para estas regiones el documento no entrega de forma detallada el resultado sino a través de indicadores referentes a la operación de transporte como se muestra subsiguientemente. Para la recolección en la región del medio oeste (**Chung Bu**), cuyo deposito es el centro de manejo regional **ARC** se requiere de 21 rutas con una distancia de recorrido promedio de 214,69 Km y un porcentaje promedio de utilización de la capacidad del 84,62%; para la región del medio este (**Yong Nam**), cuyo centro de selección es el centro de manejo regional **CRC**, se requiere de 34 rutas con un promedio de distancia recorrida de 175,35 Km y un porcentaje de utilización de la

capacidad promedio del 86,76%; por ultimo, para el proceso de recolección en la región suroeste (**Ho Nam**), cuyo deposito es el centro de recolección regional **HRC**, se requiere de 9 rutas con una distancia promedio de recorrido de 207,77 Km y un promedio de utilización de la capacidad de los vehiculos del 80,78%.

Teniendo en cuenta como principal indicador el porcentaje de utilización de la capacidad de los vehiculos y una reducción del 49% en el costo global del sistema de recolección respecto a la situación inicial, se puede afirmar que el modelo planteado es eficiente y genera una solución con una calidad relativamente alta.

2.5 Caso V: Una Solución al Enrutamiento de Vehículos en Ciudades Montañas Considerando Aspectos Ambientales y Económicos, caso Manizales.

Contextualización y descripción del caso

Aunque este caso no está relacionado con cadenas de abastecimiento inversas, se propone su análisis e inclusión en el documento con el objetivo de demostrar que en el contexto nacional también se desarrollan actividades de diseño de rutas teniendo como principal enfoque el problema de ruteo de vehículos, además sus características pueden servir como base para la toma decisiones en relación a los distintos aspectos que deben definir en la operación de transporte.

A lo largo del desarrollo de este documento, se ha podido evidenciar que en la mayoría de los casos se ha considerado a la ruta más corta como la solución que minimiza tanto costos como emisiones; con el objetivo de analizar esta premisa Suarez-Chilma, Sarache & Costa (2018) propusieron un modelo de problema de ruteo de vehículos capacitado CVRP estudiado en el capítulo anterior como la versión general, en búsqueda de lograr un equilibrio adecuado entre el costo de transporte y el desempeño ambiental. Como se mencionó anteriormente la mayor parte de los trabajos relacionados con esta temática consideran que la reducción de la distancia recorrida es la mejor manera de reducir el consumo de combustible y las emisiones, dicha proposición según los autores de este planteamiento es verdadera siempre y cuando todas las rutas se desarrollen en terreno plano o poco inclinado, por lo que en su planteamiento en particular el modelo analiza la potencia requerida por un vehículo considerando factores como: la pendiente, la velocidad media, el tamaño de la carga, la resistencia al rodamiento, la resistencia aerodinámica, la eficiencia del motor y la eficiencia de la transmisión de manera que es posible hacer una estimación del consumo total de combustible y de las emisiones de CO_2 .

El modelo que se detalla a continuación fue aplicado a un canal de distribución de alimentos ubicado en la ciudad de Manizales situada en la cordillera de los andes a 2150 metros sobre el nivel del mar, por la características topográficas de esta ciudad el proceso de transporte en cadenas de abastecimiento presenta una alta complejidad pues es común encontrar pendientes con una inclinación de hasta el 36% (Suarez-Chilma et al., 2018). En cuanto a la información de la operación de transporte para la aplicación del modelo se consideró una operación diaria, donde 33 órdenes debían ser entregadas a diferentes clientes a lo largo de la ciudad; para la obtención entre las pendientes y las distancias se utilizó el software ArcGis.

Situación a priori del estudio

En el documento no se establecen mayores detalles en relación a la situación de la empresa antes de la aplicación del modelo, únicamente se referencian los siguientes datos relacionados con el desarrollo completo de la ruta:

- **Distancia recorrida:** 72,4 km
- **Consumo de combustible:** 2,4 galones

Enfoque de solución

Para establecer una ruta que cumpla con los lineamientos especificados anteriormente, los autores propusieron un modelo de problema de enrutamiento de vehículos capacitado formulado de la siguiente manera:

Se define como un gráfico no dirigido $G = (V, A)$, donde V representa el conjunto de clientes y $V = 0$ el depósito; a su vez A denota el conjunto de arcos que conectan estos agentes. Cada cliente i está asociado con una demanda conocida d_i y el depósito cuenta con una demanda ficticia $d_0 = 0$. En el depósito se encuentra disponible un grupo K de vehículos idénticos cada uno con capacidad C . Así mismo, se incluyen algunas restricciones como: cada cliente debe ser visitado solo una vez y que los vehículos inicien y terminen el recorrido en el depósito. También se incluye un costo no negativo $C_{i,j}$ que está asociado con cada arco (i, j) , el cual representa el consumo de combustible para ir del cliente i al cliente j . Por último se define una variable de decisión $x_{i,j}$, que toma el valor de 1 si el arco (i, j) está incluido en la solución o 0 en el caso contrario.

Respecto al consumo de combustible, el consumo $C_{i,j}$ es obtenido a partir de una adaptación del modelo de cálculo de potencia específica del vehículo y la función de tasa de consumo de combustible, teniendo en cuenta factores:

- La inercia.
- El gradiente.
- La velocidad.
- La aceleración.
- La masa.
- La resistencia aerodinámica y al rodamiento.
- La eficiencia y la velocidad de la transmisión del vehículo.

El modelo es solucionado mediante un algoritmo genético que *“permite hallar soluciones aproximadas al óptimo global gracias a su robustez y a su paralelismo implícito, el cual le permite operar de forma simultánea con varias soluciones, evitando convergencias prematuras hacia óptimos locales”* (Suarez-Chilma et al., 2018).

Resultados: Los resultados obtenidos luego de la ejecución del modelo son los siguientes,

Cuando se optimiza únicamente el **consumo**:

- **Distancia recorrida:** $72,4 \pm 0,9$ km
- **Consumo de gasolina:** $2,1 \pm 0,02$ galones

Cuando se optimiza la **distancia** y el **consumo**:

- **Distancia recorrida:** $68,5 \pm 3,0$ km
- **Consumo de gasolina:** $2,2 \pm 0,1$ galones

Respecto a los datos presentados anteriormente, es importante resaltar que las soluciones con menor distancia no estuvieron asociadas a un menor consumo, cuando se buscó optimizar el consumo, el valor medio de la distancia no cambió en comparación a la situación inicial; sin embargo, el consumo se redujo aproximadamente en un 12,2%.

Se presenta a continuación en la Tabla 13. el resumen de la información tratada a lo largo del Capítulo II: “**Caracterización de casos empíricos relacionados con el diseño de cadenas de abastecimiento inversas considerando decisiones del VRP**”. En dicha Tabla se identifican los casos estudiados en el documento, se detalla el lugar donde se desarrolló y el tipo de residuo inmerso en el proceso, el objetivo del modelo planteado, el enfoque de solución y finalmente, los resultados y conclusión de cada uno de ellos.

Tabla 13. Cuadro resumen información Capítulo II

Caso	Ubicación y tipo de residuo	Objetivo modelo	Enfoque de solución	Resultado y/o conclusión
Planificación de un sistema de recolección. Fuente: (Ramos, Gomes, & Barbosa-Póvoa, 2013) A considerar: División en el plan de enrutamiento.	Portugal, 11 municipios. Aceite de cocina post-uso.	Minimizar el costo a través del número de rutas y la distancia recorrida.	Se formula como un modelo de programación lineal de enteros mixtos (MILP) en GAMS 23.6. Se resolvió a través la herramienta CPLEX Optimizer 12.1.0.	Reducciones Periodo normal: Distancia recorrida: 13% Costos de contratación: 11% Periodo estacional: Distancia recorrida: 14% Costos de contratación: 13%
Sistema de recolección de materiales reciclables. Fuente: (Rodrigues, Ramos, Isabel, & Barbosa-Póvoa, 2014) A considerar: Enfoque sostenible para la formulación.	Portugal, 19 municipios. Vidrio, papel, plástico/metal.	Minimizar distancia recorrida (factor económico), emisiones de CO_2 (factor ambiental), e intervalo tiempo de trabajo para conductores. (Factor social).	Se formula como un modelo multi-objetivo en GAMS 23.7. Se soluciona bajo un enfoque de dos pasos, individual para cada material. 1. Generación de rutas factibles. 2. Resolución problema multi-objetivo. A través del CPLEX Optimizer 12.3.0.	Disminuciones Distancia recorrida 10% Emisiones de CO_2 9% Intervalo tiempo de trabajo por conductores 21%
Enrutamiento de vehículos para recolección eco-eficiente. Fuente: (Bing, de Keizer, Bloemhof-Ruwaard, & van der Vorst 2014) A considerar: Se tienen en cuenta 2 métodos de recolección y 2 métodos de separación diferentes.	Wageningen, Países Bajos. Desechos plásticos domésticos.	Minimizar el costo total de transporte y el impacto ambiental.	Para el primer escenario: Se formula como un modelo de programación lineal de enteros mixtos (MILP). Se resolvió a través la herramienta ILOG Cplex. Todos los escenarios: Formulación general para todos los escenarios. División del conjunto de nodos. Solución algoritmo Tabú.	Primer escenario (Modelo MILP): Reducción costos : 7% Modelo general: CU totales (Euros/Kg/semana) Escenario 1: 0,014 Escenario 2: 0,061 Escenario 3: 0,021 Escenario 4: 0,057

Enrutamiento de vehículos en logística inversa.	de Sur Corea. Productos electrónicos EOL.	Minimizar el costo a través del número de rutas y la distancia recorrida.	Formulación independiente para cada centro regional. Se solucionan a través del algoritmo TABUROUTE codificado en lenguaje Visual Basic.	Reducción del 49% en el costo global del sistema de recolección.
A considerar: Formulación independiente para cada centro regional.				
Enrutamiento de Vehículos en Ciudades Montañosas.	de Alimentos	Minimizar costos de operación e impacto ambiental.	Se Formula el modelo con el objetivo de minimizar el consumo de combustible. Se soluciona el modelo a través de un algoritmo genético.	El consumo se redujo en un 12,2%. Las soluciones con menor distancia no estuvieron asociadas a un menor consumo.

3. Capítulo III: Aspectos relevantes del ruteo de vehículos para el diseño de una cadena dedicada a la recuperación de llantas usadas en el contexto urbano

En el siguiente capítulo se identifican y analizan los diferentes aspectos a considerar en el diseño de rutas para llevar a cabo un proceso de recolección de llantas usadas en la ciudad de Ibagué; lo anterior bajo el enfoque del problema de ruteo de vehiculos manteniendo así la orientación dada a esta investigación.

Como se ha mencionado anteriormente, el problema de ruteo de vehiculos VRP es una de las principales herramientas para el diseño y construcción de rutas que satisfacen unos requerimientos determinados dependientes del contexto de desarrollo del problema, por tal motivo la identificación y posterior contextualización de sus componentes brinda una noción importante de los aspectos a considerar en el momento de establecer un sistema de ruteo en un área determinada; según Arboleda-Zúñiga, López, & Lozano (2016) estos componentes son: la red de carreteras, los depositos, los clientes, los vehiculos y los conductores. A continuación y de acuerdo a información obtenida mediante paginas web oficiales y visitas a entidades pertinentes, se desarrolla un estudio exhaustivo sobre la situación actual de cada componente en la ciudad de Ibagué, con el objetivo de proporcionar una base sólida ante posteriores investigaciones en relación a las condiciones de operación necesarias en el proceso de transporte.

3.1 Red de carreteras

Un estudio realizado por la Alcaldía de Ibagué (2016) y presentado en su plan de desarrollo “*POR IBAGUÉ CON TODO EL CORAZÓN 2016 – 2019*” respecto al estado de las vías de la ciudad, señala que la zona urbana del municipio cuenta con 175 km de red vial, compuesta por 72 km de vías principales y 103 km de vías secundarias, esta situación se detalla en el anexo 1.

“*Nomenclatura vial*” que consiste en un mapa donde se pueden observar cada una de las calles y avenidas de la ciudad además de su clasificación según sus características; se puede identificar a grandes rasgos que son numerosas las vías clasificadas como principales o de primer orden; no obstante, a continuación se presentan las de mayor importancia por su función de conectividad con la mayor parte de la ciudad: la carrera quinta (carrera 5), la avenida Guabinal (comprendida por las carreras 8 y 9), la avenida Ambalá (comprendida por las carreras 11,12,13 y 14), la avenida Ferrocarril (comprendida por las carreras 2 y 4F) y la avenida Mirolindo (comprendida por las carreras 8 sur, 19 sur y 20 sur). Esta información fue obtenida en la página oficial de la alcaldía de Ibagué en la sección del plan de ordenamiento territorial (Grupo POT Ibagué, 2014).

De igual forma es importante destacar que en el documento se resalta un deterioro del 60% de la infraestructura de transporte y movilidad urbana, producto de la falta de mantenimiento preventivo de las redes viales, el completo olvido por las estructuras peatonales y la ausencia de iniciativas en el desarrollo de vías para medios de transporte alternativos, se reafirma este concepto al indicar que gran parte de la infraestructura vial ha cumplido su vía útil por la presencia de tráfico pesado sobre vías que no están diseñadas para tales cargas y por la improvisación en obras de instalación por parte de los operadores de servicios públicos, generando esto actualmente graves afectaciones a la movilidad y un incremento en los índices de accidentalidad.

3.2 Depósitos

Determinar la ubicación del depósito es una decisión trascendental por su incidencia directa en el costo por concepto de transporte, este se logra reducir en la medida que se consigue ubicar este establecimiento de la forma más cercana posible a todos los clientes aunque alcanzar dicha situación en la realidad presenta una alta complejidad en razón a las distintas reglamentaciones establecidas en los municipios. Por consiguiente para delimitar un área en la que se puedan situar los depósitos del sistema en estudio se debe remitir al decreto 0823 del año 2014 emitido por la alcaldía de Ibagué, a través del cual **“SE ADOPTA LA REVISIÓN Y AJUSTE DEL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL MUNICIPIO DE IBAGUÉ Y SE DICTAN OTRAS DISPOSICIONES”**, que en líneas generales especifica la forma en que se debe distribuir el territorio en pro del desarrollo y el bienestar colectivo de la ciudadanía, este en su artículo 61 trata el aprovechamiento de los residuos sólidos indicando que una de las formas o métodos de usufructuar dichos desechos es a través de la reutilización y el reciclaje, posibles manejos dados al material en el proyecto lo que hace aplicable este decreto al contexto de estudio (Alcaldía de Ibagué, 2014).

En este mismo artículo se indica que las plantas de aprovechamiento (depósitos) de tales residuos deberán ubicarse dentro del suelo establecido como industrial y/o sub-urbano delimitado con color naranja en el mapa de división político-administrativa encontrado en el anexo 2. Con base en lo anterior se puede determinar que la zona delimitada para la instalación del depósito se encuentra localizada en el sector de Buenos Aires corregimiento de la ciudad de Ibagué, caracterizado por un significativo crecimiento de la actividad industrial ejemplo claro de ello es la construcción del parque logístico nacional del Tolima, la zona franca y la ubicación reciente

en el sector de otros tipos de compañías (Alcaldía de Ibagué, 2014). La razón principal para delimitar una zona con estas características para el manejo de residuos sólidos se fundamenta en el artículo 6 relacionado con los principios del POT de Ibagué, indicando en uno de sus puntos que se debe asegurar la dignidad y el bienestar colectivo de la ciudadanía, situación que se podría poner en riesgo con la ubicación errónea de un depósito pues son conocidas las consecuencias que pueden resultar de un mal manejo del elemento en cuestión, a pesar de no ser considerado en Colombia como un desecho peligroso (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

Luego de definir la zona en que el depósito debe ser ubicado se deben precisar algunos requisitos exigidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018) respecto a la planta física, se indica que las llantas recolectadas deben ser almacenadas en sitios completamente cubiertos y apiladas de forma ordenada, además de contar con fuertes medidas de seguridad contra incendios y disponer de publicidad y documentación visible relacionada con el sistema y sus responsables.

3.3 Clientes

En un sistema de ruteo se define al cliente como la entidad que debe ser visitada por uno o varios vehículos para la entrega de un producto, la recolección de un residuo o en algunas situaciones los dos casos simultáneamente (Daneshzand, 2011), se hace esta aclaración pues el decreto 1326 del año 2017 emitido por Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible (2017) en su artículo 15 puntualiza que los productores de las llantas, es decir las empresas fabricantes tienen la responsabilidad formular y ejecutar un sistema de recolección selectiva y gestión ambiental de las llantas usadas, por lo que en un principio se podría entender que el cliente al que se le presta el servicio es la empresa productora como tal; no obstante para efectos del estudio del sistema de ruteo se consideran clientes a los puntos generadores del residuo por la razón definida al inicio de este punto.

Por consiguiente y con base en los artículos 17. Obligaciones de los comercializadores y distribuidores y 21. Obligación de los montallantas, del mismo decreto que adjudican la responsabilidad a estos establecimientos de recolectar llantas, se puede establecer que los mismos serán los clientes del sistema de recolección bajo el enfoque del diseño de rutas. Con el objetivo de establecer la cantidad real de empresas dedicadas a tales fines se procedió a realizar una visita a la Cámara de Comercio de la ciudad de Ibagué CCI, donde se pudo obtener la información detallada en la Tabla 14. a corte del 30 de junio de 2018 de empresas registradas según código CIU -*Clasificación Industrial Internacional Uniforme*-:

Tabla 14. *Empresas relacionadas con el sector automotriz y de las motos en la ciudad de Ibagué*

ACTIVIDAD ECONÓMICA	NÚMERO DE EMPRESAS
G4520** Mantenimiento y reparación de vehículos automotores	500
G4530** Comercio de partes, piezas y accesorios para vehículos automotores	332
G4541 ** Comercio de motocicletas y de sus partes piezas y accesorios	164
G4542 ** Mantenimiento y reparación de motocicletas y de sus partes y piezas	66

Fuente: Cámara de comercio de Ibagué (2018)

Sin embargo, a través de la dirección de investigaciones y publicaciones de la Cámara de comercio de Ibagué (2018) fuente de la información, se pudo establecer que dentro del total de las actividades referenciadas en la Tabla 14, solo fueron encontrados 11 negocios que en su razón social se pudo identificar que son servitecas y 22 que son montallantas. En cuanto a las distribuidoras y comercializadoras se determinó que actualmente existen en la ciudad 22. Cabe destacar que estas cifras son de negocios formales y que a la fecha están al día en el pago de renovación de matrícula mercantil. Los datos entregados previamente ofrecen una idea consecuente para determinar la cobertura que se pretende tenga el sistema de recolección y con base en ello establecer los recursos necesarios para llevar a cabo la actividad de transporte como por ejemplo: el tipo y número de vehículos, los conductores, entre otros; componentes que serán contextualizados a continuación.

3.4 Vehículos

Actualmente en la ciudad de Ibagué existe una restricción para el tránsito de vehículos de carga pesada por las vías urbanas del municipio¹, declarada en el decreto 0460 del año 2000 por la Alcaldía de Ibagué (2000) con el propósito de conservar la malla vial del casco urbano y contribuir a la disminución de los problemas de congestión vehicular. Esta limitación representa una reducción en el panorama de los vehículos que posiblemente podrían ser seleccionados para llevar a cabo el proceso de transporte, imposibilitando obtener los beneficios tratados a lo largo del capítulo I que ofrecen los vehículos con un alta capacidad, como por ejemplo el requerimiento de menos rutas y por ende una menor cantidad de vehículos y conductores.

Es importante resaltar que en el documento no se especifican las características dimensionales ni el peso de un vehículo de carga pesada, se debe remitir entonces a la resolución 4100 del año 2004 expedida por el Ministerio de Transporte de Colombia (2004) por la cual se adoptan los límites de pesos y dimensiones en los vehículos de transporte de carga terrestres, en esta básicamente se realiza una caracterización y clasificación de los vehículos destinados para tal fin

¹ Esta información fue obtenida a través de una visita a la secretaría de transito transporte y movilidad de la ciudad de Ibagué.

de acuerdo a su sistema de propulsión y al número de ejes, los tipos son: camión, tracto-camión con semirremolque, camiones con remolque y camiones con remolque balanceado. En resumen a cada modelo de vehículo se le relaciona un peso bruto vehicular PBV definido como el peso del vehículo en marcha más el máximo de carga que este puede transportar, peso que en todos los casos es superior a las 25 toneladas un peso considerable para el estado de las vías en la ciudad de Ibagué, a excepción del camión sencillo de dos ejes cuyo PBV es de 16 toneladas límite máximo a tener en cuenta en este estudio.

Pese a tener la posibilidad de emplear vehículos de una mayor capacidad como se expuso previamente, se propone el uso de un automotor de menores dimensiones teniendo en cuenta la propuesta del proyecto de implementar una máquina para reducir el tamaño de las llantas al cortar estas en unidades significativamente más pequeñas, lo que contribuye al aprovechamiento del espacio en el automotor y por ende a un requerimiento volumétrico no muy significativo, conjuntamente este vehículo brinda la posibilidad de acceder a lugares que por sus características pueden presentar dificultades para el ingreso a vehículos de mayor tamaño. En la *Figura 25*. se presenta un modelo de camión con las particularidades sugeridas para el desarrollo del sistema de recolección cuyo PBV es de 4500 kg. En el anexo 3 se encuentra la ficha técnica del vehículo para mayores detalles.



Figura 25. Vehículo propuesto para el sistema de recolección
Fuente: HINO COLOMBIA (2018)

3.5 Conductores

Respecto a los conductores cabe destacar que para el manejo del vehículo propuesto, según información suministrada por la página oficial del Ministerio de Transporte de Colombia (2018) se requiere de una licencia de categoría B2, la cual permite la movilización del conductor en camiones, rígidos, busetas y buses para el servicio particular. Así mismo, es trascendente determinar si la persona encargada de la conducción deberá también cumplir con el proceso de carga del residuo al camión, lo que tiene una consecuencia directa en el costo total de la operación y además en el criterio de selección del trabajador por las exigencias físicas de tal actividad.

Como contribución propia de esta investigación, se propone tener en cuenta un aspecto que tiene un efecto significativo sobre el diseño de una cadena de abastecimiento inversa desde la perspectiva del ruteo de vehículos; se hace referencia a los *recolectores* existentes y reconocidos actualmente en la ciudad del desecho en cuestión, puesto que es importante conocer los distintos elementos de operación a fin de reunir y consolidar un conjunto de información que brinde un concepto de la forma en que las rutas se deben ejecutar, conjuntamente permite definir un panorama de las condiciones legales y económicas necesarias para la ejecución del sistema y así determinar las posibilidades que tiene el mismo de participar en el mercado real.

3.6 Recolectores

Se pudo establecer que en la ciudad de Ibagué actualmente distintas organizaciones ejecutan operaciones de recolección de residuos asociados a la actividad automotriz, como aceites lubricantes usados, filtros, baterías y pesas de plomo utilizadas en la alineación y balanceo de los vehículos; es importante destacar que estos generan un ingreso al punto generador pues empresas como Combustibles Juanchito S.A.S del municipio de Candelaria, Valle del Cauca, Acumuladores de Oriente Ltda de la ciudad de Medellín, Antioquia, entre otras; retribuyen económicamente por la entrega de estos desechos, de la misma forma es importante resaltar que estas compañías son provenientes de otras áreas del territorio nacional, lo que se convierte en una oportunidad para futuras investigaciones. Estos procesos de recolección formales se ejecutan a causa de la exigencias de la Corporación Autónoma Regional del Tolima CORTOLIMA para permitir la operación de distribución y comercialización de este tipo de productos.

En cuanto a las llantas tema central de esta investigación, como se trató en el Capítulo 3 punto 3 (3.3) según la resolución 1326 del año 2017 emitida por el Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible (2017), la responsabilidad del proceso de recolección de los residuos es del fabricante, se pudo establecer que existen programas como Rueda Verde para el cumplimiento de este proceso; no obstante, fue posible conocer que las visitas realizadas por este sistema son intermitentes e insuficientes conforme a la generación de este residuo, por lo que en la ciudad de Ibagué se debe optar por el servicio de la empresa de recolección de residuos municipales INTERASEO S.A.S, pagando un costo significativo por esta asistencia al no existir otra alternativa ni siquiera en el territorio nacional; esta situación ligada a que es el único residuo de los tratados hasta el momento que origina un costo para este tipo de organizaciones, abre un horizonte de acción relevante para esta investigación y su propósito final. Así mismo, se conoció que existen otros medios de recolección a través de entidades como la policía, colegios, alcaldías municipales, entre otros, que actúan como gestores y que a través de la presentación y aprobación de un proyecto ante CORTOLIMA pueden hacer uso del residuo; figura en la que podría ejecutarse el proyecto en cuestión. ²

² La información del punto 3.6 Recolectores fue obtenida a través de una visita realizada al área de seguridad y salud en el trabajo de la empresa SUCAMPO-SULLANTA S.A.S encargada del manejo de residuos.

Tabla 15. Cuadro resumen información Capítulo III

Aspecto	Documento relacionado	Consideraciones importantes
Red de carreteras	<p>Plan de desarrollo “POR IBAGUÉ CON TODO EL CORAZÓN 2016 – 2019” de la Alcaldía de Ibagué (2016)</p>	<p>175 km de red vial (72 km de vías principales y 103 km de vías secundarias). Anexo 1. “Nomenclatura vial”.</p> <p>Deterioro del 60% de la infraestructura de transporte y movilidad urbana.</p>
Depósitos	<p>Decreto 0823 del año 2014, artículo 61. Plan de Ordenamiento Territorial vigente emitido por la Alcaldía de Ibagué (2014)</p>	<p>Debe ser ubicado dentro del suelo establecido como industrial y/o sub-urbano. Anexo 2. “Mapa de división político-administrativa”.</p> <p>Corregimiento de Buenos Aires.</p> <p>Se deben tener en cuenta los requisitos exigidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018) respecto a la planta física.</p>
Clientes	<p>Datos emitidos por la dirección de investigaciones y publicaciones de la Cámara de comercio de Ibagué (2018).</p>	<p>Actualmente en la ciudad operan de forma legal:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 11 servitecas • 22 montallantas. • 22 Distribuidoras y comercializadoras
Vehículos	<p>Decreto 0460 del año 2000 Emitido por la Alcaldía de Ibagué (2000).</p> <p>Resolución 4100 del año 2004 expedida por el Ministerio de Transporte de Colombia (2004).</p>	<p>Restricción para el tránsito de vehículos de carga pesada por las vías urbanas del municipio.</p> <p>Se propone el uso de un vehículo cuya ficha técnica se encuentra adjunta en el anexo 2.</p>
Conductores	<p>Información suministrada por la página oficial del Ministerio de Transporte de Colombia (2018)</p>	<p>Se requiere de una licencia de categoría B2, la cual permite la movilización del conductor en camiones, rígidos, busetas y buses para el servicio particular.</p>

Recolectores	Resolución 1326 del año 2017 emitida por el Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible (2017)	<p>La Responsabilidad del proceso de recolección de los residuos es del fabricante.</p> <p>No obstante estos procesos son intermitentes, ineficientes e insuficientes.</p> <p>Se debe optar en Ibagué por el servicio de la empresa de recolección de residuos municipales INTERASEO S.A.S.</p>
--------------	--	---

Nota aclaratoria:

En la metodología se definen unos criterios para la selección de la información utilizada como base para esta investigación, principalmente la selección de artículos en inglés y extraídos de revistas de alto impacto en la clasificación de *Scimago SJR* (ubicadas en los cuartiles Q1 y Q2); no obstante, por la necesidad de contextualizar el estudio se realizó una excepción en los capítulos I, II Y III, donde se utilizaron tres artículos de universidades nacionales.

Conclusiones, contribuciones y limitaciones

Conclusiones

- I. El problema de ruteo de vehículos constituye la principal herramienta para el diseño de rutas en cadenas de abastecimiento tanto directas como inversas, estableciendo un amplio panorama para la adaptabilidad según las características de operación definidas o requeridas.
- II. El principio de la sostenibilidad se ha convertido en el principal criterio a tener en cuenta en el desarrollo de estudios relacionados con el diseño de rutas en el campo de la investigación operativa, en búsqueda del equilibrio entre los factores económicos, sociales y ambientales a fin de contribuir a la situación actual del mundo en relación al medio ambiente.
- III. La literatura que relaciona a las cadenas de abastecimiento inversas con el diseño de rutas bajo el enfoque del problema de ruteo de vehículos no es abundante. Sin embargo, la documentación existente es de gran utilidad por la calidad en las publicaciones demostrando su aplicabilidad y eficiencia a través del desarrollo de casos reales.
- IV. Para la construcción de un sistema de recolección en un área urbana determinada se deben tener en cuenta los distintos aspectos que tienen incidencia en dicho proceso y la amplia reglamentación que rige sobre cada uno de ellos.
- V. Los *recolectores* son un aspecto que debe ser considerado en el diseño de una cadena dedicada a la recuperación de cualquier desecho por la influencia general de estos en todo el sistema. No obstante, en la literatura no existe gran interés por el estudio de este componente.

Contribuciones

La contribución principal de este documento es la construcción un marco conceptual y legal de aplicabilidad que sirve como apoyo para el modelamiento de una cadena de recolección de llantas en la ciudad de Ibagué, dichos datos soportados por fuentes de alta confiabilidad, así mismo el planteamiento de una serie proposiciones de gran relevancia para tal procedimiento.

Limitaciones

La limitación principal en el desarrollo de esta investigación es el acceso limitado a información mediante únicamente dos bases de datos, pues en muchos casos no se tuvo acceso a documentación pertinente para este estudio de revistas especializadas que no se encuentran en tales registros; de igual forma, para la obtención de algunos datos relacionados con la ciudad de Ibagué se debió realizar extensas gestiones en diferentes entidades.

Bibliografía

- Alcaldía de Ibagué. (2000). Decreto 0460 del 2000.pdf. Ibagué, Tolima. Retrieved from http://www.ibague.gov.co/portal/admin/archivos/normatividad/2000/DECRETO_460.PDF
- Alcaldía de Ibagué. (2014). Decreto 0823 de 2014. Ibagué, Tolima. Retrieved from http://www.ibague.gov.co/portal/admin/archivos/normatividad/2014/DECRETO_0823_DE_2014.pdf
- Alcaldía de Ibagué. (2016). Plan de Desarrollo “POR IBAGUÉ CON TODO EL CORAZÓN 2016 – 2019.” Ibagué, Tolima. Retrieved from <http://www.ibague.gov.co/portal/admin/archivos/publicaciones/2016/14981-PLA-20161104.pdf>
- Arboleda-Zúñiga, J., López, A. X., & Lozano, Y. L. (2016). El problema de ruteo de vehículos [VRP] y su aplicación en medianas empresas colombianas. *Ingenium*, 10(27), 29–36.
- Archetti, C., Bianchessi, N., & Speranza, M. G. (2014). Branch-and-cut algorithms for the split delivery vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 238(3), 685–698. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.04.026>
- Belhaiza, S., Hansen, P., & Laporte, G. (2014). A hybrid variable neighborhood tabu search heuristic for the vehicle routing problem with multiple time windows. *Computers and Operations Research*, 52, 269–281. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.08.010>
- Benjamin, A. M., & Beasley, J. E. Ñ. (2010). Computers & Operations Research Metaheuristics for the waste collection vehicle routing problem with time windows , driver rest period and multiple disposal facilities. *Computers and Operation Research*, 37(12), 2270–2280. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.03.019>
- Bertazzi, L., & Secomandi, N. (2016). Improved Rollout Search for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *European Journal of Operational Research*, (1), 1–32. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.03.034>
- Bing, X., de Keizer, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & van der Vorst, J. G. A. J. (2014). Vehicle routing for the eco-efficient collection of household plastic waste. *Waste Management*, 34(4), 719–729. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.01.018>
- Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuysse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers and Industrial Engineering*, 99, 300–313. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>
- Cámara de comercio de Ibagué. (2018). Investigaciones y publicaciones. Retrieved July 22, 2018, from <https://www.ccibague.org/index.php/investigaciones-y-publicaciones/publicaciones>
- Coelho, V. N., Grasas, A., Ramalhinho, H., Coelho, I. M., Souza, M. J. F., & 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*, 250(2), 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.09.047>
- Costa-Salas, Y., Sarache, W., & Überwimmer, M. (2017). Fleet size optimization in the

- discarded tire collection process. *Research in Transportation Business and Management*, 24(March), 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2017.08.001>
- Daneshzand, F. (2011). *The Vehicle-Routing Problem. Logistics Operations and Management*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385202-1.00008-6>
- De Bruecker, P., Beliën, J., De Boeck, L., De Jaeger, S., & Demeulemeester, E. (2018). A model enhancement approach for optimizing the integrated shift scheduling and vehicle routing problem in waste collection. *European Journal of Operational Research*, 266(1), 278–290. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.059>
- Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2012). An adaptive large neighborhood search heuristic for the Pollution-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 346–359. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.06.044>
- Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2014). The bi-objective Pollution-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 232(3), 464–478. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.002>
- Desaulniers, G., Madsen, O. B. G., & Ropke, S. (2014). The Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*, 119–159. <https://doi.org/10.1137/1.9781611973594.ch5>
- Dhouib, D. (2014). An extension of MACBETH method for a fuzzy environment to analyze alternatives in reverse logistics for automobile tire wastes. *Omega (United Kingdom)*, 42(1), 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.02.003>
- El-Sherbeny, N. A. (2010). Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods. *Journal of King Saud University - Science*, 22(3), 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2010.03.002>
- Erdoğan, S., & Miller-Hooks, E. (2012). A Green Vehicle Routing Problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), 100–114. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.08.001>
- Gendreau, M., & Potvin, J. (2009). An exact -constraint method for bi-objective combinatorial optimization problems : Application to the Traveling Salesman Problem with Profits, 194, 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.12.014>
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603–626. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- Grupo POT Ibagué. (2014). Nomenclatura vial. Ibagué, Tolima: Alcaldía de Ibagué. Retrieved from <http://www.ibague.gov.co/portal/admin/archivos/publicaciones/2015/12830-DOC-20151201.pdf>
- HINO COLOMBIA. (2018). Camiones HINO. Retrieved July 22, 2018, from <http://site.pracodidacol.com/comprar-nuevo-hino-colombia-dutro-pro-en-bogota-colombia-praco-didacol>
- Hoff, A., Andersson, H., Christiansen, M., Hasle, G., & Løkketangen, A. (2010). Industrial

- aspects and literature survey: Fleet composition and routing. *Computers and Operations Research*, 37(12), 2041–2061. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.03.015>
- Jacob-vaillancourt, C., & Sorelli, L. (2018). Characterization of concrete composites with recycled plastic aggregates from postconsumer material streams. *Construction and Building Materials*, 182, 561–572. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.083>
- Jaunich, M. K., Levis, J. W., DeCarolis, J. F., Gaston, E. V., Barlaz, M. A., Bartelt-Hunt, S. L., ... Jaikumar, R. (2016). Characterization of municipal solid waste collection operations. *Resources, Conservation and Recycling*, 114, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.07.012>
- Juan, A., Faulin, J., Grasman, S., Riera, D., Marull, J., & Mendez, C. (2011). Using safety stocks and simulation to solve the vehicle routing problem with stochastic demands. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(5), 751–765. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.09.007>
- Kek, A. G. H., Cheu, R. L., & Meng, Q. (2008). Distance-constrained capacitated vehicle routing problems with flexible assignment of start and end depots. *Mathematical and Computer Modelling*, 47(1–2), 140–152. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2007.02.007>
- Kim, H., Yang, J., & Lee, K. D. (2009). Vehicle routing in reverse logistics for recycling end-of-life consumer electronic goods in South Korea. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(5), 291–299. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.03.001>
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2016). Thirty years of heterogeneous vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 249(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.020>
- Koç, Ç., & Laporte, G. (2018). Vehicle routing with backhauls: Review and research perspectives. *Computers and Operations Research*, 91, 79–91. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.11.003>
- Leggieri, V., & Haouari, M. (2017). Lifted polynomial size formulations for the homogeneous and heterogeneous vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 263(3), 755–767. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.05.039>
- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T. S., Chung, S. H., & Lam, H. Y. (2014). Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 41(4 PART 1), 1118–1138. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.107>
- Liu, S. (2013). A hybrid population heuristic for the heterogeneous vehicle routing problems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 54, 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.03.010>
- Medina, L. B. R., Rotta, E. C. G. La, & Castro, J. A. O. (2011). Una Revisión al Estado del Arte del Problema de Ruteo de Vehículos: Evolución Histórica Y Métodos De Solución. *Ingeniería*, 16(2), 35–55. Retrieved from <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/3832>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). Llantas Usadas | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Retrieved July 21, 2018, from

<http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/248-plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-sin-galeria-14>

Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. (2017). Resolución 1326 de 2017.

Ministerio de Transporte de Colombia. (2004). *Resolucion_4100_2004.pdf*. Bogotá D.C. Retrieved from <https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=241>

Ministerio de Transporte de Colombia. (2018). Mintransporte presenta nueva licencia de conducción | Ministerio de Transporte de Colombia. Retrieved July 22, 2018, from https://www.mintransporte.gov.co/Publicaciones/mintransporte_presenta_nueva_licencia_de_conduccion

Miranda, D. M., & Conceição, S. V. (2016). The vehicle routing problem with hard time windows and stochastic travel and service time. *Expert Systems with Applications*, *64*, 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.07.022>

Montoya-Torres, J. R., López Franco, J., Nieto Isaza, S., Felizzola Jiménez, H., & Herazo-Padilla, N. (2015). A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. *Computers and Industrial Engineering*, *79*, 115–129. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.10.029>

Montoya, A., Guéret, C., Mendoza, J. E., & Villegas, J. G. (2017). The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function. *Transportation Research Part B: Methodological*, *103*, 87–110. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.02.004>

Newbert, S. L. (2007). EMPIRICAL RESEARCH ON THE RESOURCE-BASED VIEW OF THE FIRM: AN ASSESSMENT AND SUGGESTIONS FOR FUTURE RESEARCH. *Academy of Management Journal*, *28*(1), 121–146. <https://doi.org/10.1002/smj>

Olivera, A., & Viera, O. (2007). Adaptive memory programming for the vehicle routing problem with multiple trips. *Computers and Operations Research*, *34*(1), 28–47. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.02.044>

Ramos, T. R. P., Gomes, M. I., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2013). Planning waste cooking oil collection systems. *Waste Management*, *33*(8), 1691–1703. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.04.005>

Rodrigues, T., Ramos, P., Isabel, M., & Barbosa-póvoa, A. P. (2014). Planning a sustainable reverse logistics system : Balancing costs with environmental and social concerns. *Omega*, *48*, 60–74. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.11.006>

Santos, L., Coutinho-Rodrigues, J., & Antunes, C. H. (2011). A web spatial decision support system for vehicle routing using Google Maps. *Decision Support Systems*, *51*(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2010.11.008>

Schneider, M., Schwahn, F., & Vigo, D. (2017). Designing granular solution methods for routing problems with time windows. *European Journal of Operational Research*, *263*(2), 493–509. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.059>

Soleimani, H., Chaharlang, Y., & Ghaderi, H. (2018). Collection and distribution of returned-remanufactured products in a vehicle routing problem with pickup and delivery considering

- sustainable and green criteria. *Journal of Cleaner Production*, 172, 960–970. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.124>
- Suarez-Chilma VF, Sarache WA, Costa YJ. Una Solución al Enrutamiento de Vehículos en Ciudades Montañas Considerando Aspectos Ambientales y Económicos. *Inf tecnológica*. 2018;29(3):3-14.
- Wolpert, S., & Reuter, C. (2012). Status Quo of City Logistics in Scientific Literature. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2269, 110–116. <https://doi.org/10.3141/2269-13>
- Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I., & Xu, Y. (2012). Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem. *Computers and Operations Research*, 39(7), 1419–1431. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.08.013>
- Yazgi Tütüncü, G., Carreto, C. A. C., & Baker, B. M. (2009). A visual interactive approach to classical and mixed vehicle routing problems with backhauls. *Omega*, 37(1), 138–154. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2006.11.001>
- Zhang, Y., Dubé, M. A., McLean, D. D., & Kates, M. (2003). Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis. *Bioresource Technology*, 90(3), 229–240. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00150-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00150-0)