

DISEÑO DE UN MODELO DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON CONSIDERACIONES
DE INVENTARIO EN PUNTOS DE VENTA DESDE UN CENTRO DE DISTRIBUCIÓN
DE UNA EMPRESA DEL NORTE DEL VALLE DEL CAUCA

YENNY FERNANDA GARCÉS CARTAGENA
RAFAEL ALEJANDRO ZAPATA MÉNDEZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
ZARZAL
2016

DISEÑO DE UN MODELO DE RUTEO DE VEHÍCULO CON CONSIDERACIONES DE
INVENTARIO EN PUNTOS DE VENTA DESDE UN CENTRO DE DISTRIBUCIÓN DE
UNA EMPRESA DEL NORTE DEL VALLE DEL CAUCA

YENNY FERNANDA GARCÉS CARTAGENA
RAFAEL ALEJANDRO ZAPATAMÉNDEZ

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar por el título de Ingenieros
Industriales

Director

Ingeniero Industrial
Msc. CARLOS ALBERTO ROJAS TREJOS

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
ZARZAL
2016

DEDICATORIA

Dedico la concepcion de este trabajo principalmente a Dios por su inmenso amor y bendiciones dadas durante todo el transcurso de mi vida. A mi hermana Danny que desde el cielo junto a Dios han estado guiando mis pasos.

A mi madre querida, por ser ella mi mayor orgullo, por su amor, por su apoyo incondicional durante toda mi vida y por los valores enseñados que hoy me permiten ser la persona que soy. A mis hermanos y sobrinos por sus palabras de aliento y apoyo para culminar esta importante etapa de mi vida.

A mi esposo Sebastián, por el amor, la paciencia y el apoyo incondicional durante toda nuestra historia. A mis hijos Sarita y Carlos José por ser ellos mi más grande y puro amor, mi fortaleza y motivacion para salir adelante y culminar todo objetivo propuesto.

Por último pero no menos importante, a mis suegros Gloria Amparo y Carlos Alberto, por sus concejos sabios, por su apoyo incondicional en cada paso,; y sobre todo por ser unas personas dignas de admirar y de ejemplo a seguir.

¡MUCHAS GRACIAS POR SER PARTE DE MI VIDA, GRACIAS POR SER MI FAMILIA!

Fernanda Garcés Cartagena

Dedico la concepción de este trabajo primordialmente a Dios, por darme salud, fortaleza, sabiduría y serenidad para culminar esta etapa de mi vida y por acompañarme y ser mi guía en todo momento.

A mi familia especialmente a mi madre por haberme dado la vida y por estar siempre a mi lado brindándome su apoyo y su amor, a mi abuela y mi tío por ser personas tan especiales e inspiradoras para mí y por acompañarme en todo momento brindándome su apoyo y confianza en el camino para la consecución de mis metas, a mi hermanito por llenar mis días de alegría y a mi novia por su apoyo incondicional a lo largo de esta etapa de mi vida.

A todas aquellas personas que de alguna manera han contribuido en mi formación como profesional.

Rafael Alejandro Zapata Méndez

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por guiarnos durante todo este proceso colmándonos de disciplina y paciencia para llevar a cabo la realización de este trabajo.

A nuestras familias, por creer en nosotros y apoyarnos en todo lo que nos hemos propuesto a lo largo de nuestra vida.

Al profesor Carlos Alberto Rojas Trejos por direccionar nuestro trabajo y brindarnos su conocimiento, comprensión y acompañamiento en el transcurso de este proceso.

A la Universidad del Valle, al coordinador del programa Julián González y a todos los profesores que contribuyeron a nuestra formación académica y profesional.

A la microempresa, por abrirnos sus puertas y suministrarnos la información necesaria y la completa disposición de su personal para la elaboración de este trabajo de grado.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Jurado 1

Jurado 2

Zarzal, Febrero de 2016

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
2. JUSTIFICACIÓN	17
3. OBJETIVOS.....	19
3.1 OBJETIVO GENERAL	19
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
4. MARCO REFERENCIAL	20
4.1 MARCO TÉORICO.....	20
4.1.1 LOGÍSTICA DE DISTRIBUCIÓN	20
4.1.3 CARACTERÍSTICAS DEL VRP	22
4.1.2 PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS	23
4.1.3.1 La red del transporte	24
4.1.3.2 Los clientes	24
4.1.3.3 Los depósitos	25
4.1.3.4 La flota de vehículos	25
4.1.3.5 Las rutas	26
4.1.4 VARIANTES DEL VRP	26
4.1.4.1 El problema del agente viajero (TSP).....	27
4.1.4.2 El problema de los m - agentes viajeros (m-TSP)	28
4.1.4.3 El problema con capacidades (CVRP).....	28
4.1.4.4 El problema con ventanas de tiempo (VRPTW)	28
4.1.4.5 El problema considerando inventarios (IRP)	29
4.1.5 MÉTODOS DE RESOLUCIÓN DEL VRP	29
4.1.5.1 Métodos Exactos	29
4.1.5.2 Métodos Heurísticos.....	32
4.1.5.3 Métodos Metaheurísticos	35
4.2 MARCO CONCEPTUAL	38
4.2.1 Logística	38
4.2.2 Planeación Logística.....	39
4.2.2.1 Niveles de planeación logística.....	40

4.2.3 Decisión de transporte	41
4.2.4 Planeación de rutas.....	41
4.2.5 Clasificación de problemas de ruteo de vehículos.	43
4.2.6 Métodos Heurísticos y Metaheurísticos	48
5. DIAGNÓSTICO DE LOS FACTORES CRÍTICOS	49
5.1 Número de Vehículos	51
5.2 Capacidad de Vehículos	52
5.3 Demanda	53
5.4 Nivel de Inventarios en puntos de venta.....	54
5.5 Depósitos	58
6. ANÁLISIS DE MODELOS QUE CONSIDERAN LOS FACTORES CRÍTICOS ANALIZADOS	60
7. DEFINICIÓN Y FORMULACIÓN DEL MODELO	69
7.1 Supuestos del modelo.....	69
7.2 Definición de conjuntos principales y subconjuntos.....	70
7.3 Definición de parámetros.....	70
7.4 Definición de variables de decisión.....	71
7.4 Modelo matemático considerando un solo vehículo	71
7.5 Modelo matemático considerando varios vehículos	73
8. CASO DE ESTUDIO	76
8.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	76
8.1.1 Caracterización del modelo de distribución actual en Zarzal Valle.....	76
8.1.2 Debilidades del sistema de distribución actual:	78
8.2. INFORMACIÓN RELEVANTE PARA LA VALIDACIÓN DEL MODELO	79
8.2.1. Ubicación geográfica del depósito y los clientes	79
8.2.2. Demanda en cada punto de venta	80
8.2.3. Capacidad máxima de inventario	80
8.2.4. Costo de mantener inventario para el proveedor y los clientes	81
8.2.5. Cantidad de vehículos disponibles y capacidad de los mismos	82
8.2.6. Costo de transporte entre nodos	82
8.3. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	83
9. CONCLUSIONES	89
REFERENCIAS.....	91

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1. Relación asintótica entre servicio al cliente y nivel de inventario.....	15
Ilustración 4.1. Componentes del costo logísticos.....	21
Ilustración 4.2. Objetivos de la Logística.	22
Ilustración 4.3. Esquema clásico de un VRP	23
Ilustración 4.4. Ejemplo de la solución a un problema básico VRP.....	26
Ilustración 4.5. Ciclo Hamiltoniano en un TSP de 8 ciudades.	27
Ilustración 4.6 . Taxonomía métodos de solución del VRP.....	29
Ilustración 4.7 Taxonomía métodos exactos de solución.	30
Ilustración 4.8. Taxonomía para métodos solución mediante búsqueda directa de árbol.....	30
Ilustración 4.9. Taxonomía para los métodos de solución de Programación lineal y entera..	31
Ilustración 4.10. Taxonomía métodos solución heurísticos clásicos más significativo.....	32
Ilustración 4.11. Representación de la heurística algoritmo ahorros de Clarke & Wright.	33
Ilustración 4.12. Taxonomía de los métodos de solución metaheurísticas.	36
Ilustración 4.13. Proceso Logístico.....	39
Ilustración 4.14. Triángulo de toma de decisiones logísticas.	39
Ilustración 5.1. Política de revisión periódica.....	56
Ilustración 5.2. Política de revisión continua.....	57
Ilustración 8.1. Mapeo de clientes.	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 6.1. Evaluación de modelos de referencia asociado con métodos de solución.....	67
Tabla 8.1. Portafolios de productos.	77
Tabla 8.2. Cantidad de producto demandado durante el horizonte de planificación, ejemplo con 5 clientes.....	80
Tabla 8.3. Capacidad máxima de inventario de cada cliente.....	80
Tabla 8.4. Componentes del costo de mantenimiento del inventario	81
Tabla 8.5. Costo de mantener inventario para cada cliente, ejemplo con 5 clientes.	81
Tabla 8.6. Costo de distribución por Km.....	83

LISTA DE ANEXOS DIGITALES

Anexo 1. Costo de distribución entre nodos.

Anexo 2. Archivo Modelo AMPL.

Anexo 3. Archivo de Datos para la solución del modelo.

Anexo 4. Archivo de comandos.

Anexo 5. Archivo de resultados.

INTRODUCCIÓN

En un mundo cada vez más industrializado, la importancia de la eficiencia de los sistemas de distribución se torna fundamental cuando se considera el impacto generado en los costos asociados a las operaciones de la empresa. Por lo tanto, el diseño de rutas eficientes para vehículos es de vital importancia en los sectores de transporte y logística, ya que permite a la compañía un control sobre una flota de vehículos para servir a sus clientes, enfrentarse así con el problema de diseño de rutas con relativa frecuencia. (Jaramillo, 2012, p.30).

El problema de ruteo de vehículos (Vehicle Routing Problem, VRP) es el nombre genérico dado a la clase de problemas en los que se debe determinar una serie de rutas para una flota de vehículos basados en uno o más depósitos, para un cierto número de ciudades o clientes geográficamente dispersos. (Luer, Benavente, Bustos & Venegas, 2009). En su forma más sencilla, el objetivo del VRP es satisfacer a una serie de clientes con demandas conocidas, en rutas vehiculares de mínimo costo, que se originan y terminan en un depósito. (Luer et al., 2009).

Según Toth & Vigo (2001), los estudios de este problema surgen a mediados del siglo pasado con la proposición del modelo matemático del agente viajero (Traveling Salesman Problem, TSP); donde gracias a esto han surgido muchos estudios sobre este tema en particular, ya que brinda ahorros significativos variando entre un 5% y un 20% de los costos totales de transporte.

Ballou (2004) afirma que la distribución cuando proporciona un adecuado nivel de servicio con el fin de satisfacer las necesidades del cliente puede llevar a un incremento en las ventas, un mayor porcentaje de participación en el mercado y contribuir en la disminución de costos y por ende un aumento en las utilidades.

Jaramillo (2012) refiere, que la utilización de este método puede tener formas alternativas de plantear el objetivo, pero el más común es la minimización de la distancia total recorrida, generando así una reducción en los costos y el tiempo de entrega, ya que se afirma que estos están relacionados entre sí y la mejora de uno conduce a la optimización del otro.

El problema de enrutamiento de inventario (IRP, Inventory Routing Problem) es la adopción por parte de varias empresas al llamado Vendor Managed Inventory (VMI) (Bertazzi & Speranza, 2012). Que trata de una familia de modelos de negocios en la cual el minorista de cierto producto suministra información sobre ventas e inventarios al proveedor. El proveedor por su parte suele asumir la responsabilidad sobre la administración de los inventarios y toma las decisiones sobre los tamaños de los pedidos y las fechas de despacho.

El problema IRP, se desarrolla en un campo donde los primeros aportes se remontan a los años ochenta y que ha estado en constante crecimiento a través del tiempo, constituyéndose en un ejemplo de la creación de valor para las organizaciones en términos logísticos, dado que contribuye a la generación de ahorro en el costo total de distribución mediante la adecuada

coordinación en las entregas a los diferentes clientes, y a su vez estos clientes no tienen que pagar un costo adicional por la aplicación de esta técnica, obteniendo así un beneficio mutuo para las partes involucradas, que se ve reflejado en un mejor control en los inventarios y en la determinación de criterios de decisión de envío para los proveedores y un ahorro en los costos por manejo de inventario para los minoristas.

El presente trabajo aborda el problema de ruteo de vehículos con consideraciones de inventario en puntos de venta desde un centro de distribución perteneciente a una empresa del Norte del Valle del Cauca, inicialmente se realizará un diagnóstico de los factores críticos relacionados con la problemática de la distribución de productos desde un centro de distribución hacia varios clientes considerando inventario en puntos de venta, restricciones de capacidad, número de vehículos y demanda de puntos de venta que se expone en la literatura; posteriormente se define y evalúa un modelo de ruteo de vehículos que permita encontrar una alternativa de minimización de costos totales de distribución teniendo en cuenta los factores críticos anteriormente analizados; finalmente se validará el modelo propuesto mediante la aplicación a un caso de estudio que considere los aspectos mencionados.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El objetivo de toda empresa es vender y generar dinero; por lo tanto, tener un buen producto es suficiente. Pero, para que las ventas de una empresa se generen, no basta con tener un buen producto a un buen precio y que sea conocido por los consumidores; sino que además es necesario que se encuentre en el lugar y momento adecuado para que ese producto sea accesible al consumidor (Cruz Roche, 1990).

En la industria y en el sector de servicios el costo de transporte representa una parte importante del valor final del producto o del servicio brindado. (Zabala, 2006, p.1). Según Toth (2000), una de las formas de ejemplificar esto, es revisando los datos que se presentan a nivel mundial en donde se documenta que cerca de un 10% de los costos de una empresa, corresponden a aspectos logísticos.

Hoy en día, a pesar de la globalización y la continua necesidad que tiene la empresa de ser más eficiente y competitiva, muchas de ellas aún utilizan métodos empíricos para definir sus rutas. Según Tomalá (2010) estas decisiones no siempre garantizan obtener una buena planificación, encareciendo los costos de operación y disminuyendo la calidad del servicio a los clientes.

Para Albán, Salas & Vargas (2009), algunas de las consecuencias que genera una planificación deficiente de las rutas de distribución son las siguientes:

- Retraso en la entrega de los productos.
- Faltantes ocasionados por la capacidad limitada del vehículo.
- Pérdida de calidad del producto terminado.
- Insatisfacción del cliente por la atención recibida.
- Pérdida de posibles clientes potenciales

Los Problemas de Ruteo de Vehículos es el nombre genérico dado a una gran familia de problemas relacionados con la distribución de mercancía, búsqueda de información o prestación de servicios, para un conjunto de clientes empleando una flota de vehículos determinada. (Zabala, 2006, p.1). El ejemplo más conocido de esta familia es el Problema del Agente Viajero (TSP). En este caso, se dispone de un solo vehículo que debe visitar a todos los clientes una única vez y retornar al origen, cuyo objetivo consiste en minimizar el tiempo total de viaje u otro criterio relacionado.

En la distribución, los vehículos realizan sus movimientos a través de una red de rutas, partiendo de puntos fijos, llamados depósitos, donde con frecuencia los conductores son los encargados de estipular la secuencia para visitar los clientes sin tener en cuenta en ocasiones aspectos importantes como: cantidad de clientes a visitar, distancia entre el centro de distribución y las tiendas, demanda del cliente, tiempo acordado de entrega, cantidad y capacidad de vehículos, costos de traslado, entre otros.

Según Zabala (2006), las principales características de estos problemas están dadas por las restricciones de operación que deben cumplir las rutas de los vehículos. Algunas de estas características son:

- Inventario en las tiendas.
- Demanda asociada a cada cliente.
- Periodo del día que dispone el cliente para ser visitado.
- Cantidad y capacidad de los vehículos disponibles.
- Cantidad de depósitos.
- Punto de partida y finalización de las rutas.
- Costo de traslado.

Cada combinación de estas características da como resultado un problema de ruteo de vehículos particular. Por ejemplo, la capacidad de un vehículo podría tener varias dimensiones como lo son el peso y el volumen; y algunas veces la capacidad del vehículo depende de la mercancía de que se considere. En general, cada vehículo tiene asociado un costo fijo en el que se incurre al utilizarlo y un costo variable proporcional a la distancia que recorra. Aquellos problemas cuyos atributos (capacidad, costo, entre otros) son los mismos para todos los vehículos se denominan de flota homogénea y si existen diferencias se denomina de flota heterogénea. (Olivera, 2004. p.7)

Luego, es pertinente mencionar que la entrega oportuna y completa de mercancías son costos logísticos que asumen las empresas.

El problema de enrutamiento de inventario (IRP) se ocupa de la distribución repetida de un producto único, de una sola planta, a un conjunto de clientes en un horizonte de planificación determinado. Los clientes consumen el producto a una tasa dada y poseen una capacidad de mantener un inventario local del producto hasta un nivel máximo.

El principal objetivo perseguido al mantener stock es garantizar que cuando un cliente requiere un determinado producto, lo encuentre. Los expertos de Symphony Iri Group (citado por la Periodista Sylvia Resa, 2012) estiman que el nivel de sustitución entre marcas puede alcanzar el 75% cuando el producto buscado en primera instancia no está disponible.

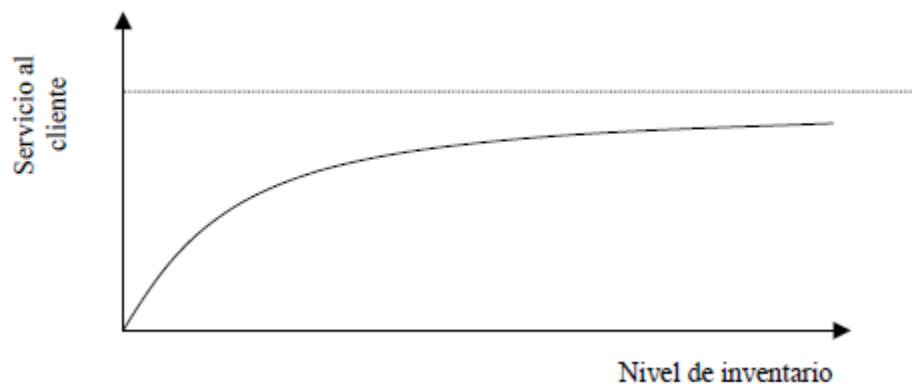
Un pedido que no se cursa debidamente, un palé con carga defectuosa y sin rápida reposición, la desaparición de parte de la mercancía o la falta de existencias en el almacén del minorista. Son sólo algunos factores que influyen en la rotura de stocks, es decir, la inexistencia de un determinado producto o referencia en el lineal que provoca la interrupción de la cadena de suministro, lo que a su vez se traduce en pérdidas (Resa, 2012, p.21). La pérdida es percibida por el consumidor, que es quien finalmente decide si cambia de producto, o si lo hace de establecimiento.

Henry Tucker (s.f) afirma que todos los esfuerzos en cuestión de marketing y en la cadena de suministro de repente se vuelven inútiles si al final el consumidor es incapaz de comprar un producto debido a que no estaba disponible.

Dicen los expertos de ECR Europe (citado por la Periodista Sylvia Resa, 2012) que el 31% de esos consumidores acude a otro establecimiento a comprar el producto que necesitaba, el 26% elige comprar otra marca distinta, el 19% adquiere la misma marca, pero en otro formato, el 15% pospone la compra del producto y el 9% no hace la compra.

Es esta visión de servicio al cliente la que tiene una relación asintótica con el nivel de inventario presente. Es decir, cuanto mejor nivel de servicio se quiera ofrecer al cliente mayor es el inventario adicional necesario.

Ilustración 1.1. Relación asintótica entre servicio al cliente y nivel de inventario.



Fuente: “Gestión de Inventarios de Demanda Independiente”. (2004): Diseños de Sistemas Productivos y Logísticos

Sin embargo la función de un buen gestor no es definir el punto ideal de una curva, sino cambiar los parámetros para obtener, en este caso, mayor servicio al cliente con menor inventario. Debido a que los stocks representan un inmovilizado de capital sin rentabilidad¹. Además los costes de mantenimiento, deterioro, de obsolescencia, etc. pueden suponer una parte importante del costo de almacenamiento.

Cada punto de venta posee una cantidad de inventario inicial, una flota de vehículos con capacidad generalmente homogénea, la cual está disponible para la distribución del producto.

El objetivo es reducir entonces al mínimo los costos de distribución durante el período de planificación sin causar desabastecimientos en cualquiera de los clientes.

Con base en lo anterior, se deriva la siguiente pregunta:

¿De qué forma se debe hacer la entrega de un único producto desde un centro de distribución hacia diferentes puntos de venta considerando limitaciones de capacidad de vehículos para una

¹“Gestión de Inventarios de Demanda Independiente”. (2004): Diseños de Sistemas Productivos y Logísticos.

flota homogénea, demanda e inventarios en puntos de venta de tal forma que contribuya a minimizar el costo total de distribución para una empresa del Norte del Valle del Cauca?

2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad todas las empresas independientemente del tamaño o características, deben gestionar y optimizar oportunamente su red de distribución logística del tal forma que se torne como un área facilitadora de información e integradora de procesos y recursos; con el fin de disponer oportunamente del producto que requiere el mercado, en el tiempo indicado, en el lugar correcto y a un costo razonable. “La importancia de la eficacia y la eficiencia de los sistemas de distribución se torna evidente cuando se considera el impacto de los costos asociados a las operaciones de las empresas” (Maquera, Abensur & Parracho, 2007, p.2).

La distribución desde un depósito central a clientes finales es una actividad comúnmente realizada por compañías que tienen como función la manufactura y/o distribución de bienes o servicios. Para Olivera (2004) un plan básico de distribución debe especificar las cantidades y la secuencia de las entregas a realizar, teniendo en cuenta los requerimientos específicos de cada uno de los clientes. Sin embargo, es necesario tener una adecuada planificación de los recursos de transporte ya que estos pueden llegar a representar hasta el 20% del costo final de los productos y por lo tanto generar beneficios económicos a la compañía. Según Toth (2001) la correcta planificación de la entrega de los productos puede llegar a disminuir entre el 5% y el 20% de los costos de transporte.

Con base en lo anterior, es preciso reconocer que el elemento individual más importante en los costos de logística es el transporte de carga (Boubeta, 2007) y que según Correa (2008) puede llegar a representar hasta el 50% del costo logístico total ya que además comprende el costo del combustible y el costo del transporte. Para Hasle (2003), es esencial la disminución de los costos de los procesos logísticos relacionados con el transporte aplicando estrategias y administrando de manera eficiente los recursos asociados a este servicio y tomar decisiones relacionadas con el transporte y flota de vehículos (Acosta, Olivares & Navarro, 2012, p.1) ante lo cual el problema de ruteo de vehículos (VRP, Vehicle Routing Problem) surge como una necesidad actual.

El VRP es uno de los problemas de optimización combinatoria más estudiados en las últimas décadas. Gracias a éste es posible determinar el conjunto de rutas más eficiente para una flota de vehículos que parte de uno o más depósitos para satisfacer la demanda de clientes dispersos geográficamente. El enfoque tradicionalmente utilizado ha sido la optimización de un solo objetivo; sin embargo, en la realidad organizacional optimizar más de un objetivo permite la toma de decisiones con una visión de negocio más integral. (Sarmiento, 2014).

En los últimos años el tema del estudio de problemas de ruteo de vehículos ha tomado gran importancia para las empresas ya que el costo del transporte, tanto en la industria como en el sector de servicios, representa una porción importante en el valor final del producto o del servicio ofrecido, según Toth., & Vigo (2002) dicho costo representa entre el 10% y el 20%

del costo final de los bienes, por tal razón lograr una adecuada distribución de los productos a los usuarios finales juega un papel importante en la gestión de sistemas y su adecuada planificación puede significar considerables ahorros para las empresas.

Por otro lado, las empresas en la actualidad tienen que estar al tanto de los cambios constantes en el Mercado global debido a los avances tecnológicos, pero también a las exigencias de los consumidores como son la calidad, precios razonables, mejores servicios y atención personalizada. Por esta razón, constantemente las empresas buscan estrategias y métodos más efectivos para producir los mejores productos o para ofrecer los mejores servicios (Cruz, 2010).

Dentro de estas estrategias se encuentra el mantener un inventario adecuado para poder cumplir con la demanda de los clientes.

Con el objetivo de satisfacer las necesidades de los clientes, debe encontrarse el equilibrio ideal, brindándoles el mayor nivel de servicio con el menor nivel de inventario posible. Si un bien no está disponible en el momento en que el cliente lo solicita, se perderá la venta y en algunas circunstancias, posiblemente, ventas potenciales. Por el contrario, si se tienen altas cantidades de dicho producto, se tendrán altos costos asociados al mantenimiento de dichas mercancías. Para Mora (2010) el objetivo final de una buena administración del inventario, es mantener la cantidad suficiente de mercancía para que no se presenten faltantes (*stockouts*) y excesos de existencias (*overstock*).

En este orden de ideas el problema de enrutamiento de inventario (IRP, Inventory Routing Problem) modela una situación que se presenta comúnmente en las empresas e involucra en un solo modelo a las dos actividades más representativas en términos de costo en la cadena de suministro: el manejo de inventarios y la distribución de productos. El IRP pretende satisfacer las demandas de un conjunto de clientes distribuidos geográficamente, utilizando una flota de vehículos de capacidad limitada que se encuentran en un almacén central, al menor costo posible. “El IRP es un problema NP-completo, ya que incluye restricciones de inventario que en aplicaciones reales suele ser de gran tamaño” (Aceves & Elizondo, 2008, p.77).

En este trabajo se pretende realizar un modelo IRP que integre aspectos tales como los tamaños de pedido, inventario y demanda de un único producto, el tamaño de la flota y la ruta de los vehículos, con el fin de minimizar los costos logísticos de transporte e inventario.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Formular un modelo de ruteo de vehículos que considere inventario en puntos de venta de un único producto desde un centro de distribución perteneciente a una empresa del Valle del Cauca, con el fin de minimizar los costos totales logísticos asociados a la distribución.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un diagnóstico de los factores críticos relacionados con la problemática de la distribución de producto desde un centro de distribución hacia varios clientes considerando inventario en puntos de venta, restricciones de capacidad, número de vehículos y demanda de puntos de venta que se expone en la literatura.
- Evaluar en la literatura los diferentes modelos de ruteo de vehículos que considere los factores críticos anteriormente analizados.
- Definir un modelo de ruteo de vehículos que permita encontrar una alternativa de minimización de costos totales de distribución, teniendo en cuenta los factores críticos analizados.
- Validar el modelo propuesto mediante un caso de estudio.

4. MARCO REFERENCIAL

En éste capítulo se mostrarán los principales elementos del Marco Teórico y del Marco Conceptual que son relevantes para el desarrollo del presente proyecto.

4.1 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan las teorías y herramientas que sirven como punto de partida y fundamento para el desarrollo del proyecto.

4.1.1 LOGÍSTICA DE DISTRIBUCIÓN

La logística hace referencia a todas aquellas actividades que ayudarán a la empresa a administrar de manera eficiente sus materias primas, así como sus productos terminados, para la producción y distribución de sus productos mediante una programación y rutas idóneas, en el menor tiempo posible.²

La logística determina y coordina de forma óptima el producto correcto, el cliente correcto, el lugar y el tiempo correcto. Luego si se asume que el rol del mercado es estimular la demanda, el rol de la logística es satisfacerla. Solamente a través de un detallado análisis de la demanda en términos de nivel, localidad y tiempo, es posible determinar el punto de partida para el logro del resultado final de la actividad logística; atender dicha demanda en términos de costos y efectividad.

El objetivo fundamental de la logística es colocar los productos adecuados (bienes y servicios) en el lugar correcto, en el momento preciso y en las condiciones deseadas, con el fin de contribuir, lo máximo posible, con la rentabilidad de una empresa.³ Para ello según Velázquez (2012) se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Almacenamiento.** Las empresas deben almacenar sus productos mientras son vendidos, pues los ciclos de producción y consumo casi nunca coinciden. La función del almacenamiento es garantizar que los productos estén disponibles cuando los clientes los necesiten, o bien que la materia prima esté disponible para producir los productos.

² Velázquez, E. (2012). Canales de distribución y logística. Estado de México: Red Tercer Milenio S.C. pp. 12.

³Recuperado de [http://www.ingenieria.cl/tesis/ing_\(e\)_indus/7\(2007\)/1.pdf](http://www.ingenieria.cl/tesis/ing_(e)_indus/7(2007)/1.pdf)

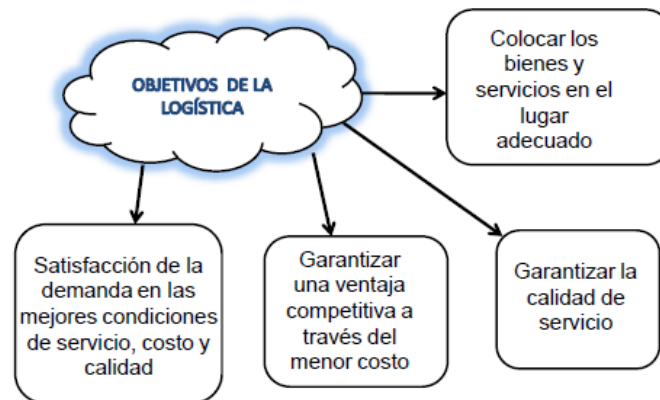
Ilustración 4.1. Componentes del costo logísticos.



Fuente. Recuperado de Jiménez (2002). *Marco conceptual de la cadena de suministro: Un nuevo enfoque logístico.*

- **Procesamiento de pedidos.** Hoy en día, esto se efectúan mediante los vendedores, por correo, por teléfono y por internet. La empresa, por conducto de la logística, buscará diseñar un proceso sencillo, claro, rápido de captura y un sistema de pedidos eficiente que permita satisfacer la demanda de los consumidores de modo ágil y eficaz.
- **Control de inventarios.** Cabe señalar que éste aspecto puede afectar la relación y satisfacción de los clientes, si se tiene un inventario excesivo o extenso, se podrían elevar los costos por manejo de existencias y, además, se pueden tener productos obsoletos; por otro lado, un inventario insuficiente puede generar existencias agotadas de las mercancías, lo que llevará a la empresa a una producción de emergencia, con lo cual se elevarían los costos de producción.
- **Control de inventarios.** Cabe señalar que éste aspecto puede afectar la relación y satisfacción de los clientes, si se tiene un inventario excesivo o extenso, se podrían elevar los costos por manejo de existencias y, además, se pueden tener productos obsoletos; por otro lado, un inventario insuficiente puede generar existencias agotadas de las mercancías, lo que llevará a la empresa a una producción de emergencia, con lo cual se elevarían los costos de producción.
- **Transporte.** La correcta selección del transporte ayudará a la empresa a entregar en tiempo y forma las mercancías.

Ilustración 4.2. Objetivos de la Logística.



Fuente. Adaptado de Velázquez, E. (2012). Canales de distribución y logística.

El problema de distribuir productos desde ciertos depósitos a sus usuarios finales juega un papel central en la gestión de algunos sistemas logísticos y por lo tanto, su adecuada planificación puede significar considerables ahorros. Afirma Frazelle (2001) que las decisiones tomadas en la definición de las rutas pueden implicar un gran ahorro o desperdicio de recursos en la labor del transporte, por lo cual, este proceso tiene una gran relevancia en la cadena de abastecimiento. Ballou (2004) afirma “dado que los costos de transportación normalmente se hallan entre un tercio y dos tercios de los costos logísticos totales, mejorar la eficiencia mediante la máxima utilización del equipo de transportación y de su personal es una preocupación importante. Otros autores como Toth & Vigo (2000) justifican en gran medida la utilización de técnicas de Investigación Operativa como facilitadoras de la planificación, dado que se estima que los costos del transporte representan entre el 10% y el 20% del costo final de los bienes.

En ese sentido, en las últimas décadas se han visto un enorme esfuerzo por resolver este tipo de problemas. El problema de ruteo de vehículos fue introducido en 1959 por Dantzig y Ramser, quienes realizaron por primera vez una formulación del problema para una aplicación de distribución de combustible. Cinco años más tarde, Clarke y Wright propusieron el primer algoritmo que resultó efectivo para su resolución, el popular Algoritmo de Ahorros.

A partir de estos trabajos, el área de Ruteo de Vehículos ha crecido de manera explosiva. Por un lado, hacia modelos que incorporen cada vez más características de la realidad, y, por otro lado, en la búsqueda de algoritmos que permitan resolver los problemas de manera eficiente. (Olivera, 2014).

4.1.3 CARACTERÍSTICAS DEL VRP

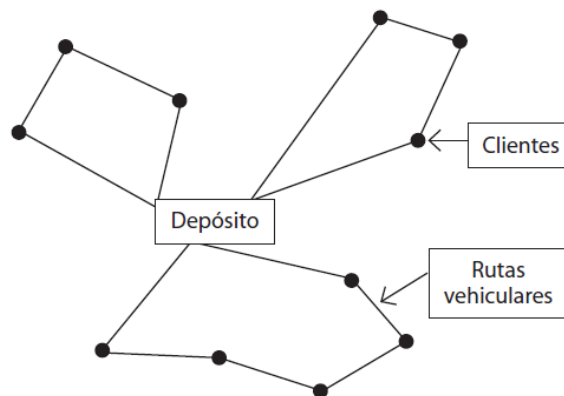
En la literatura, algunos autores han intentado clasificar y simplificar la gran variedad de posibles problemas, como por ejemplo los criterios propuestos por (Bodin y Golden, 1981) y

(Desrochers, M., Lenstra, J., Savelsbergh, M. 1990) que intentan reflejar y ordenar las principales características en aspectos como: el depósito, la flota, la demanda, el servicio y el objetivo a alcanzar. Esta clasificación de los problemas, ha facilitado tanto el desarrollo de modelos matemáticos y estrategias de resolución, como la toma de decisiones por parte de las empresas.

4.1.2 PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

En la literatura científica el problema del diseño de rutas de vehículos se encuentra bajo el nombre genérico de *vehicle routing problem* (VRP)⁴. Siendo el VRP una gran familia de problemas que busca determinar un conjunto de rutas para una flota de vehículos que parten de uno o más depósitos para satisfacer la demanda asociada a varios clientes dispersos geográficamente. (Hillier & Lieberman, 2006). Siendo el objetivo general el de minimizar el costo total asociado a las rutas.

Ilustración 4.3. Esquema clásico de un VRP



Fuente. Adaptado de Benavente, M., & Bustos, J. (2005)

Un problema clásico de ruteo se encuentra cuando varios camiones salen de un centro de distribución y debe visitar a varios clientes, hacer diversas entregas y retornar al centro de distribución.

Desde el punto de vista de Moreno, K., Para, C., & Ulabarry, L. (2012), se pueden presentar muchos casos de problemas clásicos, de los cuales se describen algunos a continuación:

- Múltiples vehículos con diferentes eficiencias, capacidades volumétricas y gravimétricas pueden ser utilizados.

⁴C. Haksever, B. Render, R. Russell, and R. Murdick, "Routing Problems and Scheduling," in *Service Management and Operations*, 2nd ed., Prentice Hall, 2000, pp. 476–497.

- Pueden existir paradas cuya demanda individual sea superior a la capacidad del camión más grande. En estos casos, la parada debería ser visitada por más de un camión o por el mismo camión más de una vez con rutas de recargue en el CD.
- Pueden existir ventanas de tiempo (time windows). Una ventana de tiempo exigida por un cliente o punto de entrega es un intervalo determinado dentro del cual los vehículos deben arribar al lugar de destino.
- En algunos casos, la recolección solo puede hacerse después de haberse realizados los despachos (relaciones de precedencia).
- Las rutas en días sucesivos pueden ser significativamente diferentes, lo que convierte a este problema en uno operativo de muy corto plazo.
- El máximo tiempo de viaje continuo generalmente puede estar regulado. Los conductores tienen períodos de descanso y alimentación.

4.1.3.1 La red del transporte

La red de carreteras o servicio utilizada para el transporte de bienes, se describe generalmente como un grafo donde los arcos representan los segmentos o secciones de las vías, y los vértices corresponden a las uniones o nodos de la red. En algunos casos los clientes o los depósitos pueden estar situados en dichos nodos, mientras que en otros casos pueden estar localizados en un arco del grafo. Los arcos (y por consiguiente el grafo) puede ser dirigidos o no dirigidos, dependiendo de si pueden ser circulados en un único sentido o en ambos (por ejemplo, calles de una única dirección o de ambos sentidos de circulación). Cada arco tendrá asociado un coste que puede representar su longitud en distancia, el tiempo de viaje, o el coste monetario del mismo. Alguno de estos parámetros pueden a su vez depender del tipo de vehículo o del momento en el que se recorra este arco (por ejemplo, las condiciones del tráfico en un momento dado). (Rodríguez, 2007).

4.1.3.2 Los clientes

Cada cliente tiene cierta demanda que deberá ser satisfecha por algún vehículo. En muchos casos, la demanda es un bien que ocupa lugar en los vehículos y es usual que un mismo vehículo no pueda satisfacer la demanda de todos los clientes en una misma ruta. Un caso equivalente al anterior ocurre cuando los clientes son proveedores y lo que se desea es recoger la mercadería y transportarla hacia el depósito. También podría ocurrir que la mercadería deba ser transportada a los clientes pero no esté inicialmente en el depósito, sino distribuida en ciertos sitios proveedores. En este caso, los proveedores deben ser visitados antes que los clientes. En otros casos la demanda no es un bien sino un servicio: el cliente simplemente debe ser visitado por el vehículo. Un mismo vehículo podría, potencialmente, visitar a todos los clientes.

Es usual que cada cliente deba ser visitado exactamente una vez. Sin embargo, en ciertos casos se acepta que la demanda de un cliente sea satisfecha en momentos diferentes y por vehículos diferentes. Los clientes podrían tener restricciones relativas su horario de servicio. Usualmente estas restricciones se expresan en forma de intervalos de tiempo (llamados ventanas de tiempo) en los que se puede arribar al cliente.

En problemas con varios vehículos diferentes podrían existir restricciones de compatibilidad entre éstos y los clientes. Debido a que algunos vehículos muy pesados no pueden ingresar en ciertas localidades por lo que cada cliente sólo puede ser visitado por algunos de los vehículos. (Rodríguez, 2007).

4.1.3.3 Los depósitos

Tanto los vehículos como las mercaderías a distribuir (si las hubiera) suelen estar ubicadas en depósitos o almacenes. Usualmente se exige que cada ruta comience y finalice en un mismo depósito, aunque este podría no ser el caso en algunas aplicaciones (por ejemplo, podría ser que el viaje debiera finalizar donde finaliza la jornada del conductor o en su domicilio).

En los problemas con múltiples depósitos cada uno de estos tiene diferentes características, por ejemplo, su ubicación y capacidad máxima de producción. Podría ocurrir que cada depósito tenga una flota de vehículos asignada o que dicha asignación sea parte de lo que se desea determinar.

Los depósitos, al igual que los clientes, podrían tener ventanas de tiempo asociadas. En algunos casos debe considerarse el tiempo necesario para cargar o preparar un vehículo antes de que comience su ruta, o el tiempo invertido en su limpieza al regresar. Incluso, por limitaciones de los propios depósitos, podría darse el caso de limitar el número de vehículos que operan a la vez en un mismo depósito (congestión de muelles). (Rodríguez, 2007).

4.1.3.4 La flota de vehículos

Los vehículos se definen por un conjunto de atributos, como su capacidad de carga en peso, en volumen, sus costes asociados, etc. En un vehículo se pueden transportar diferentes tipos de productos o uno sólo, así mismo su contenedor podría estar compartimentado o no. En la utilización de un vehículo se incurre en unos costes fijos por uso, y variables en función del tiempo, distancia u otros parámetros.

Cuando características como capacidad, costos, etc. son los mismos para todos los vehículos se dice que la flota es homogénea, y si son diferentes se denomina flota heterogénea. El número de vehículos disponibles de una flota puede ser un dato conocido o una variable de decisión. Es común que el objetivo sea intentar utilizar la menor cantidad de vehículos y en segundo lugar minimizar la distancia o tiempo empleado de su ruta.

La legislación o los convenios laborales pueden imponer restricciones sobre el tiempo máximo que un vehículo debe estar en circulación (descanso o relevo de conductores), su velocidad y carga máxima, e incluso el paso por determinadas zonas de la red. Es interesante en ocasiones intentar equilibrar las cargas de trabajo de los conductores, el tiempo o carga de los vehículos. (Rodríguez, 2007).

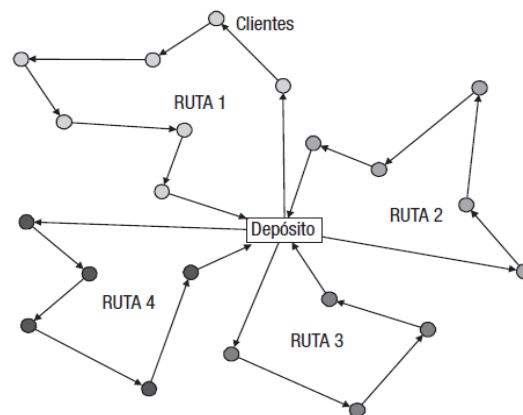
4.1.3.5 Las rutas

Los problemas de rutas de vehículos tratan por tanto de determinar la ruta o rutas para cada uno de los vehículos de la flota cumpliendo con todo el conjunto de restricciones e intentando alcanzar los objetivos propuestos.

La función objetivo puede ser por ejemplo: minimizar los costes fijos, minimizar los costes totales, minimizar el número de vehículos requeridos, minimizar el tiempo total de transporte y/o la distancia total recorrida, minimizar las esperas, maximizar el beneficio de la operación, maximizar la función de utilidad del cliente, o su beneficio y satisfacción.

En general en la literatura se asume que un vehículo sólo recorrerá una ruta en el período de planificación, pero también se pueden encontrar modelos de más de una ruta. La Ilustración 4.4 representa un ejemplo típico de solución a un problema de rutas. En la figura se puede observar 4 rutas diferentes con origen y destino final en el depósito central. Los arcos de la ruta solución deben ser necesariamente arcos de la red de transporte. (Rodríguez, 2007).

Ilustración 4.4. Ejemplo de la solución a un problema básico VRP.



Fuente. Recuperado de Rodríguez (2007).

4.1.4 VARIANTES DEL VRP

Las características de los clientes, depósitos y vehículos, así como diferentes restricciones operativas sobre las rutas, horarios, etc. dan lugar a diferentes variantes del problema. Mencionándose a continuación algunas.

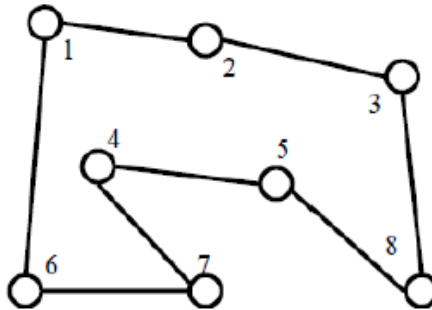
4.1.4.1 El problema del agente viajero (TSP)

Uno de los problemas clásicos de Investigación de Operaciones es el del Agente Viajero o por sus siglas en inglés TSP (*Travelling Salesman Problem*). En este, se dispone de un solo vehículo que debe visitar a todos los clientes en una sola ruta y a costo mínimo. No suele haber un depósito (y si lo hubiera no se distingue de los clientes), no hay demanda asociada a los clientes y tampoco hay restricciones temporales.

La mayor parte de los problemas de ruteo de vehículos son generalizaciones del TSP. En ese sentido, este puede considerarse el problema de ruteo de vehículos más simple. No obstante, pertenece a la clase de problemas NP-Hard y es uno de los problemas de optimización combinatoria más clásico y difundido. (Benavidez, 2012).

Sandoya (2007), afirma que el objetivo del TSP, desde la concepción de la teoría de grafos, es equivalente a encontrar el ciclo Hamiltoniano de costo mínimo. Siendo este último un ciclo simple que pasa por todos los vértices del grafo, es decir, no utiliza el mismo vértice más de una vez.

Ilustración 4.5. Ciclo Hamiltoniano en un TSP de 8 ciudades.



Fuente. Ríos, R., & González, J. (2000).

Galvis., James, G., & Quiroga, N (2011) refiere que se deben tener en cuenta ciertas definiciones relacionadas con la teoría de grafos como son:

- Grafo completo: Es aquel en el que existe siempre algún camino que conecta todo par de vértices.
- Grafo dirigido y no dirigido: Los arcos, y los grafos correspondientes pueden ser dirigidos o no dirigidos, dependiendo de si la arista ij se puede recorrer en una dirección o en ambas direcciones respectivamente.

Asimismo, se puede definir *camino* como una sucesión de aristas ($a_1; a_2; \dots; a_k$) en donde el vértice final de cada arista coincide con el inicial de la siguiente. Ahora bien, un camino es simple o elemental si no utiliza el mismo vértice más de una vez. (Martí, s.f).

El TSP en si es fácil de formular. Sin embargo, es difícil de resolver, ya que se considera un problema NP-Hard debido a que el tiempo de computo empleado para encontrar una solución óptima crece exponencialmente con respecto al tamaño de los datos del problema. Por lo tanto, surge la necesidad de emplear métodos aproximados (heurística) que, aunque no garantiza una solución óptima al problema, ofrecen soluciones factibles a esté. (Ríos, R., & González, J. 2000).

4.1.4.2 El problema de los m - agentes viajeros (m-TSP)

El Problema de los m Agentes Viajeros o m -TSP (Multiple Travelling Salesman Problem) es una generalización del TSP en la cual se tiene un depósito y m vehículos. El objetivo es construir exactamente m rutas, una para cada vehículo, de modo que cada cliente sea visitado una vez por uno de los vehículos. Cada ruta debe comenzar y finalizar en el depósito y puede contener a lo sumo p clientes. (Benavides, 2012).

4.1.4.3 El problema con capacidades (CVRP)

El CVRP es una extensión del m -TSP en la cual cada cliente tiene asociada una demanda y cada vehículo tiene una capacidad.⁵ Éste es un problema de optimización combinatoria de tipo NP-Hard, el cual consiste en hallar una serie de rutas de tal manera que se satisfaga la demanda de una cantidad determinada de clientes distribuidos en una zona geográfica.

Este problema se puede plantear por medio de los modelos de programación lineal entera binaria para minimizar el costo, el tiempo o la distancia recorrida en la ruta considerando la capacidad de los vehículos disponibles. Cada vehículo parte de un depósito para visitar a los clientes y debe regresar nuevamente a él. Se considera una flota homogénea de vehículos, es decir, todos los vehículos tienen la misma capacidad. (Galvis et al, 2011).

4.1.4.4 El problema con ventanas de tiempo (VRPTW)

En esta variante del VRP, se tiene en cuenta, además de las restricciones de capacidad de los vehículos, una restricción que involucra una ventana de tiempo para cada cliente. Esto indica el intervalo de tiempo en que el cliente está dispuesto a recibir la visita del vehículo. Adicionalmente, se permite un tiempo de servicio o demora.

En caso de que el vehículo llegue antes del inicio de la ventana de tiempo del cliente, éste deberá esperar para realizar su servicio. Asimismo, las ventanas de tiempo implican que se debe cumplir que $t_i \leq l_i$, siendo t_i el tiempo de llegada al cliente i y l_i el tiempo máximo en que

⁵Olivera, A. (2004). *Heurística para problemas de ruteo de vehículos*. Reporte de Investigación, Instituto de Computación – Facultad de Ingeniería, UDELAR, Montevideo. Uruguay, pp. 8-9.

el cliente está dispuesto a ser servido, ya que ningún cliente podrá ser servido luego del fin de su ventana de tiempo. (Galvis et al, 2011).

4.1.4.5 El problema considerando inventarios (IRP)

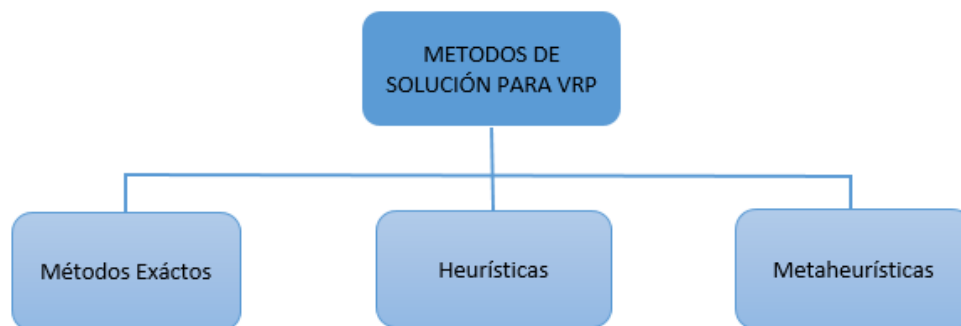
El Problema de Ruteo de Vehículos con Inventarios (IRP por sus siglas en inglés), nace en torno del ámbito logístico a raíz de la implantación, en medianas y grandes empresas, de los esquemas de Inventario Manejado por el Proveedor (VMI por sus siglas en inglés). Esta filosofía de trabajo consiste en que el proveedor deberá monitorear constantemente los niveles de inventario de sus clientes, determinar cuándo reabastecerlos y en qué cantidad, así como elaborar la hoja de ruta que deberán recorrer sus camiones al momento de realizarse la distribución.

Este esquema logístico plantea la necesidad al proveedor, de integrar en un sólo modelo las decisiones asociadas con el ruteo de los vehículos, la cantidad de producto a enviar a cada cliente cada día y el nivel de inventario que se deberá mantener en las bodegas de los mismos, de tal forma que se minimicen todos los costos operativos asociados (Saltos & Aceves, 2012).

4.1.5 MÉTODOS DE RESOLUCIÓN DEL VRP

En lo que respecta a los métodos de solución, de la revisión bibliográfica se puede decir que se han abordado tres grandes categorías, las cuales pueden ser agrupadas de la siguiente manera: métodos exactos, heurísticas y metaheurísticas.

Ilustración 4.6 . Taxonomía métodos de solución del VRP



Fuente. Adaptado de Rocha, L., Gonzalez, E., & Orjuela, J. (2011).

4.1.5.1 Métodos Exactos

Azi, N., Gendreau, M., & Potvin, J. (2010) afirma que dada la complejidad de los problemas, los métodos exactos son eficientes en problemas hasta 50 depósitos debido a restricciones de tiempo computacional. Los métodos exactos se pueden clasificar en tres grupos: búsqueda

directa de árbol, programación dinámica, programación lineal y entera. En la Ilustración 4.7 se muestra esta clasificación.

Ilustración 4.7 Taxonomía métodos exactos de solución.

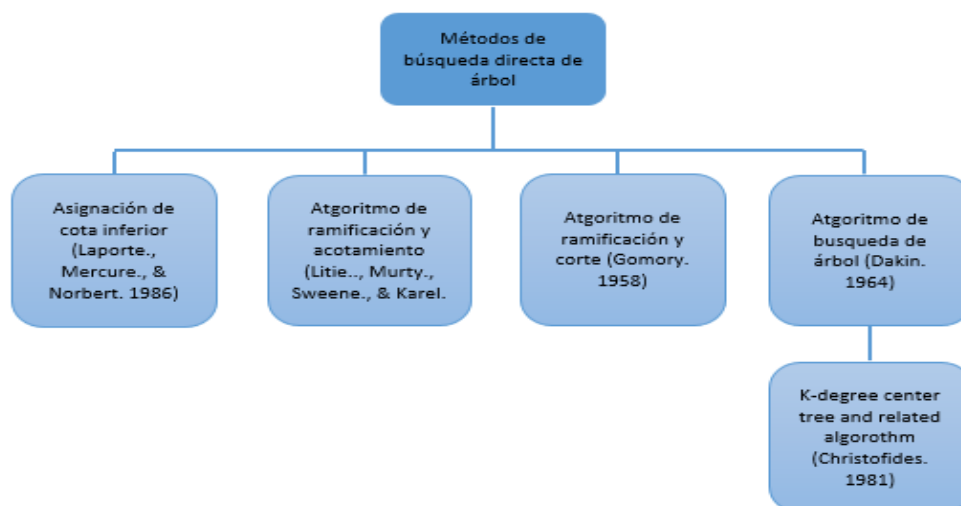


Fuente. Adaptado de Rocha et al. (2011).

➤ **Métodos de búsqueda directa de árbol:**

La búsqueda se realiza sobre todos los nodos de un árbol de acuerdo a criterios específicos propios de cada método. La Ilustración 4.8 muestra la clasificación establecida a partir de Laporte (1991).

Ilustración 4.8. Taxonomía para los métodos de solución mediante búsqueda directa de árbol.



Fuente. Adaptado de Laporte (1991).

El primer algoritmo asigna una cota inferior que permite disminuir el número de vehículos requeridos para visitar todos los vértices. Esto se realiza por medio del m-TSP, como relajación del VRP, proporcionando una cota superior para el número de vehículos y transformándolo en un TSP. (Laporte, 1991).

Por su parte, el algoritmo de ramificación y acotamiento consiste en recorrer cada nodo del árbol desde el nivel superior hacia la base del árbol y los nodos terminales resolviendo en cada nodo un programa lineal y determina que nodos pueden eliminarse. Un nodo se elimina (junto con sus descendientes) si no existe una solución factible; pero si existe solución factible se convierte en una cota inferior. El algoritmo termina cuando todos los nodos han sido revisados y la solución óptima es la de mayor cota inferior. (Yepes, 2002).

El árbol del centro de k-grados (*k-degree center treealgorithm*) trabaja con un número fijo de vehículos, una solución factible en el conjunto de aristas se divide en cuatro subconjuntos que son: las aristas que no pertenecen a la solución, las aristas que forman el árbol, las aristas que inciden en el primer vértice y las aristas que no inciden en el primer vértice. Estos subconjuntos se traducen en restricciones en el modelo y la solución objetivo consiste en sumar el costo de todas las aristas en la solución.

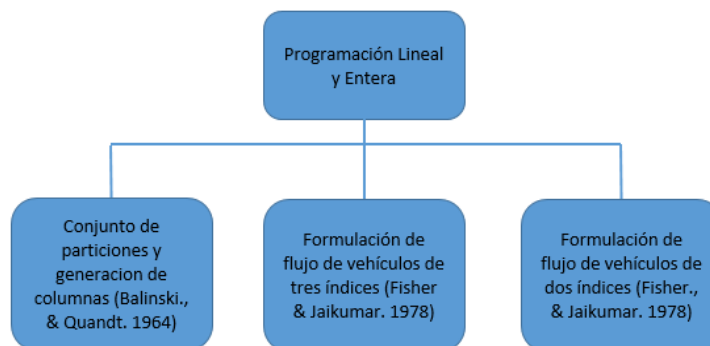
➤ Programación dinámica

Propuesto por Eilon, Watson-Gandy y Christofides en 1971. En el método se considera un número fijo de m vehículos. Encuentra primero el costo mínimo alcanzable utilizando k vehículos, teniendo en cuenta la función del costo en la longitud de una ruta de vehículos a través de todos los vértices del subconjunto, luego encuentra el costo de todos los subconjuntos de vértices con m vehículos. (Laporte, 1991).

➤ Programación lineal y entera

En la Ilustración 4.9 se muestran las tres técnicas comprendidas dentro de esta clasificación según Laporte (1991).

Ilustración 4.9. Taxonomía para los métodos de solución de Programación lineal y entera.



Fuente. Adaptado de Laporte, (1991).

Por su parte el método de flujo de vehículos de 2 índices y 3 índices fue desarrollado para el CVRPTW (Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows). En la formulación de 2 índices X_{ij} representa el camino que une el depósito i con el depósito j . En la formulación de 3 índices la variable X_{ijk} indica el camino que une el depósito i con el depósito j , utilizando el vehículo k . El algoritmo desarrollado está basado en una formulación que garantiza la solución óptima en un número finito de pasos, si se ejecuta hasta finalizarlo. La formulación no exige que los vehículos sean idénticos.

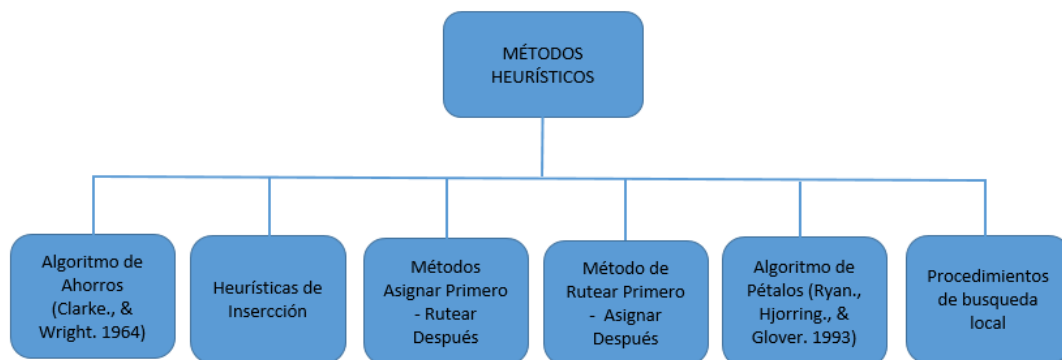
Debido a que generalmente los métodos exactos se aplican solo a problemas con una pequeña cantidad de nodos, son desarrollados en su mayoría para fines académicos, ya que en los problemas reales de VRP se tiene una estructura nodal muy amplia y por lo tanto no son recomendables porque requerirían mucho tiempo de computación. (Vásquez, 2012).

4.1.5.2 Métodos Heurísticos

Las heurísticas son procedimientos que proporcionan soluciones de aceptable calidad mediante una exploración limitada del espacio de búsqueda. Olivera (2004). Clarke y Wright, propusieron el primer algoritmo que resultó efectivo para resolver el VRP en 1964. La mayoría de las heurísticas clásicas para resolver el VRP fueron desarrolladas entre 1960 y 1990. Estos métodos parten de rutas que contienen un único nodo para encontrar el mejor par (nodo, ruta) que representa la mejor intersección.

A continuación se presentan algunas de las heurísticas clásicas más significativas para el VRP con capacidades y, en algunos casos, la restricción sobre el largo máximo de cada ruta. Estas heurísticas son procedimientos simples que realizan una exploración limitada del espacio de búsqueda y dan soluciones de calidad aceptable en tiempos de cálculo generalmente moderados. Las soluciones obtenidas con esta clase de procedimientos pueden, en general, ser mejoradas utilizando métodos de búsqueda más sofisticados, pero incurriendo en elevados tiempos de ejecución. (Benavides, 2012).

Ilustración 4.10. Taxonomía de los métodos de solución heurísticos clásicos más significativos.



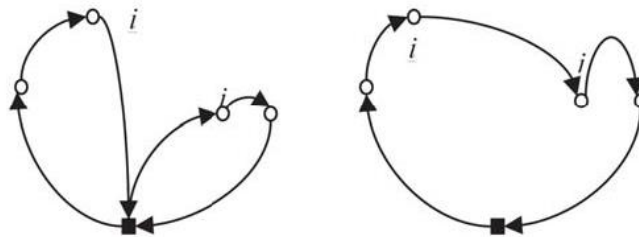
Fuente. Adaptado y editado de Rocha et al. (2011).

➤ El algoritmo de Ahorros

El algoritmo de los ahorros de Clarke y Wright se aplica generalmente a problemas para los cuales el número de vehículos es una variable de decisión, calcula el mayor ahorro en distancia, al utilizar los arcos. Si en una solución se encuentran dos rutas diferentes y estas dos rutas pueden ser combinadas para obtener una nueva en la cual se encuentre mayor ahorro en sus arcos entonces se utilizará esta nueva ruta. En la Figura 12 se muestra la representación en forma de grafo para esta heurística.

El algoritmo original de Clarke y Wright produce buenas rutas al inicio pero no hacia el final, pues incluye algunas rutas circulares. El algoritmo de Clarke y Wright mejorado propuesto por Laporte, Toth y Vigo generaliza los ahorros mediante un parámetro llamado Shape Parameter o Parámetro de Forma que penaliza la unión de rutas con clientes lejanos. (Olivera, 2004).

Ilustración 4.11. Representación de la heurística del algoritmo de los ahorros de Clarke & Wright.



Fuente. Recuperado de Rocha et al. (2011).

➤ Heurística de Inserción

Las heurísticas de inserción son métodos constructivos en los cuales se crea una solución mediante sucesivas inserciones de clientes en las rutas. En cada iteración se tiene una solución parcial cuyas rutas sólo visitan un subconjunto de los clientes y se selecciona un cliente no visitado para insertar en dicha solución.

En las heurísticas de inserción secuencial sólo se considera insertar clientes en la última ruta creada. La principal desventaja de este enfoque es que los últimos clientes no visitados tienden a estar dispersos y por lo tanto las últimas rutas construidas son de costo muy elevado (Bodin, L., Golden, B., Assad, A., & Ball, M, 1983). Las heurísticas de inserción en paralelo surgen para remediar esta eficiencia, permitiendo insertar un cliente en cualquiera de las rutas de la solución. Cualquier heurística de inserción para el TSP puede ser utilizada para el VRP siempre que se verifique la factibilidad antes de realizar las

inserciones refieren Christofides, N., Mingozzi, A., & Toth, P., (1979). A continuación se mencionan aquellas diseñadas explícitamente para el VRP.

- Inserción Secuencial de Mole & Jameson
- Inserción en Paralelo de Christofides, Mingozzi y Toth

➤ **Métodos Asignar Primero – Rutear Después**

Los métodos asignar primero y rutear después (*cluster first- route second*) se ejecutan en dos fases. Primero se busca generar grupos de clientes, también llamados *clusters*, que estarán en una misma ruta en la solución final. Luego, para cada clúster se crea una ruta que visite a todos sus clientes. Las restricciones de capacidad son consideradas en la primera etapa, asegurando que la demanda total de cada clúster no supere la capacidad del vehículo. Por lo tanto, construir las rutas para cada clúster es un TSP que, dependiendo de la cantidad de clientes en el clúster, se puede resolver de forma exacta o aproximada. (Benavides, 2012).

Algunas heurísticas mencionadas por Benavides (2012), son:

- Heurística de Barrido o *Sweep*
- Heurística de Asignación Generalizada de Fisher y Jaikumar
- Heurística de Localización de Bramel y Simchi-Levi

➤ **Métodos Rutear Primero – Asignar Después**

En los métodos rutear primero - asignar después también se procede en dos fases. Primero se calcula una ruta que visita a todos los clientes resolviendo un TSP. En general esta ruta no respeta las restricciones del problema y se particiona en varias rutas, cada una de las cuales sí es factible.

Aunque la ruta inicial sea la solución óptima del TSP y la partición se realice de manera óptima, las rutas obtenidas no necesariamente son una solución óptima para el problema. Por lo tanto, alcanza con que la ruta inicial se calcule en forma heurística, por ejemplo, mediante la aplicación de 2-opt sobre una ruta aleatoria como en el trabajo original. El algoritmo puede ejecutarse repetidas veces, partiendo de diferentes rutas iniciales. (Benavides, 2012).

➤ **Algoritmo de Pétalos**

Este algoritmo es una extensión del algoritmo de barrido y se utiliza para generar varias rutas llamadas pétalos con el fin de hacer una selección final resolviendo un *Set Partitioning Problem*. Se dispone de un conjunto de rutas *R* en la que cada cliente es

visitado por varias rutas y se debe seleccionar un subconjunto de R que visite exactamente una vez cada cliente (Laporte, G., Reanud, J., & Boctor, F. 1996).

➤ **Procedimientos de búsqueda local**

Los procedimientos de búsqueda local se aplican para mejorar una solución ya obtenida. En estos procedimientos se define un conjunto de soluciones vecinas y parte de una solución primaria para luego reemplazarla por una solución vecina con menor costo. El procedimiento se repite hasta que no pueda mejorar la solución.

Los diferentes procedimientos de búsqueda local a partir de los autores Toth & Vigo (2002), Olivera (2004), & Laporte (1991) se mencionan a continuación.

- El operador Intercambio (Lin, 1965)
- El algoritmo de Lin-Kernighan (Lin., & Kernighan, 1973)
- El operador Or-opt (Or, 1976)
- El operador de Van Breedam (Van Breedam, 1995)
- GENI & GENIUS (Grendreau., Hertz., & Laporte, 1992)
- Algoritmo de transferencias clínicas (Thompson & Psaraftis, 1993)

4.1.5.3 Métodos Metaheurísticos

Los procedimientos metaheurísticos son una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria en los que los heurísticos clásicos no son efectivos. Estos son métodos de solución general que a diferencia de las heurísticas, permiten la exploración intensiva del espacio de soluciones para evitar caer en óptimos locales. (Galvis et al., 2011).

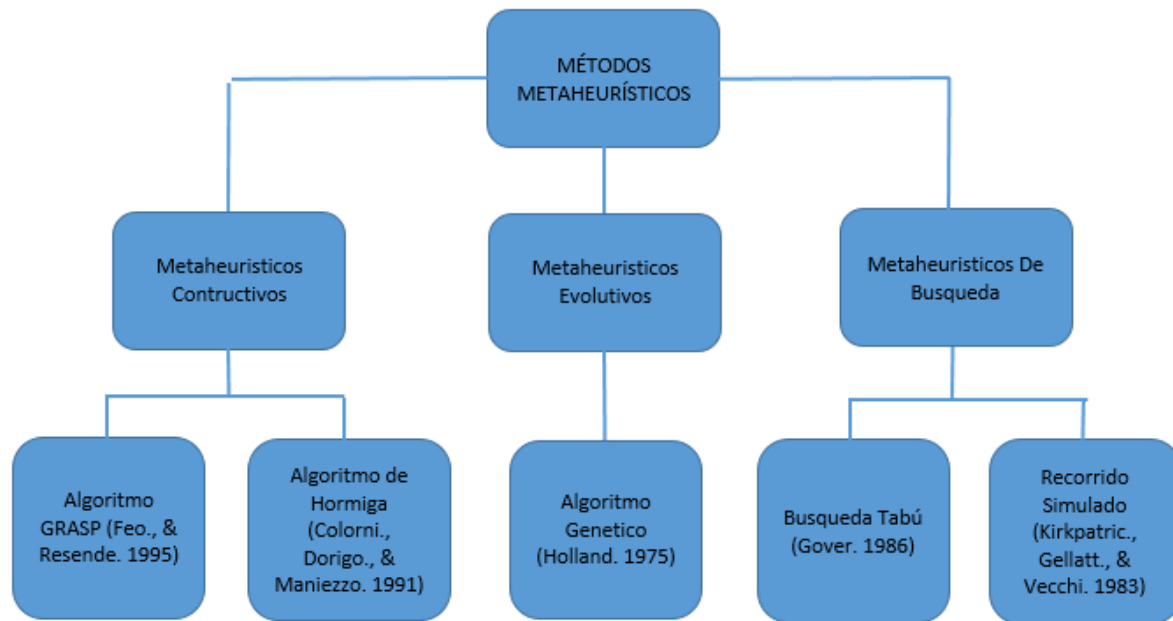
El termino metaheurística fue introducido por Fred Glover en 1986 y a partir de entonces han aparecido muchas propuestas de pautas o guías para diseñar mejor procedimientos de solución de problemas combinatorios.⁶

En general, las metaheurísticas obtienen mejores resultados que las heurísticas clásicas, pero incurriendo en mayores tiempos de ejecución (que de todos modos, son inferiores a los de los algoritmos exactos).

En la Ilustración 4.12 se muestra la clasificación de los métodos metaheurísticos establecida a partir de los autores Castañeda (2009), Benavides (2012), & Vásquez (2012).

⁶Conceptos, algoritmo y aplicación de las N- reinas. Capítulo 2. Heurística y Metaheurística. Recuperado de http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtualData/monografias/basic/riojas_ca/cap2.pdf

Ilustración 4.12. Taxonomía de los métodos de solución metaheurísticas.



Fuente. Adaptado de Castañeda (2009), Benavides (2012), & Vásquez (2012).

Los métodos contractivos se orientan a los procedimientos que tratan de la obtención de una solución a partir del análisis y selección paulatina de las componentes que la forman. Frente a las alternativas extremas de seleccionar arbitrariamente o al azar las sucesivas componentes, o seleccionar con una estrategia voraz la componente que presenta las máximas ventajas inmediatas. (Castañeda, 2009). Por otro lado, los métodos evolutivos construyen grupos de soluciones completas, realizan una selección basándose en el valor de ciertos atributos, posteriormente se combinan algunas de las soluciones seleccionadas y se remplazan finalmente el grupo de soluciones. Los métodos de búsqueda dan por hecho que debe existir una solución óptima y ejecutan un procedimiento que no llega a la solución del óptimo global del problema pero sí a una solución muy cercana a ésta. El riesgo más común de estos métodos es el de obtener la solución de un óptimo local y quedar atrapado en él.

➤ **Algoritmo GRASP**

El algoritmo GRASP en español puede traducirse como “Procedimiento de Búsqueda Voraz Aleatorio y Adaptativo; fue desarrollado por Feo and Resende en 1995, y se presentó como una metaheurísticas con propósito general. En este método, cada iteración o paso, tiene dos fases: construcción y mejora.

Durante la construcción se ejecuta una heurística constructiva de la que se obtiene una solución inicial. Posteriormente en la fase de mejora, esta solución inicial es tratada con un algoritmo de búsqueda local para ser mejorada. El componente particular de este algoritmo

es una función que se encarga de seleccionar al elemento a incluir en la solución actual que proporciona el mejor resultado sin llevar en consideración otros puntos de vista (de aquí la característica de voraz). (Vasquez, 2012).

➤ **Algoritmo de Hormigas**

Estos algoritmos están inspirados en la estrategia que usan las colonias de hormigas en la búsqueda de alimentos. Cuando una hormiga encuentra el camino para ir a la fuente de alimento deposita una sustancia (feromona) que depende de la longitud del camino y la calidad del alimento. Las hormigas tienden a seguir los trayectos con mayor cantidad de feromonas puesto que es más probable que conduzcan más rápido hacia la fuente de alimento, lo que a su vez provoca un refuerzo de los mejores trayectos, es decir, los que demoren menos tiempo y por donde transiten la mayor cantidad de hormigas. (Toth., & Vigo, 2002) (Olivera, 2004).

Rocha et al. (2011) resume el modo de funcionamiento de estos algoritmos en el caso de los VRP así: Se inicializa el algoritmo colocando una hormiga en cada nodo. Para la construcción de caminos, se utiliza una regla probabilística que asigna una probabilidad igual a cero si el nodo ya fue visitado y diferente a cero para el caso contrario. La hormiga visita el nodo que tenga una probabilidad mayor. En cada arco, se actualiza la “feromona” y finaliza si se obtiene una solución inferior a una cota preestablecida, de lo contrario se recalculan probabilidades y la hormiga sigue construyendo soluciones.

➤ **Algoritmo Genético**

Inspirado en la teoría de la evolución darwiniana, este algoritmo parte de una población inicial de individuos que representan soluciones iniciales factibles pero subóptimas. Seguidamente el algoritmo evoluciona mediante la aplicación de operadores evolutivos que combinan y modifican a los individuos de la población creando una nueva. Para cada individuo se define una función de aptitud $f(i)$ que califica su idoneidad. Usualmente, se trabajan tres operadores: selección, cruzamiento y mutación. (Toth., & Vigo, 2002) (Olivera, 2004).

La forma de operar de estos algoritmos para la solución del VRP según Rocha et al. (2011). se resume de la siguiente forma. Se generan soluciones iniciales, las cuales representan cada viaje como una secuencia de ciudades (a diferencia de los algoritmos genéticos tradicionales que utilizan una representación de dígitos binarios). Para cruzar dos soluciones, se toma una subruta que no necesariamente cumpla que inicie y termine en el depósito, y se determina el cliente más cercano que no esté en la subruta. Si la ruta no fuera factible, se particiona. De ésta manera se genera un descendiente, es decir, una copia modificada de una de las soluciones iniciales. Usualmente para este tipo de problemas, se consideran cuatro operadores de mutación: intercambio de la posición de dos nodos en una ruta; inversión del orden de la ruta; reinserción de un nodo en una ruta diferente a la original y selección de una subruta para insertarla en otro lugar de la solución.

➤ **Búsqueda Tabú**

La metaheurística de Búsqueda Tabú o Tabu Search fue propuesta por Glover y tiene como principio básico realizar una búsqueda local aceptando soluciones que aumentan el costo. (Benavides, 2012).

El algoritmo búsqueda tabú está basado en el concepto de movimientos prohibidos (movimientos tabú) dentro de la solución que se quiere mejorar. Estos movimientos tabú permiten al algoritmo moverse por una zona más amplia de posibles soluciones sin caer en soluciones anteriormente ya encontradas. Es lo que se conoce como “memoria”, y en la búsqueda tabú se encuentra el desarrollo de memoria tanto a corto plazo como a largo plazo.

Debido a esto, se dice que es una búsqueda inteligente que aprende a medida que itera el algoritmo a partir de la solución inicial. El modo de salir de óptimos locales encontrados es mediante técnicas de diversificación aleatorias pero inteligentes, es decir, respetando a la memoria a largo plazo, que es la que guía a la diversificación hacia zonas inexploradas.

➤ **Recorrido Simulado**

Básicamente es un método donde se construyen nuevas soluciones de un modo aleatorio basado en determinadas reglas probabilísticas.

Es un algoritmo denominado Hill-Climbing y está basado en el recocido de los metales donde se "calienta" a alta temperatura el sistema que se quiere optimizar, para después rebajar la temperatura lentamente, hasta que ya no ocurran modificaciones en el sistema. Aunque los cambios de temperatura durante el proceso real se dan de forma continua, en el algoritmo sólo se producen de forma escalonada. (Vásquez, 2012).

4.2 MARCO CONCEPTUAL

Generalmente existe una separación geográfica entre compradores y vendedores; para lo cual se hace necesario el traslado de bienes y servicios desde su lugar de producción hasta el consumidor (Diez de Castro, s.f.). Esta función se conoce como distribución y es un pilar fundamental en la dinámica económica de un país, ya que se constituye como herramienta básica para colocar los productos al alcance del consumidor.

A continuación se exponen los diversos conceptos que están relacionados de forma directa con el presente trabajo de grado o la problemática de interés.

4.2.1 Logística

Según Monterroso (2000), la logística es un término que frecuentemente se asocia con la distribución y transporte de productos terminados; sin embargo, ésta es una apreciación parcial

de la misma, ya que la logística se relaciona con la administración del flujo de bienes y servicios, desde la adquisición de las materias primas e insumos en su punto de origen, hasta la entrega del producto terminado en el punto de consumo.

De esta forma, todas aquellas actividades que involucran el movimiento de materias primas, materiales y otros insumos forman parte de los procesos logísticos, al igual que todas aquellas tareas que ofrecen un soporte adecuado para la transformación de dichos elementos en productos terminados: las compras, el almacenamiento, la administración de los inventarios, el mantenimiento de las instalaciones y maquinarias, la seguridad y los servicios de planta (suministros de agua, gas, electricidad, combustibles, aire comprimido, vapor, etc.).

Las actividades logísticas deben coordinarse entre sí para lograr mayor eficiencia en todo el sistema productivo. Por dicha razón, la logística no debe verse como una función aislada, sino como un proceso global de generación de valor para el cliente, esto es, un proceso integrado de tareas que ofrezca una mayor velocidad de respuesta al mercado, con costos mínimos. En la siguiente figura se muestran todas las actividades que conforman el proceso logístico.

Ilustración 4.13. Proceso Logístico.



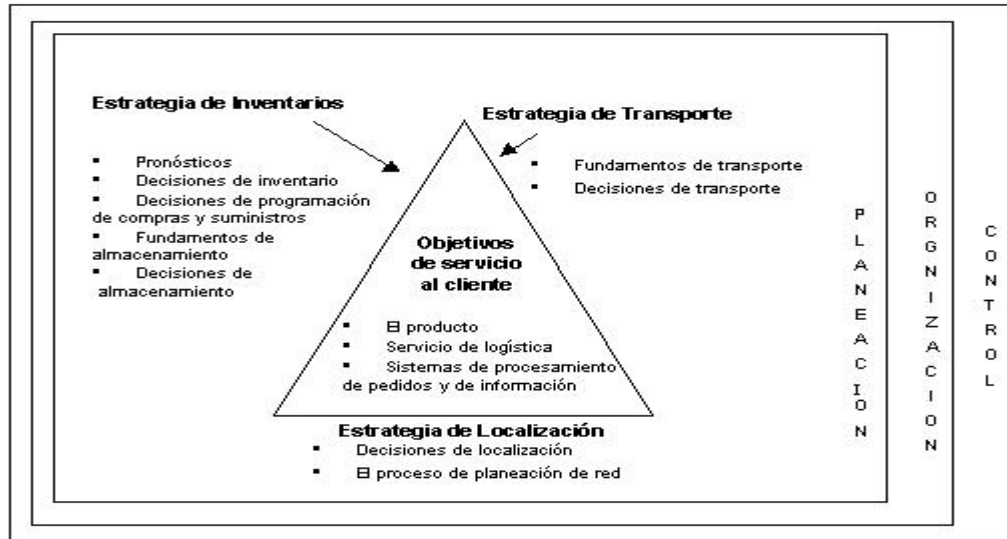
Fuente: Adaptado de Monterroso Elda. El proceso Logístico y la Gestión de la cadena de Abastecimiento. 2000

4.2.2 Planeación Logística

La planeación de las actividades logísticas es importante ya que de ésta depende el cumplir con el objetivo de satisfacer al cliente por medio de ciertas estrategias de transporte, inventario y localización. La planeación también incluye la forma en que la empresa pretende controlar estas actividades.

“La planeación logística toma en cuenta cuatro áreas problemáticas: el nivel de servicio al cliente, la facilidad de localización, las decisiones de inventario y las decisiones de transporte” (Ballou, 1999), que deben ser formulados tomando en cuenta el triángulo de toma de decisiones logísticas que se muestra en la siguiente **Ilustración**.

Ilustración 4.14. Triángulo de toma de decisiones logísticas.



Fuente: Ballou, 1999, p. 35

A continuación se hace una descripción referente a lo que concierne a cada tipo de estrategia.

- **Objetivos de servicio al cliente:** el nivel de servicio al cliente afecta de gran manera el diseño del sistema logístico. Los costos aumentan en proporción al nivel de servicio ofrecido.
- **Estrategia de localización:** el lugar geográfico de los puntos de almacenamiento es parte del plan logístico. El satisfacer la demanda directamente de las plantas o a través de los puntos de almacenamiento afecta en gran medida los costos de distribución.
- **Decisiones de inventario:** se refiere a la manera en que los inventarios son manejados. Existen dos estrategias para ello, el sistema de empuje de inventarios (push) y el sistema de jalar inventarios (pull).
- **Estrategia de transporte:** involucra el modo de selección, la creación de las rutas y los horarios. Estas decisiones son influenciadas por la proximidad de los almacenes y por los niveles de inventarios.

4.2.2.1 Niveles de planeación logística.

Ballou (1999), plantea que la planeación logística debe responder las tres preguntas que conciernen al qué, cuándo y cómo planear en sus tres distintos niveles:

- La planeación estratégica es considerada como de alto rango, donde el horizonte de tiempo es mayor de un año, y la información que se utiliza es por lo regular incompleta e imprecisa.
- La planeación táctica implica un horizonte de tiempo intermedio, usualmente menor a un año.

- La planeación operacional es considerada como de bajo rango, con decisiones frecuentemente realizadas en horas o días y con información que es por lo regular muy exacta.

Dentro de la planeación operacional se encuentra el diseño de rutas de vehículos, siendo una de las funciones operativas más críticas del transporte, enmarcado en la gestión de cadenas de abastecimiento.

4.2.3 Decisión de transporte

“El transporte es un área de decisiones clave en la logística. Exceptuando el costo de adquisiciones, el transporte absorbe en promedio, un porcentaje más alto de los costos de logística que cualquier otra actividad logística. Aunque las decisiones sobre el transporte se expresan en una variedad de formas, las principales son la selección del modo, el diseño de la ruta, la programación de los vehículos y la consolidación del envío” (Gonzales & Terán, 2010).

Dado que los costos de transporte normalmente se hallan entre un tercio y dos tercios de los costos logísticos totales, mejorar la eficiencia mediante la máxima utilización del equipo de transporte y de su personal es una preocupación importante. El tiempo durante el cual los artículos están en tránsito se refleja en el número de envíos que pueden hacerse con un vehículo en un periodo dado, así como en los costos totales de transporte para todos los envíos. Un problema frecuente en la toma de decisiones es reducir los costos de transporte y mejorar el servicio al cliente encontrando los mejores caminos que debería seguir un vehículo en una red de carreteras, líneas ferroviarias, líneas de embarque o ruta de navegación aérea que minimicen el tiempo o la distancia.

Aunque hay muchas variaciones dentro de los problemas de diseño de rutas, se puede reducir a unos cuantos tipos básicos. Está el problema de cómo hallar un camino a través de una red donde el punto de origen es diferente del punto de destino. Hay un problema parecido cuando existen múltiples puntos de origen y de destino. Además, el problema de diseñar las rutas cuando los puntos de origen y destino son los mismos. A continuación se considera cómo se puede resolver cada tipo. Para esto es necesario ver desde la base de la investigación de operaciones y su filosofía la clave para racionalizar y determinar un buen diseño y manejo de modelos para el tratamiento de este problema.

4.2.4 Planeación de rutas.

El problema de planeación de rutas es uno de los principales problemas en la optimización de operaciones logísticas en sistemas de transporte que buscan primordialmente la reducción de costos. Este problema en el enrutamiento de transporte ha sido catalogado como NP Completo debido a la gran cantidad de consumo de recursos computacionales para encontrar una solución óptima que crece de forma exponencial con respecto al tamaño del problema, razón por la cual

es tratado con algoritmos que no tienen la necesidad de explorar todo el espacio de búsqueda asociado para dar una respuesta aproximada.

El problema de la planeación de rutas es uno de los problemas más comunes en la optimización de operaciones logísticas y por ende uno de los más estudiados. El planteamiento inicial del problema consiste en buscar la solución óptima con diversos parámetros proporcionados por el usuario como el número de vehículos, la capacidad de los vehículos, lugares a visitar (clientes) y su demanda. El desarrollo de soluciones al problema de planeación de rutas en el área de operaciones logísticas ha sido de gran ayuda a la hora de hacer planeaciones de tiempo, distancias e inversión.

Los problemas más conocidos en el ámbito de la planeación de rutas son el problema del agente viajero –Travel Salesman Problem (TSP) y el problema de planeación de rutas vehiculares – Vehicle Routing Problem (VRP), para los cuales se han desarrollado diversos algoritmos que buscan una solución óptima con el menor costo computacional. (González & González, 2006).

- Problema del agente viajero o TSP: El problema del agente viajero o TSP (Traveling Salesman Problem) como se le conoce en la literatura, consiste en un agente de ventas que tiene que visitar n ciudades, comenzando y terminando en una misma ciudad, visitando solamente una vez cada ciudad, y haciendo el recorrido de costo mínimo, este costo de recorrido puede estar expresado en términos de tiempo o distancia, es decir, recorrer el mínimo de kilómetros o llevar a cabo un tour en el menor tiempo posible.
- El problema de planeación de rutas vehiculares (VRP): El problema de planeación de rutas vehiculares (Vehicle Routing Problem) tiene por objetivo encontrar las rutas que recorran cada uno de los vehículos (ubicados en un depósito) de manera que se satisfagan los requerimientos de los clientes, las restricciones operativas y se minimice el costo total de transporte.

El objetivo del VRP es entregar bienes a este conjunto de clientes con demandas conocidas, al mínimo costo, encontrando las rutas óptimas que se originan y terminan en el depósito. Todos los clientes deben ser atendidos una sola vez, para lo cual se los asigna a los vehículos que llevarán la carga (demanda de los clientes que visitará) sin exceder su capacidad.

En los problemas reales de VRP aparecen muchas restricciones, entre las que cabe citar:

- Cada Vehículo tiene una capacidad limitada
- Cada cliente tiene que ser visitado dentro de una ventana determinada de tiempo
- Varios puntos de suministro (problema de VRP con múltiples depósitos)
- Los clientes pueden ser atendidos por varios vehículos (problema VRP con suministro dividido)
- Algunas variables del problema son aleatorias, tales como el número de clientes, sus demandas, etc. (problema VRP estocástico)

- Las entregas se deben realizar en determinados días (problema VRP periódico)

Existen tres elementos involucrados en el VRP que son los clientes, las bodegas o almacenes y los vehículos.

- Los clientes: Cada cliente tiene cierta demanda que deberá ser satisfecha por algún vehículo. En muchos casos, la demanda es un bien que ocupa lugar en los vehículos, en otros casos la demanda no es un bien sino un servicio y el cliente simplemente debe ser visitado por el vehículo.
- Las Bodegas o centros de distribución: Tanto los vehículos como los bienes a distribuir suelen estar ubicados en las bodegas o centros de distribución. Usualmente cada ruta comienza y finaliza en un mismo punto, la bodega. En ciertos casos cuando la flota no es propia los vehículos no regresan a la bodega de origen, esta variante del VRP se conoce como OVRP (Open-VRP). También existen problemas con múltiples bodegas, y cada una de estas podría tener asignada una flota de vehículos determinada.
- Los vehículos: La capacidad de un vehículo puede estar expresada en peso, volumen, número de clientes, entre otras. En algunos casos se desea que la cantidad de trabajo realizado por los vehículos (usualmente el tiempo de viaje) no sea muy dispar. En general se asume que cada vehículo recorre una sola ruta en el periodo de planificación, pero últimamente se han estudiado modelos en los que un mismo vehículo puede recorrer más de una ruta. Los costos de los vehículos tienen un componente fijo en el cual se incurre por utilizarlos y un componente variable proporcional a la distancia recorrida.⁷

4.2.5 Clasificación de problemas de ruteo de vehículos.

En el mundo real, los VRP presentan muchas restricciones especiales, aparte de las ya nombradas. Esto crea el surgimiento de variantes del problema original. Benavente & Bustos (2001) menciona y describe algunas de las principales:

- Cada vehículo tiene una capacidad limitada (Capacitated VRP - CVRP)
- Cada cliente tiene que ser atendido dentro de una cierta ventana de tiempo (VRP with time windows - VRPTW)
- El vendedor usa varios depósitos para abastecer a los clientes (Multiple Depot VRP - MDVRP)
- Los clientes tienen la opción de devolver algunos bienes al depósito (VRP with Pick-Up and Delivering - VRPPD)
- Los clientes pueden ser abastecidos por distintos vehículos (Split Delivery VRP - SDVRP)

⁷ Universidad de los Andes; 2001; septiembre de 2007; Recuperado de <http://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/rev22art19>.

- Algunos valores (como número de clientes, sus demandas, tiempo de servicio o tiempo de viaje) son aleatorios (Stochastic VRP - SVRP)
- Los pedidos pueden ser llevados sólo en ciertos días (Periodic VRP - PVRP)
- El problema de enrutamiento de inventario (IRP)

Capacitated VRP (CVRP): Este problema es una extensión del clásico problema del vendedor viajero (TSP), en que las rutas permitidas son limitadas por la necesidad de que los objetos deben ser entregados desde un punto fuente hasta su destino por un vehículo de capacidad finita.

En este tipo de problema, se cuenta con un centro de depósito, “n” vehículos con capacidad definida para cada uno. Éstos deben salir y regresar al depósito después de cumplir una secuencia de visita a clientes que se debe definir. Las restricciones que se deben tener en cuenta son las de visitar a todos los clientes una vez, satisfacer la demanda total y no sobrepasar la capacidad de carga máxima de cada vehículo.

VRP with Times Windows (VRPTW): Es el mismo problema que el VRP, pero con la restricción adicional de considerar ventanas de tiempo en las que los clientes deben ser atendidos. Las ventanas de tiempo implican la existencia de un límite o intervalo de tiempo dentro del cual un cliente debe ser abastecido.

El objetivo es minimizar la flota de vehículos, el tiempo total de viaje y el tiempo de espera necesario para abastecer a todos los clientes en sus respectivos horarios.

Las soluciones son factibles si, además de las características de las soluciones de VRP, se agregan las siguientes características: una solución se convierte en infactible si un cliente es abastecido después del límite superior de su ventana horaria, si el vehículo llega antes del límite inferior de la ventana horaria el tiempo causa un aumento en el tiempo de espera, cada ruta debe empezar y terminar dentro de la ventana de tiempo asociada al depósito y en el caso de ventanas menos estrictas, un servicio tardío no afecta a la factibilidad de la solución pero si se penaliza agregando un valor a la función objetivo.

VRP with Multiple Depot (MDVRP): Una compañía puede tener varios depósitos desde donde abastece a sus clientes. Si los clientes se encuentran agrupados alrededor de los depósitos, entonces el problema de distribución se puede modelar como varios VRP independientes. No obstante, si los clientes y los depósitos se localizan entremezclados se tiene un problema de MDVRP. En este tipo de problema se consideran varios depósitos, donde en cada uno de ellos existe una flota de vehículos. Cada depósito tiene a su cargo a un número de clientes, los cuales son atendidos por los vehículos asignados al depósito. El objetivo de este

problema, junto al ya mencionado de reducir la distancia recorrida, es minimizar la flota de vehículos asignados a cada depósito.

VRP with Pickup and Delivery (PDVRP): Esta variante incluye la posibilidad de recoger y entregar mercancía en lugar de sólo entregarla. También se contempla la devolución de bienes por parte de los clientes. Por lo que hay que considerar que los bienes que entregan los clientes puedan ser depositados en el vehículo. Esta restricción de devolución dificulta la planificación, lo que se traduce en una utilización ineficiente de la capacidad del vehículo y un aumento en las distancias de viaje. El fin es encontrar rutas óptimas de visita a los lugares de entrega y recibo para una flota de vehículos.

Por consiguiente es usual que se consideren situaciones restringidas, en donde todas las demandas de entrega empiezan desde el depósito y todos los bienes recogidos serán llevados de vuelta al depósito, logrando de esta manera que no se produzcan intercambios de bienes entre clientes. Otra alternativa es relajar la restricción de que los clientes deben ser visitados exactamente una vez. Otra simplificación usual es considerar que cada vehículo debe entregar todo su contenido antes de recoger otros bienes de los clientes.

VRP with Split Deliveries (SDVRP): Es una relajación del VRP, en donde se permite que un mismo cliente sea abastecido por distintos vehículos, siempre y cuando esto ayude a reducir los costos totales de la ruta. El problema consiste en que dada una flota de vehículos homogéneos estacionados en un depósito central y un conjunto de clientes requiriendo que sus demandas sean satisfechas, se deben encontrar las rutas de los vehículos empezando y terminando en el depósito cuando cada cliente sea visitado. Se diferencia de otros problemas más conocidos de rutas con capacidades en que se permite abastecer la demanda de cada cliente utilizando más de un vehículo.

Stochastic VRP (SVRP): En este problema se asume alguno(s) componente(s) no determinista(s) presentes en el sistema. Ya sea si se encuentran clientes con una probabilidad de presencia o de ausencia, a clientes cuya demanda es una variable estocástica y clientes donde el tiempo de servicio, junto con el tiempo de recorrido, son variables aleatorias.

En los SVRP existen dos etapas para llegar a una solución. Una primera solución es determinada antes de conocer las realizaciones de las variables aleatorias. En una segunda etapa, un recurso o acción correctiva puede tomarse cuando se conocen los valores de las variables aleatorias.

Debido a la aleatoriedad de algunos datos, no es posible requerir que todas las restricciones se satisfagan para todas las realizaciones de las variables aleatorias. Así que la decisión puede requerir, ya sea el cumplimiento de ciertas restricciones con una probabilidad dada, o la

incorporación en el modelo de acciones correctivas a considerarse cuando una restricción es violada.

Periodic VRP (PVRP): En los problemas clásicos de VRP el periodo de planeación es de un día. En el caso de los PVRP, el clásico VRP es generalizado extendiendo el periodo de planeación a “M” días.

Para esta variante se debe considerar las restricciones de que un cliente debe ser visitado como mínimo una vez dentro de un período de tiempo definido, cada vehículo debe tener una capacidad de carga definida, se tiene que satisfacer la demanda de cada cliente y respetar algunos horarios de recepción de mercadería y no es necesario que el vehículo tenga que regresar al depósito en el mismo día que salió, sino que debe regresar dentro del período de tiempo ya definido.

Inventory Routing Problem (IRP): El Problema de Ruteo de Vehículos con Inventarios (IRP por sus siglas en inglés), nace en torno del ámbito logístico a raíz de la implantación, en medianas y grandes empresas, de los esquemas de Inventario Manejado por el Proveedor (VMI por sus siglas en inglés). Esta filosofía de trabajo consiste en que el proveedor deberá monitorear constantemente los niveles de inventario de sus clientes, determinar cuándo reabastecerlos y en qué cantidad, así como elaborar la hoja de ruta que deberán recorrer sus camiones al momento de realizarse la distribución. (Saltos, 2014).

Este esquema logístico plantea la necesidad al proveedor, de integrar en un sólo modelo las decisiones asociadas con el ruteo de los vehículos, la cantidad de producto a enviar a cada cliente cada día y el nivel de inventario que se deberá mantener en las bodegas de los mismos, de tal forma que se minimicen todos los costos operativos asociados. Dada la creciente necesidad de desarrollar políticas óptimas de operación para este esquema logístico, en el año de 1984, AwiFedergruen y Paul Zipkin publican un artículo titulado “*A Combined Vehicle Routing and Inventory Allocation Problem,*” donde se propone un modelo integrado de ruteo de vehículos con localización de inventarios, dando origen a lo que hoy se conoce como *Inventory Routing Problem*.

El *Inventory Routing Problem* presenta un sistema de inventario en el que el reabastecimiento es manejado por el proveedor (Campbell & Salvendy, 2004). Este problema implica la integración y la coordinación de dos componentes de la cadena de valor de la logística: manejo de inventario y ruteo de vehículos. El objetivo es reducir al mínimo los costos de distribución durante el período de planificación sin causar desabastecimiento en cualquiera de los clientes.

El reabastecimiento manejado por el proveedor se refiere a una política en la cual un productor maneja el inventario de sus clientes. El proveedor negocia una política con sus clientes en la

cual es la compañía la que está a cargo del manejo de sus inventarios, es decir, los clientes ya no tienen que llamar al proveedor para solicitar un despacho. El proveedor determina quién recibe un despacho cada día y de qué volumen será ese despacho. Para poder solucionar estos problemas en la práctica, es importante que el proveedor tenga acceso a la información exacta y oportuna sobre el estado del inventario de los clientes. Una razón por la cual el reabastecimiento manejado por el proveedor haya estado recibiendo mucha atención es la disponibilidad reciente de tecnología de bajo costo que permite el monitoreo del inventario de los clientes.

La aplicación de los principios del reabastecimiento manejados por el proveedor crea las ventajas tanto para el proveedor como para el cliente. El proveedor ahorra en costos de distribución pudiendo mejorar la coordinación de entregas a diversos clientes. Los clientes pueden recibir incentivos y todos pueden ahorrar tiempo y esfuerzo en el manejo de inventarios.

La actividad de reabastecimiento de producto manejado por el proveedor es una combinación de elementos que pueden crear valor logístico, según lo ya expresado. Sin embargo, a pesar de que dicha actividad es una situación ganar-ganar para proveedores y clientes, y de que la tecnología de monitoreo de inventarios requerida está disponible, la razón para no aplicarla a gran escala es que el desarrollar una estrategia de distribución que minimice los costos de transporte e inventarios y al mismo tiempo evite el desabastecimiento, es una tarea en extremo complicada. (Naranjo, 2006)

En la aplicación práctica, el IRP resulta ser un modelo de gran tamaño, asumiendo el concepto como modelos con un gran número de variables y restricciones, así como modelos para los que las capacidades de solución de los algoritmos y la velocidad de obtención de resultados, representan un grave problema. De hecho el IRP es un problema NP-duro (Elizondo & Aceves, 2004), y cuando además resulta ser grande, la obtención óptima de la solución en tiempos razonables se hace prácticamente imposible.

Según Papadimitriou (1982) los modelos se clasifican según su complejidad en:

- **Complejidad P:** Se denota con complejidad P a los problemas que pueden ser resueltos por algoritmos que toman un tiempo polinomial en resolverlos.
- **Complejidad NP:** Se denota con complejidad NP a los problemas que no pueden ser resueltos por algoritmos que toman un tiempo polinomial, es por ello que los resultados no son exactos sino aproximados.

4.2.6 Métodos Heurísticos y Metaheurísticos

El VRP es un problema muy conocido que cae dentro de la denominada clase de problemas NP-Completo. Esto significa que el esfuerzo de computación necesario para encontrar una solución óptima crece de forma exponencial con el tamaño del problema. Por este motivo se recurre a métodos aproximados de manera que se pueda encontrar soluciones suficientemente buenas en un tiempo de cómputo razonable. Para resolver el VRP se encuentran dos grupos de métodos aproximados, los heurísticos y los metaheurísticos, y dentro de cada grupo existen varios métodos.

Los métodos heurísticos se empezaron a desarrollar entre 1960 y 1990, en cambio el crecimiento de los métodos metaheurísticos ha ocurrido en las últimas dos décadas.

La calidad de las soluciones encontradas con los métodos metaheurísticos es mucho mejor que la de las obtenidas con los heurísticos debido a la mayor complejidad en los algoritmos, uso de memorias estructurales y recombinación de las soluciones; pero son procedimientos que en general dependen del contexto.

Los métodos metaheurísticos realizan una exploración intensiva del espacio de soluciones, la calidad de las soluciones es mucho mayor que la obtenida por los heurísticos clásicos pero tienden a consumir mucho más tiempo. También pueden ser utilizados para mejorar las soluciones obtenidas por los heurísticos simples. Entre los metaheurísticos más utilizados para el VRP están: reconocido simulado, búsqueda tabú, algoritmos genéticos, colonias de hormigas, entre otras. (Balseiro, 2007, p.1-5).

Dentro de los métodos heurísticos existen tres grupos; los métodos constructivos, los métodos de dos fases y los métodos de mejora; a continuación se describirán los más utilizados dentro de cada grupo:

- Los métodos constructivos buscan de forma gradual una solución factible tratando de minimizar el costo.
- Los métodos de dos fases consisten primero en calcular una ruta que visita a todos los clientes resolviendo un TSP y por último se divide la ruta para ser atendida por varios vehículos, o viceversa.
- Los métodos de búsqueda local usan soluciones iniciales para intentar mejorarlas haciendo pequeños cambios sucesivamente.

5. DIAGNÓSTICO DE LOS FACTORES CRÍTICOS

Para el cumplimiento del primer objetivo, se realizará un diagnóstico de los factores críticos relacionados con la problemática de la distribución de productos desde un centro de distribución hacia varios clientes considerando inventarios en puntos de venta, restricciones de capacidad, número de vehículos y demanda de un solo producto en puntos de venta que se expone en la literatura. Dentro de los factores que intervienen en el problema de ruteo de inventario se encuentran cantidad y capacidad de vehículos, cantidad a servir, capacidad de almacenamiento de cada cliente, secuenciación y ruta de entrega, entre otros.

El problema de cómo distribuir productos desde ciertos depósitos a sus usuarios finales juega un papel central en la gestión de algunos sistemas logísticos y su adecuada planificación puede significar considerables ahorros.

Cabe mencionar que el costo de distribución representa para la mayoría de las empresas, el costo más elevado del valor del producto. Casi todas las empresas tratan de fijar su nivel de servicio al costo mínimo, es decir, diseñan estrategias tales como el almacenamiento, el procesamiento de pedidos, el transporte, manejo de inventarios y administración de materiales, de la manera más eficiente, para lograr que el producto llegue a los consumidores a un precio óptimo. (Velázquez, 2012, p.15).

La distribución es el puente que une la producción con el consumo debido a que ofrece al consumidor, el producto esperado, en el lugar adecuado y en el momento ideal para ser consumido (Alban. 2009). Para Zabala (2006) en la industria, el costo asociado al transportar el producto de la producción al consumidor representa una parte importante del valor final de la mercancía o del servicio brindado. Según Toth & Vigo (2002) se estima que estos costos de transporte representan entre el 10% y el 20% del costo final de los bienes, donde aparece el VRP como una alternativa para la minimización de dichos costos.

Bustos (s.f) afirma que la función objetivo del VRP depende de la tipología y características del problema. Lo más habitual es intentar:

- minimizar el costo total de operación
- minimizar el tiempo total de transporte
- minimizar la distancia total recorrida
- minimizar el tiempo de espera
- maximizar el beneficio
- maximizar el servicio al cliente
- minimizar la utilización de vehículos, entre otros.

En ese sentido, las últimas cuatro décadas se han visto un enorme esfuerzo por resolver estos problemas. En 1959, Dantzig y Ramser realizaron por primera vez una formulación del problema para una aplicación de distribución de combustible. Cinco años más tarde, Clarke y Wright propusieron el primer algoritmo que resulto efectivo para su resolución: el popular Algoritmo de Ahorros. A partir de estos trabajos, el área de Ruteo de Vehículos ha crecido de manera impresionante en primera instancia, hacia modelos que incorporen cada vez más

características de la realidad y por otro lado, en la búsqueda de algoritmos que permitan resolver los problemas de manera eficiente.

Teniendo en cuenta los trabajos mencionados y la necesidad de incluir otras variables que hacen parte de la distribución de productos surge el IRP, el cual incluye las características esenciales del VRP pero considerando el inventario en el punto de venta.

Según Campbell, Clarke, Kleywegt & Salvendy (1997), el inventario administrado por el proveedor es una tendencia emergente en la logística y se refiere a una situación en la que un proveedor gestiona la reposición de inventario de sus clientes. Los vendedores ahorran en el costo de distribución por ser capaz de coordinar mejor las entregas a diferentes clientes y los clientes no tienen que dedicar recursos a la gestión del inventario. El problema de ruteo de inventario recoge las características básicas de las situaciones donde el inventario es administrado por el proveedor de la cadena de abastecimiento, y las metodologías desarrolladas para su solución podrían convertirse en bloques de construcción para sistemas de planificación logística.

Para Bertazzi & Speranza (2012), las principales características de un IRP incluyen el horizonte de planificación, las políticas, los objetivos, las decisiones.

- **Los tiempos de envío y el horizonte de planificación.**

Los posibles tiempos de envío de un IRP pueden ser:

1. Un envío continuo se puede realizar en cualquier momento (a partir de 0).
2. Continuo con un tiempo mínimo, un envío se puede realizar en cualquier momento (a partir de 0), pero el tiempo entre cualquier par de envíos consecutivos no pueden ser inferiores a un tiempo mínimo determinado, causado por el envío o recepción de los requisitos de tiempo de configuración.
3. Los envíos discretos sólo se pueden realizar en los múltiplos de un tiempo mínimo. Dado que el tiempo mínimo puede normalizarse a 1 sin pérdida de generalidad, los envíos se realizan en tiempos discretos.

- **El horizonte de planificación más que una política óptima puede ser:**

1. Infinito. En este caso, el IRP apunta a determinar un plan de distribución a largo plazo que pueden ser útiles, por ejemplo, para determinar la flota de vehículos, el número de los conductores, y la organización del área de distribución en las regiones, los demás problemas operativos detallados pueden ser resueltos en una etapa posterior.
2. Finita. La longitud del horizonte de planificación depende de la situación específica abordada, un horizonte corto es más operativo que un horizonte largo.

- **Políticas estructuradas**

Dados los posibles tiempos de envío y el horizonte de planificación, para una distribución óptima la política es precisada por los tiempos de servicio en los clientes, las cantidades a entregar y las rutas de los vehículos. El problema de determinar una política óptima de distribución, sin ninguna estructura específica, puede ser extremadamente difícil. Por otra parte, puede haber razones prácticas para restringir la estructura de una política. Si la estructura de una política es definida, el objetivo de un IRP se convierte en la búsqueda de un óptimo o una política heurística con base en las políticas estructuras dadas.

- **Objetivos**

La solución óptima de cualquier IRP depende de la función objetivo seleccionado. La minimización del costo de transporte sólo es un objetivo adecuado para una toma de decisión que es responsable del transporte o sólo para una situación en la que los costos de inventario no son relevantes en comparación con los costos de transporte. En este caso, puede esperar que una solución óptima determine transportes infrecuentes es decir vehículos muy cargados. La minimización de los costos de inventario es el objetivo en situaciones donde la atención se centra en la gestión de inventarios. En este caso, se puede esperar frecuentemente el transporte, esto es lo que sucede cuando se implementa el Just in Time.

El objetivo de minimizar la suma de los costos de inventario y transporte es más adecuado que la minimización de sólo uno de los dos componentes de los costos cada vez que un decisor es responsable de todos los componentes de costos. Abordar el transporte como un problema por separado de la gestión de inventario se convierte en estos casos una manera de descomponer un problema complejo en problemas más simples, pero produce soluciones subóptimas.

A grandes rasgos un Problema de Ruteo de Vehículos consiste en dado un conjunto de clientes y depósitos dispersos geográficamente y una flota de vehículos, determinar un conjunto de rutas de costo mínimo que comiencen y terminen en los depósitos, para que los vehículos visiten a los clientes. Las características de los clientes, depósitos y vehículos, así como diferentes restricciones operativas sobre las rutas, dan lugar a diferentes variantes del problema. (Olivera, 2004).

Teniendo en cuenta lo anterior se encuentran algunos criterios que inciden en la distribución de productos tales como:

5.1 Número de Vehículos

Los vehículos de transporte de carga por carretera es un pilar fundamental de la economía de Colombia, según informó la Federación Colombiana de Transportadores de carga (Colfecar), al cierre del primer semestre del 2015 el sector de transporte de carga por carretera tuvo un crecimiento del 11,04% en cuanto a las toneladas movilizadas en comparación del mismo periodo del 2014. Se pasó de 33,67 a 37,39 millones de toneladas movilizadas.⁸

⁸ Redacción Economía. (2015, 04 de Junio). Transporte de carga por carretera creció 11,04% en primer trimestre. El Espectador. Recuperado de <http://www.elespectador.com/noticias/economia/transporte-de-carga-carretera-crecio-1104-primer-trimes-articulo-564552>

Para Olivera (2004), los vehículos se definen por un conjunto de atributos, como su capacidad de carga en peso, en volumen, sus costos asociados, entre otros. Los problemas en que los atributos mencionados son los mismos para todos los vehículos se denominan de flota homogénea y si hay diferencias, de flota heterogénea.

El número de vehículos disponibles de una flota puede ser un dato conocido o una variable de decisión. En la utilización de un vehículo se incurre en un costo fijo asociado al utilizarlo, y un costo variable en función del tiempo, distancia que recorra u otros parámetros. Por ello, es común que el objetivo sea intentar utilizar la menor cantidad de vehículos y en segundo lugar minimizar la distancia o tiempo empleado de su ruta. (Villalobos, 2007)

Estrada (2007) afirma que en las redes de distribución tradicionales, la empresa de producción organiza y gestiona su propia red de transporte, de forma que realiza los envíos desde un número limitado de sus plantas de producción hasta cada cliente o mercado. Sin embargo, las ineficiencias de estas redes por las asimetrías de los envíos, su variación temporal o los altos costos de inversión necesarios para vehículos o recursos han llevado al nacimiento de empresas dedicadas exclusivamente a los servicios de transporte (*thirdpartlogistics*). Generando la externalización de la distribución de productos a terceras empresas. Estas empresas subcontratadas prestarán sus servicios de transporte y distribución a varias empresas de producción, por lo que un mismo trayecto o ruta de transporte podrá ser compartido por varios clientes.

5.2 Capacidad de Vehículos

Un diseño óptimo consiste en diseñar un conjunto de rutas de modo tal que el costo total de recolección sea mínimo sin exceder la capacidad o tiempo de viaje de los vehículos.

Los problemas de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad tienen como objetivo diseñar una serie de rutas de entrega desde un solo depósito hacia un conjunto de clientes geográficamente dispersos. En la versión más simple se supone que los vehículos son homogéneos y por lo tanto, tienen la misma capacidad. Sin embargo, en la industria, una flota de vehículos es raramente homogénea, ya que la necesidad de estar presente en diversos segmentos del mercado obliga a muchas empresas a disponer de vehículos que se adapten a la tipología de la mercancía transportada. De igual modo, el disponer de vehículos con diferentes unidades de carga, permite una mejor adaptación a la demanda (Yepes y Medina, 2002). La variante VRP para flotas heterogéneas (*HFVRP*, *Heterogeneous Fleet VRP*), aparece cuando los diferentes vehículos que conforman la flota difieren en equipamiento, capacidad, antigüedad, estructura de costes o incluso nivel de emisiones, si éstas son consideradas.

Todos los clientes deben ser atendidos una sola vez, por lo tanto, el vehículo que le suministre el pedido deberá tener una capacidad mayor que la demanda total del cliente. (Vásquez, 2012, p.27).

Crainic (2003) plantea una posible clasificación de las redes y servicios de transporte según las posibilidades de consolidación de los envíos en un mismo vehículo, es decir, los servicios

o envíos adaptados a un cliente son propiamente servicios de transporte puerta a puerta, en donde toda la mercancía comparte el mismo origen o el mismo destino. El propósito es que la totalidad de la capacidad del vehículo sea ocupada por la mercancía o envío en cuestión. Esta tipología de servicios suele ser conocida como *Full Truck Load*, (FTL).

Por otro lado, existen algunas empresas de transporte que presentan específicamente la característica de ofrecer un servicio de transporte consolidado. Estas empresas fijan unos plazos de distribución de la mercancía o unos horarios de envío fijos, que se determinan con el objetivo de cumplir con las expectativas y preferencias del máximo número de clientes. Es decir, los servicios de transporte ya no se hacen específicamente para cada cliente. La idea, es establecer un diseño de rutas y paradas acordes con la demanda, de forma que las capacidades de los vehículos sean adecuadas para garantizar la rentabilidad del sistema. Esta tipología de servicios se denomina *Less-Than Truck Load* (LTL), ya que el tamaño de la mercancía o envío de un solo cliente es muy inferior a la capacidad del vehículo de transporte. (Estrada, 2007, p.8). Por tanto, es necesario que cada viaje del vehículo sea cargado con envíos de múltiples clientes para incrementar su ocupación y aprovechar al máximo la capacidad del vehículo.

El efecto directo de estos modos de operación y servicio es la posibilidad de consolidar una mayor cantidad de carga en cada ruta de la red, por lo que es factible utilizar vehículos de gran capacidad y con costos unitarios menores.

Ballou (2004) afirma “dado que los costos de transporte normalmente se hallan entre un tercio y dos tercios de los costos logísticos totales, mejorar la eficiencia mediante la máxima utilización del equipo de transporte y de su personal es una preocupación importante. El tiempo durante el cual los artículos están en tránsito se refleja en el número de envíos que pueden hacerse con un vehículo en un período dado, así como en los costos totales de transporte para todos los envíos”.

5.3 Demanda

La demanda es una de las fuerzas que hacen que las economías de mercado funcionen. Tanto la demanda como la oferta determinan la cantidad que se produce de cada bien y al precio al que debe venderse.⁹

La competencia global estimula el incremento de una demanda cada vez más exigente y personalizada. Forzando a los fabricantes a buscar nuevas maneras de producir más acordes a las necesidades cambiantes y personalizadas del mercado, al mismo tiempo que mantienen los costos lo más bajos posibles. Todo ello está exigiendo a las empresas a encontrar nuevos modos de colaboración que mejoren la integración y sincronización de las diferentes funciones y etapas de la cadena de suministro de sus productos, desde la fabricación hasta la distribución (Vilana, 2011, p.2). Para ello, las empresas deben cumplir con una serie de procedimientos para ofrecerle al consumidor final, no solo el servicio o producto terminado, sino también la satisfacción que el cliente desea obtener, con el objeto de lograr que los consumidores consigan todo lo que necesitan al alcance de su mano.

⁹ La oferta, la demanda y el mercado. Recuperado de <http://assets.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448181042.pdf>

Cruz Roche (1990), afirma que para que las ventas de una empresa se generen, no basta con tener un buen producto a un buen precio y que sea conocido y demandado por los consumidores; sino que además, es necesario que se encuentre en el lugar y momento adecuado para que ese producto sea accesible al consumidor.

Por lo tanto, el diseño de rutas con las cuales se atiende la demanda de los clientes finales, es una decisión operativa y logística que debe tomarse frecuentemente en la gestión del transporte.¹⁰ Según Olivera (2004), cada cliente tiene cierta demanda que deberá ser satisfecha por algún vehículo. En muchos casos, la demanda es un bien que ocupa lugar en los vehículos y es usual que un mismo vehículo no pueda satisfacer la demanda de todos los clientes en una misma ruta.

Hay casos en que la demanda futura se supone perfectamente conocida, es decir, la demanda es determinista y las rutas se planean de forma que los vehículos tengan suficiente capacidad para satisfacer las demandas de los clientes dadas unas rutas preestablecidas. Sin embargo, existe el caso en que la empresa encargada de la distribución cuenta con clientes con demandas inciertas. Bajo esta consideración, la demanda sólo será revelada en el momento en que el vehículo visita al cliente (Galvan, Arias & Lamos, 2012).

5.4 Nivel de Inventarios en puntos de venta

Se conoce como inventario a una cantidad de bienes bajo el control de una empresa o negocio, guardados durante algún tiempo para satisfacer una demanda futura (Sipper & Bulfin, 1998, p. 219).

Mantener inventarios es necesario para las compañías que tratan con productos físicos, como fabricantes, distribuidores y comerciantes. Por ejemplo, los fabricantes necesitan inventarios de materiales requeridos para la manufactura de productos. También se almacenan productos terminados en espera de ser enviados. De manera similar, tanto los distribuidores como las tiendas deben mantener inventarios de bienes disponibles cuando los consumidores los necesiten.¹¹

Existen varias razones para que una empresa mantenga productos terminados o insumos como inventario. El inventario permite enfrentar fluctuaciones de la demanda, evitar quiebres de stock, obtener economías de escala; permitiendo una mayor flexibilidad productiva. Sin embargo los stocks representan un inmovilizado de capital sin rentabilidad.¹² Además los costos de mantenimiento, deterioro, de obsolescencia, entre otros; pueden suponer una parte importante del costo de almacenamiento.

¹⁰Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. (2008). N° 45 Septiembre, p. 173

¹¹ "Teorías de Inventarios o Stock". (s.f) Catedra: Producción I. Cap.9.

¹²"Gestión de Inventarios de Demanda Independiente". (2004).: *Diseños de Sistemas Productivos y Logísticos*

Según “Teorías de Inventarios o Stock”. ((s.f). Catedra: Producción I. Cap.9) al tomar cualquier decisión que afecte el tamaño del inventario, se deben tener en cuenta los siguientes costos:

- **Costos de mantenimiento:** esta categoría incluye los costos de las instalaciones de almacenamiento, el manejo, el seguro, hurto, la rotura, la obsolescencia, la depreciación, los impuestos, y el costo de oportunidad del material. Obviamente, los altos costos de mantenimiento tienden a favorecer unos bajos niveles de inventarios y la reposición frecuente.
- **Costos de preparación (o de cambio en la producción):** la fabricación de cada producto diferente implica obtener los materiales necesarios, arreglar la preparación del equipo específico, diligenciar los documentos requeridos, atribuir de manera apropiada el tiempo y los materiales, y desalojar los anteriores suministros de material. Si no hubieran costos o pérdida de tiempo en cambiar de un producto a otro, se producirían muchos lotes pequeños. Esto reduciría los niveles de inventario con el resultante ahorro en el costo. Un desafío en la actualidad es tratar de reducir estos costos de preparación para permitir unos tamaños de lotes más pequeños (objetivo del sistema JIT).
- **Costos de las órdenes:** estos se refieren a los costos administrativos y de oficina para elaborar la orden de compra o de producción. Los costos de las órdenes incluyen todos los detalles, tales como contar los artículos y calcular las cantidades de órdenes. Los costos asociados con el mantenimiento del sistema necesario para rastrear las órdenes están también incluidos en estos costos.
- **Costos de los faltantes:** cuando las existencias de un artículo están agotadas, los pedidos de ese artículo deben esperar hasta que estas se repongan o cancelarse. Existe una transacción entre llevar las existencias para satisfacer la demanda y los costos resultantes del agotamiento de las mismas. Este equilibrio es difícil de lograr, porque no es posible calcular las utilidades perdidas, los efectos de perder clientes o las sanciones por retraso.

Establecer la cantidad correcta que debe pedirse a los proveedores, o el tamaño de los lotes presentados a las instalaciones productivas de una firma, implica una búsqueda del costo total mínimo resultante de los efectos combinados de cuatro costos individuales: los costos de mantenimiento, los costos de preparación, los costos de los pedidos y los costos de los faltantes.

Para lo cual reducir los costos de almacenamiento evitando inventarios innecesariamente grandes puede mejorar la competitividad de cualquier empresa, (...). La aplicación de técnicas de la investigación de operaciones en esta área como lo es la Administración de los Inventarios proporciona una herramienta eficaz para lograr una ventaja competitiva.¹³

“La Administración de Inventarios se refiere a una serie de actividades de planeación y utilización correcta del recurso, al menor costo posible” (Serbinio, s.f). Esto con el fin de

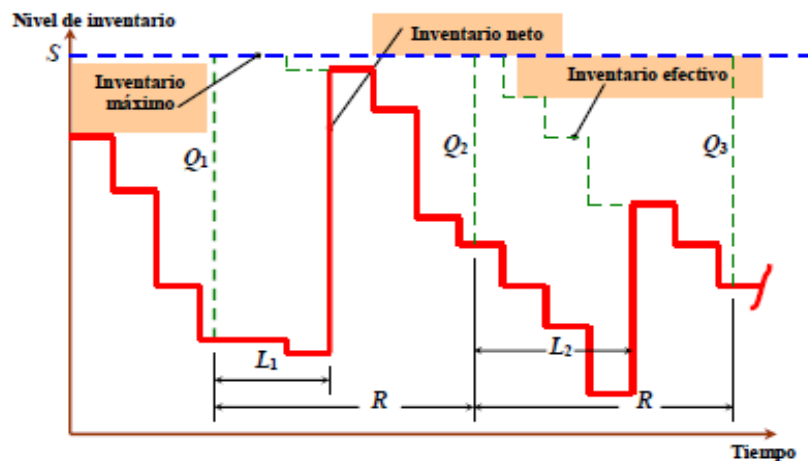
¹³ “Teorías de Inventarios o Stock”. (s.f) Catedra: Producción I. Cap.9.

monitorear los niveles de inventario y determinar las cantidades que se deben mantener, el momento en que las existencias se deben reponer y el tamaño que deben tener los pedidos. Es decir, especificar: ¿Qué debe ordenarse?, ¿Cuándo debe ordenarse? y ¿Cuánto debe ordenarse?

Según Vidal (2005) Para entender estas decisiones de inventario, se examina dos políticas de control de inventarios diferentes, conocidas como de revisión periódica y de revisión continua.

- **Política de revisión periódica:** En el sistema de control periódico (R, S) se revisa el nivel de inventario cada R periodos de tiempo y se ordena una cantidad igual a la diferencia entre un inventario máximo, S , y el inventario efectivo en el momento de la revisión. El sistema periódico facilita la coordinación del control de varios ítems, aunque genera inventarios de seguridad ligeramente superiores al sistema continuo, ya que el primero debe responder a las fluctuaciones de demanda durante el tiempo de reposición de los proveedores o del sistema de producción, L , más el tiempo entre revisiones, R , mientras que para el sistema continuo los inventarios de seguridad deben responder sólo sobre el tiempo de reposición L .

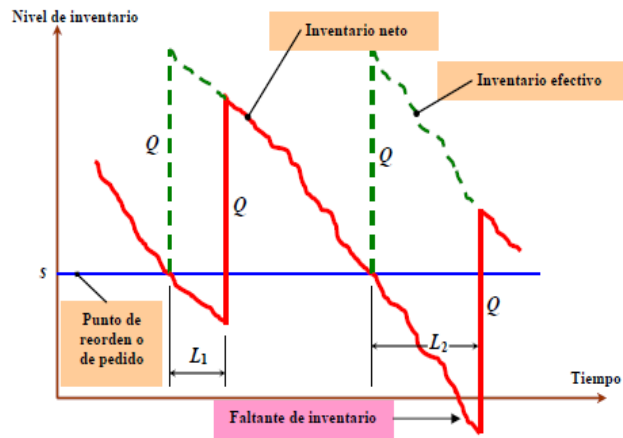
Ilustración 5.1. Política de revisión periódica.



Fuente. Recuperado de Vidal (2005)

- **Política de revisión continua.** sistema de control continuo (s, Q). En este sistema, cada vez que el inventario efectivo es igual o menor al punto de reorden s , se ordena una cantidad fija Q . Se denomina también el —sistema de los dos cajones (two-bins system).

Ilustración 5.2. Política de revisión continua.



Fuente. Recuperado de Vidal (2005)

Inventario de seguridad $IS = K\sigma_L$ [Sistema Continuo (s, Q)]

Inventario de seguridad $IS = K\sigma_{R+L}$ [Sistema Continuo (R, S)]

Donde:

k = Factor de seguridad dependiente del nivel de servicio deseado.

σ_L = Desviación estándar de los errores de pronóstico de la demanda total sobre un período de duración L , o sea sobre el tiempo de reposición.

$k\sigma_{R+L}$ = Desviación estándar de los errores de pronóstico de la demanda total sobre un período de duración $R+L$, o sea sobre el tiempo de reposición + el intervalo de revisión.

Se recomiendan un nivel de inventario alto cuando:

- ✓ Los costos de almacenamiento son bajos.
- ✓ Haya posibilidad de descuento por pedidos grandes.
- ✓ Se espera un crecimiento sustancial de la demanda.
- ✓ Se esperan fuertes subidas de precios.

Nivel de inventario Bajo cuando:

- ✓ Los costos de almacenamiento son altos.
- ✓ La demanda sea estable.
- ✓ Se esperen disminuciones de precios.
- ✓ Los proveedores sean de confianza y no existan dificultades para el reaprovisionamiento.

El inventario administrado por el vendedor (VMI por sus siglas en inglés, *Vendor-Managed Inventory*) es una familia de modelos de negocios en la cual el minorista de cierto producto suministra información sobre ventas e inventarios al proveedor. El proveedor por su parte, controla el inventario y decide la política de reposición de cada minorista.

La información entre ambos agentes de la cadena de suministro generalmente fluye a través de un sistema de intercambio electrónico de datos u otra red electrónica, de manera que está actualizada permanentemente.

Este es uno de los modelos de negocios exitosos implementados por Wal-Mart, Home Depot y algunos otros grandes almacenes a partir de la década de los 80. Algunas compañías petroleras también han implementado este sistema para abastecer las estaciones de servicio.

En este modelo, el proveedor se beneficia por un mayor conocimiento de la demanda y un contacto más directo con sus clientes, mientras que el distribuidor minorista reduce el riesgo y los costos de mantener inventario. (Mora., L. s.f).

Archetti, C., Beratazzi, L., & Speranza, M. (2009) afirma que la ventaja de una política VMI con respecto al minorista tradicional se encuentra en una utilización de recursos más eficiente debido a que el proveedor puede reducir sus inventarios mientras se mantiene el mismo nivel de servicio, o puede aumentar el nivel de servicio y reducir el costo del transporte a través de una utilización más uniforme de la capacidad del mismo. Así los minoristas pueden destinar menos recursos al seguimiento de sus inventarios y pedidos; al mismo tiempo que tienen una garantía de que un desabastecimiento no se producirá.

Archetti et al. (2009) consideran dos estrategias de reposición:

1. The order-up to level (OU)

Cada minorista define un nivel máximo de inventario y puede ser visitado en varias ocasiones durante el horizonte de planeación; o el proveedor supervisa el inventario y garantiza que ningún desabastecimiento ocurra; o cada vez que un minorista es visitado, la cantidad entregada es aquella que alcance el nivel máximo de inventario definido.

2. The maximum level strategy (ML)

En lugar de imponer que cada vez que el minorista es visitado, la cantidad entregada es tal que el nivel máximo de inventario es alcanzado; la única limitación de cantidad de envío es que esta, no deberá ser mayor que el nivel máximo de inventario.

5.5 Depósitos

Los vehículos y los productos a entregar usualmente parten de un solo depósito y se tiene como condición que cada ruta definida comience y finalice en el depósito (Sarmiento, 2014). Sin embargo, las operaciones logísticas, que iniciaron siendo concebidas y planeadas de manera

segmentada, han evolucionado, debido a la dinámica actual de los mercados, a conceptos y estrategias completamente integrales como la *Gestión de Cadenas de Abastecimiento* o *SCM*, por sus siglas en inglés., implicando el diseño de operaciones de redistribución o despacho en múltiples *centros de distribución*, *hubs* o *plataformas de crossdocking*, para la implementación de estrategias de integración de la cadena de abastecimiento(Wasner & Zapfel, 2004).

En los problemas con múltiples depósitos, cada uno podría tener diferentes características, como su ubicación y capacidad máxima de producción. Puede ocurrir, además, que cada depósito tenga una flota de vehículos asignada a priori o que dicha asignación sea parte de lo que se desea determinar. Suele exigirse que cada ruta comience y termine en el mismo depósito, aunque también puede permitirse rutas entre depósitos diferentes. Los depósitos, al igual que los clientes, podrían tener ventanas de tiempo asociadas. En algunos casos debe considerarse el tiempo necesario para cargar o preparar un vehículo antes de que comience su ruta, o el tiempo invertido en su limpieza al regresar. Incluso, por limitaciones de los propios depósitos, puede ser necesario evitar que demasiados vehículos estén operando en un mismo depósito a la vez. (Pérez, J., s, f).

Cuando el vehículo no está obligado a regresar al depósito se tipifica un *Open VRP*, situación que se presenta en la vida real, por ejemplo, cuando el conductor es el mismo propietario del vehículo y el recorrido finaliza en su domicilio.

6. ANÁLISIS DE MODELOS QUE CONSIDERAN LOS FACTORES CRÍTICOS ANALIZADOS

En el capítulo anterior se realizó un diagnóstico con el cual se identificaron los factores críticos y las características propias relacionadas con la problemática de distribución de productos, la presencia de estos factores en problemas de ruteo de vehículos con inventario hace que sean difíciles de resolver por encontrarse en la categoría NP-complejo, con base en las características derivadas de cada problema, los autores proponen modelos para obtener una posible solución del problema adoptando los diferentes métodos de solución que existen para estos, como es el caso de los algoritmos, entre los cuales se encuentran los métodos de solución exactos, los algoritmos de construcción o heurísticas y las metaheurísticas.

A continuación se describen los diferentes modelos de ruteo de inventario encontrados en la literatura, los cuales consideran los factores críticos anteriormente analizados.

Archetti et al. (2011) proponen un modelo donde consideran un problema de ruteo de inventario en tiempo discreto cuando un proveedor tiene que servir a un conjunto de clientes en un horizonte de tiempo. Este modelo incorpora limitaciones en la capacidad del inventario dada para cada cliente y el servicio no puede causar una situación de desabastecimiento, es decir el nivel de inventario de cada cliente no debe ser superior a su nivel máximo y la cantidad total entregada en un momento dado no debe exceder la capacidad del vehículo. Se consideran dos políticas diferentes de abastecimiento, donde la cantidad enviada al cliente depende de la política de reposición. Se dispone además de un solo vehículo con una capacidad dada, donde el costo de transporte es proporcional a la distancia recorrida, mientras que el costo de mantener el inventario es proporcional al nivel del inventario en los clientes con el proveedor. La función objetivo es la minimización de la suma de los costos de inventario y de transporte.

Para dar solución a este problema realizaron una heurística que combina un sistema de búsqueda tabú con un modelo de programación lineal entera mixta. La eficacia de la heurística se prueba sobre un conjunto de casos de referencia para los que se conoce la solución óptima. Obteniendo como resultado que la heurística híbrida denominada HAIR presenta una solución eficaz para este problema en cuanto a las dos políticas estudiadas para las cuales se obtienen un error promedio de 0,08% y 0,05% respectivamente. La heurística híbrida se ha implementado en lenguaje C++. El modelo de asignación de ruta (MIP1) y el modelo de fusión de Ruta (MIP2) se resolvieron con optimalidad utilizando CPLEX.

También Bertazzi et al. (2011), realizan un modelo para un problema de ruteo de inventario en el que un proveedor tiene que cumplir una entrega de un solo producto para una serie de minoristas, con un nivel máximo de inventario definido y una demanda estocástica, la cual tiene que ser satisfecha en un horizonte de tiempo determinado. Se aplica una orden de entrega respecto al nivel determinado por la política para cada minorista, es decir, la cantidad enviada a cada minorista es tal que su nivel de inventario alcanza el nivel máximo cuando se le entrega el pedido.

Para este modelo se encuentran restricciones en el nivel de inventario y el nivel de existencias en los minoristas, también hay otras para garantizar que para cada minorista y para cada instante de tiempo, el nivel de inventario no debe ser mayor que el nivel de inventario máximo, permitiendo una cantidad de desabastecimiento no mayor al nivel máximo de inventario; se encuentran además restricciones de capacidad para garantizar que la cantidad de producto cargado en el vehículo en cualquier momento no exceda la capacidad de transporte. Por último se impone que si las entregas se hacen algunas veces, la ruta recorrida a veces tiene que contener un arco de entrada en cada nodo de la ruta y un arco de salida en cada nodo.

La función objetivo consiste en determinar una estrategia de transporte que minimice el costo total esperado, dado por la suma del inventario total esperado, el costo de penalización a los minoristas por falta de existencias y los costos de ruteo esperados.

Para dar solución a este modelo se propone un algoritmo de despliegue híbrido el cual es evaluado en un gran conjunto de instancias del problema generado al azar. Los resultados computacionales mostraron que este algoritmo es capaz de resolver los casos con un número realista de minoristas en pocos minutos, proporcionando significativamente mejores soluciones que las que se obtienen mediante un algoritmo de referencia. Dado que el algoritmo de despliegue híbrido y el algoritmo de referencia se basan en la solución óptima de la contraparte determinista del problema, también proponen un modelo de programación lineal entera mixta con la implementación de un algoritmo de ramificación y corte para su solución, los resultados numéricos demostraron que este problema es mucho más difícil de resolver que el caso en el que no se permite desabastecimiento. Sin embargo, el enfoque propuesto se comportó satisfactoriamente ya que permitió determinar la solución óptima, dentro de un límite de tiempo de 7000 segundos, en la mayoría de los casos considerados, los resultados obtenidos también sugieren que este enfoque podría ser extendido a estudiar otras variaciones del IRP clásico.

El modelo propuesto por Hiassat & Diabaten (2012) se enfocan en la distribución de un solo producto y de un solo fabricante a un conjunto de minoristas, a través de un conjunto de bodegas ubicadas en varios lugares predeterminados. Los productos son distribuidos por una flota homogénea con vehículos de la misma capacidad. En este modelo, se supone que las situaciones que se encuentran por fuera del grupo de acción nunca se producen. Por otra parte, los productos tienen una vida útil fija, que se mide por el número de períodos de tiempo. La demanda de los minoristas es determinística pero puede variar a través de los períodos de tiempo, de igual forma los costos de mantener inventario varían ligeramente a través del tiempo y el costo de mantener inventario para almacenes se asumió de la misma forma para todos los candidatos y por lo tanto no se tiene en cuenta. El nivel de inventario en las tiendas está

limitado por dos restricciones que conciernen a la capacidad física en las tiendas y la vida útil de los productos, considerándose más relevante la restricción de ítem perecedero.

Definieron como una ruta viable, en la cual un vehículo inicia desde un almacén candidato, visita un número de minoristas, y vuelve a la misma bodega. Como tal, una ruta factible no pasa por más de un almacén, también asumieron que la capacidad del vehículo puede ser más grande que la máxima demanda del cliente en cualquier período de tiempo. Por otra parte, en cualquier período de tiempo, cada vehículo se desplaza a lo sumo en una ruta, y los clientes son visitados como máximo una vez. Para la función objetivo se tuvieron en cuenta tres componentes principales de costos:

- ✓ Costo del almacén en ubicación fija: el costo para establecer y operar un almacén.
- ✓ Costo unitario de almacenamiento del inventario minorista: el costo de los productos de cada tienda.
- ✓ Costo de enrutamiento: el costo asociado con la entrega de la mercancía desde el almacén a los minoristas.

Para ello se formuló un modelo de programación lineal entera mixta y para resolverlo se utilizó el solucionador CPLEXMIP con el lenguaje de modelado GAMS®, obteniendo como resultado un ahorro significativo en comparación con los modelos de optimización de múltiples pasos, logrando demostrar que la introducción de las decisiones de localización - asignación en un solo modelo puede influir positivamente en el cambio de asignación de almacén minorista, la operación de almacenes, y el costo total.

Por otra parte, el modelo propuesto por Bertazzi & Speranza (2012), consideran un solo producto que debe ser distribuido desde un proveedor a un conjunto de cuatro clientes, en vehículos con capacidad homogénea, el tiempo se supone que es discreto. Las decisiones conciernen a determinar los clientes a servir diariamente, la cantidad de entrega y las rutas. En el modelo se asume que no hay ninguna limitación sobre la disponibilidad de producto con el proveedor, tampoco hay limitación en el número de vehículos disponibles. Cada vehículo tiene una capacidad determinada y cada cliente tiene un nivel de inventario limitado, es decir, la cantidad de producto almacenado en el cliente no puede exceder este nivel.

El objetivo es encontrar una política de distribución periódica, es decir, un plan que contribuya a determinar la cantidad a entregar y las rutas recorridas por los vehículos de tal forma que minimice el costo total de transporte. La política debe ser tal que el nivel de inventario máximo establecido por los clientes no supere la capacidad de los vehículos. La periodicidad de la política implica que los niveles de inventario al final del período deben ser igual a los niveles iniciales, por tanto la única restricción que se encuentra es la capacidad de los vehículos y de almacenamiento de los clientes.

Salto & Aceves (2012), proponen en su artículo el modelo matemático básico del IRP, donde dado un conjunto de clientes y un almacén central, se determina cuál es el conjunto de rutas de

distribución, la cantidad de producto a enviar a cada cliente junto con los niveles de inventario que se deben mantener, para cada día o instante de tiempo dentro del horizonte de planificación. Para la formulación del modelo matemático se tomó como base el modelo de tres índices para el Problema de Ruteo de Vehículos donde se considera de que el IRP puede ser visto como un VRP multi-periodo, obteniendo como función objetivo la minimización los costos de ruteo y de inventario y como restricciones la capacidad de los vehículos, asegurar que en cada instante de tiempo un cliente sea visitado máximo una vez, garantizar que en un depósito no salgan más vehículos de los que se tienen disponibles en cada instante de tiempo, asegurar que un cliente que no es visitado en un determinado instante de tiempo, no reciba dinero mientras que el que sí es visitado no reciba un monto superior a su capacidad menos el inventario que ya poseía almacenado y garantizar la continuidad en el flujo de inventario a través del tiempo, el modelo matemático que describe al problema se considera de programación entera mixta.

Para dar solución al problema se aplican los conceptos de la metaheurística búsqueda de la armonía la cual basa su filosofía de optimización en el proceso de aprendizaje utilizado los músicos al desarrollar una nueva melodía musical, comprobando que la simplicidad de sus ideas permite una fácil implementación computacional. Aunque fue diseñada para resolver problemas de optimización continua, en el presente caso se la ha adaptado para resolver de manera conjunta el Problema de Ruteo de Vehículos con Inventarios a través de un procedimiento de dos etapas obteniendo excelentes resultados en lo que se refiere a velocidad de cómputo y calidad de las soluciones.

Por su parte Coelho et al. (2012), presentan una revisión exhaustiva en la literatura del IRP, con base a una nueva clasificación del problema, clasificando el IRP con respecto a sus variantes estructurales y con respecto a la disponibilidad de información sobre la demanda de los clientes. El modelo que mencionan tiene como función objetivo minimizar el costo total de inventario de distribución, mientras se cumple con la demanda de cada cliente, el plan de reposición está sujeta a restricciones como por ejemplo que el nivel de inventario en cada cliente nunca puede exceder su capacidad máxima, los vehículos del proveedor pueden realizar como máximo una ruta por un periodo de tiempo, cada una iniciando y terminando en el depósito y la capacidad de transporte no pueden ser excedida.

La solución al problema determina a qué clientes se va a servir en cada período de tiempo, cuál de los vehículos del proveedor va a ser utilizado, la cantidad a entregar a cada cliente visitado, así como las rutas de entrega. El IRP para este caso es determinístico y estático, porque las tasas de consumo son fijas y conocidos con anterioridad.

Una vez los autores describen el modelo se realiza una revisión de los métodos exactos, heurísticas y metaheurísticas para la solución a este tipo de problemas. Llegando a la conclusión de que con los años, parte de los esfuerzos de investigación se ha desplazado hacia el estudio de las extensiones del modelo básico IRP. Estos incluyen el problema de producción-enrutamiento, el IRP con múltiples productos, el IRP con entregas directas y trasbordo, y el IRP consistente. Por último, varios autores se han alejado de la versión determinista y estática

del IRP y han propuesto modelos y algoritmos capaces de manejar IRP estocásticos y las versiones dinámicas, para lo cual este artículo contribuye a unificar el conjunto de conocimientos sobre el IRP y estimulará a otros investigadores a continuar con el estudio de este campo.

El modelo propuesto por el Aydin (2014) considera la distribución de un solo producto a un conjunto de clientes con el fin de determinar la formación de las rutas, la cantidad de envío y el calendario de reposiciones, para lo cual se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ En cada viaje, el número de los elementos no debe exceder la capacidad del vehículo.
- ✓ El tiempo requerido para el viaje es siempre menor que el período de funcionamiento de los depósitos.
- ✓ Esto significa que, si la hora de funcionamiento de los almacenes y los clientes son entre 09 a.m. y 9 p.m., la duración del viaje, independientemente del número y la ubicación de los clientes se llevará máximo en estas 12 horas.
- ✓ Todos los artículos son homogéneos, la demanda de los clientes es discreta y expresada en valores enteros. Sólo hay un almacén individual, con patrón de demanda estocástica para los clientes, se posee un horizonte corto de planificación que oscila de una a máximo dos semanas y la unidad de tiempo es un día.
- ✓ A partir del horizonte de planificación, los depósitos de todos los clientes están satisfechos. Los vehículos son todos homogéneos y tienen la misma capacidad de carga.

La función objetivo para este modelo es minimizar la suma de los costos de transporte, de pedido pendientes y el costo de mantenimiento de inventarios.

Este modelo pretende aportar un enfoque metaheurístico al problema de ruteo de inventario, a partir de la propuesta de un algoritmo genético, obteniendo buenas soluciones para este problema.

También, Li et al. (2014) realizan un modelo donde consideran un problema que se observa en un grupo empresarial de la industria de petróleo y petroquímica en China. La empresa posee casi 40.000 estaciones de servicio repartidas por todo el país así como también cientos de depósitos de petróleo que se utilizan para reponer la gasolina a las gasolineras. Con base en lo anterior y teniendo en cuenta el número de depósitos y estaciones de servicio involucrados, el diario las operaciones de distribución de gasolina dentro de esta red se torna particularmente complejo. El problema puede ser formulado como un problema de ruteo de inventario con las siguientes características:

- La distribución de gasolina para estaciones de servicio se acciona de forma independiente por cada provincia. Por lo tanto, la red global está dividida en sub-redes. Para cada provincia, podría haber decenas de depósitos de petróleo y miles de estaciones de servicio. La red dentro de cada provincia se divide en diferentes distritos de acuerdo a la política operativa actual de la empresa. Normalmente, cada distrito tiene varios depósitos de aceite y cientos de estaciones de servicio. Esta es la unidad de operación básica para la distribución de la gasolina dentro de la empresa.
- Para cada unidad operativa, los depósitos se reponen regularmente para mantener un adecuado nivel de inventario para evitar la falta de existencias. Una oficina central de planificación determina el tiempo y la cantidad que se entregarán a cada estación de servicio, que tiene una capacidad de almacenamiento limitado con la demanda diaria representado por una tasa de consumo.
- El producto se distribuye por una flota de camiones cisterna, que pertenece a un proveedor logístico de servicios (3PL).
- Cuando un camión llega a una estación de gasolina, la gasolina se entrega a una velocidad de entrega determinada, es decir, la entrega no puede ser instantánea. Una orden para la política de nivel se aplica a cada estación de gas para la reposición de inventarios. Por lo tanto, el nivel de inventario máximo será y debe ser alcanzado una vez que la estación de servicio es visitado por un camión.
- Con el fin de mejorar la utilización de los recursos de transporte, se especifica la cantidad mínima de entrega para cada estación. Posteriormente se especifica la primera vez que una estación debe ser visitada. Además, el centro la programación de la oficina debe garantizar que se especifique la última vez que la estación debe ser visitada dada la tasa de consumo. Estas dos limitaciones plantean naturalmente una ventana de tiempo de entrega para cada estación de servicio.

Cada día, una flota de vehículos sale del depósito de petróleo y visitan las estaciones de servicio siguiendo las rutas designadas por la oficina central de planificación. Al final del día, la flota regresa al depósito o una zona de aparcamiento especificado. Para el IRP, un objetivo es minimizar el costo de transporte total; sin embargo, la consideración de tiempo es también muy importante en este problema, por lo tanto se plantea en la función objetivo reducir al mínimo el tiempo máximo de viaje de ruta entre todos los vehículos debido a dos razones. En primer lugar, los vehículos deben entregar productos a las estaciones de servicio antes de la última visita permitida. Si una estación de gas se queda sin valores, podría no solamente ser visto como un problema de negocios, sino también un problema social por la comunidad local.

En el modelo se considera una red logística en la que se distribuye gasolina desde el depósito de petróleo a un conjunto de estaciones de gasolina cada día utilizando una flota de homogénea vehículos. Cada estación de servicio posee un nivel de inventario inicial y el máximo nivel de inventario se determina por su capacidad del tanque. El problema está formulado con base en los siguientes supuestos:

- ✓ El depósito de aceite se supone que tiene el inventario infinito.
- ✓ Cada estación de servicio tiene una tasa de consumo del producto.
- ✓ Si una estación está visitada en el tiempo, entonces la cantidad de producto entregado es tal que el nivel de inventario será llevado a su valor máximo (capacidad del tanque).
- ✓ La tasa de entrega del vehículo es la cantidad de producto que se puede entregar por horas. Es obvio que la velocidad de administración debe ser mayor que la tasa de consumo para cualquier gasolinera.
- ✓ Una estación sólo debe ser visitada si cumple con la cantidad mínima de entrega. Esto mejora la utilización de los vehículos de reparto y garantiza quedarse sin producto.
- ✓ Cada estación tiene una específica ventana de tiempo de entrega.

Para dar solución a este problema NP-complejo, se propuso un algoritmo de búsqueda tabú y un algoritmo adaptado de EE.UU., con el fin de mejorar la calidad de la solución obtenida con la búsqueda tabú. Para evaluar el desempeño del enfoque propuesto se empleó la técnica de relajación de Lagrange para obtener el límite inferior del problema, los resultados computacionales muestran que la solución del algoritmo de búsqueda tabú está muy cerca de los límites inferiores para los pequeños y medianos problemas, indicando que el algoritmo de búsqueda tabú puede proporcionar la solución óptima cerca de estos problemas y la técnica de relajación de Lagrange ofrece unos límites inferiores estrechos. Los resultados computacionales también demuestran que el algoritmo adaptado de EE.UU. puede mejorar considerablemente el rendimiento de la búsqueda tabú, aunque el límite inferior proporcionado por la técnica de relajación lagrangiana es estrecho, el tiempo de cálculo es relativamente largo. Por lo tanto, se logra reducir la complejidad computacional de la cota inferior sin afectar la calidad.

Una vez identificados y analizados los factores claves que inciden en la distribución de los productos y tras haber realizado una revisión bibliográfica que pudiera contemplar los modelos propuestos por diferentes autores concernientes al problema de ruteo de inventario, fue posible identificar que todos estos tienen en cuenta las características claves de este tipo de problema (demanda, vehículos, capacidad de vehículos, nivel de inventario, entre otros.), pero cada uno

dependiendo de dichas características, abordan diferentes restricciones y función objetivo, así como también diferentes métodos para dar solución a este problema.

En el caso de los autores Li et al. (2014) presentan un modelo de ruteo de inventario adaptado a una empresa petrolera en china, debido a su complejidad se contempla un gran número de restricciones y el método de solución seleccionado es la metaheurística búsqueda tabú, el mismo método es usado por Archetti et al. En el 2011 para dar solución a un problema que presenta restricciones en la capacidad del inventario dada para cada cliente y en el número de vehículos, cuya función objetivo es la minimización de la suma de los costos de inventario y de transporte, siendo esta diferente a la propuesta por Li et al. Dado que ellos consideran de mayor importancia reducir al mínimo el tiempo máximo de viaje de ruta entre todos los vehículos, por encima de los costos, sin embargo cada uno de estos problemas presentan características claves del IRP y el método de solución elegido presenta buenos resultados en ambos casos. Los demás autores estudiados utilizan diferentes métodos de solución y construyen modelos que permitan dar solución a este tipo de problema entre las características estudiadas tienen algunos factores en común como son la demanda estocástica, distribución de un solo producto, flota de vehículos homogénea y capacidad de vehículos limitada.

En síntesis cada uno de los artículos estudiados ofrece un buen acercamiento al problema de ruteo de inventario y su respectiva solución desde diferentes métodos ya sean exactos, heurísticas o metaheurísticas, las características propias de cada problema así como sus restricciones hacen posible que se genere una comparación entre ellos de tal forma que se pueda identificar el modelo que más se adecue a los factores claves de interés para la realización del caso de estudio.

Tabla 6.1. Evaluación de modelos de referencia asociado con métodos de solución.

Autor/ Criterios	Archetti et al. (2011)	Bertazzi et al. (2011)	Hiassat & Diabatén (2012)	Bertazzi & Speranza (2012)	Aydin (2014)	Li et al. (2014)	Cohelo et al. (2012)	Salto & Aceves (2012)
Número de Productos	1	1	1	1	1	1	1	1
Número Clientes	> 1	> 1	> 1	4	> 1	> 1	> 1	> 1
Demanda	Determinística	Estocástica	Determinística	Determinística	Estocástica	Determinística	Determinística	Determinística
Nivel de Inventario	<= Nivel Máximo	<= Nivel Máximo	<= Nivel Máximo	<= Nivel Máximo	<= Nivel Máximo	<= Nivel Máximo	<= Nivel Máximo	<= Nivel Máximo
Cantidad de Vehículos Disponibles	1	1	1	Infinita	> 1	> 1	1	> 1
Flota Homogénea	X	X	X	X	X	X	X	X
Flota Heterogénea								
Capacidad de Vehículos	X	X	X	X	X	X	X	X
Depósitos	1	1	> 1	1	> 1	> 1	1	1
Algoritmo Exacto			X				X	
Algoritmo Heurístico				X				
Algoritmo Metaheurístico	X	X			X	X		X

Fuente. Elaborado por los autores.

Después del análisis de los diferentes autores y modelos que consideran los factores críticos analizados y planteados en este proyecto, se determina que los autores que más se ajustan a las necesidades del problema son Cohelo et al. (2012) y Sabos & Aceves (2012) con un algoritmo exacto y un algoritmo meta heurístico respectivamente, considerando un único producto a distribuir a un conjunto de clientes con una demanda determinística mediante una flota de vehículos con capacidad homogénea desde un depósito.

7. DEFINICIÓN Y FORMULACIÓN DEL MODELO

El IRP en su versión básica consiste en dado un conjunto de clientes y un almacén central desde el cual se los atenderá, determinar cuál es el conjunto de rutas de distribución, la cantidad de producto a enviar a cada cliente, junto con los niveles de inventario que se deben mantener para cada día o instantes de tiempo dentro del horizonte de planificación. A diferencia del problema clásico de ruteo de vehículos, la cantidad a enviar a cada cliente es ahora una variable de decisión por lo cual no necesariamente se debe visitar a todos los clientes todos los días, considerando que sus niveles de inventario deben ser suficientes para cubrir la demanda para los días que no son visitados. (Saltos, 2012).

Para la definición y formulación del modelo matemático se tomó como base el modelo formulado por Archetti et al. (2007) (citado por Cohelo, 2012) y el modelo formulado por Saltos (2012).

El IRP básico se define por un grafo $G = (N, A)$, donde $V = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ es el conjunto de nodos y $A = \{(i, j): i, j \in N, i \neq j\}$ es el arco establecido. $N' = N \setminus \{0\}$ es un subconjunto de N que representa a los clientes, que excluye el depósito. El nodo 0 por su parte representa el depósito. La capacidad de almacenamiento del inventario por cada cliente es C_i . El proveedor y los clientes incurren en un costo de mantenimiento del inventario por unidad por periodo siendo H para el proveedor y h_i para los clientes. $T = \{1, 2, \dots, p\}$, es el conjunto de periodos de tiempo, siendo p la longitud del horizonte de planificación, donde cada periodo de tiempo $t \in T$. El parámetro r^t es la cantidad de producto a disposición por el proveedor en el tiempo t . Las variables I^t y w_i^t , se definen como los niveles de inventario al final del periodo t , para el proveedor y para el cliente i respectivamente. La demanda de cada cliente i para cada periodo de tiempo t es d_i^t y se asume conocida. La cantidad de producto entregado por el proveedor a cada cliente i en cada periodo de tiempo t es q_i^t . La capacidad del vehículo disponible es Q . El costo de transporte asociado al arco $(i, j) \in A$, es CT_{ij} . El modelo trabaja con variables binarias como X_{ij}^t igual al número de veces que el arco (i, j) es atravesado en la ruta por el proveedor en el periodo de tiempo t . y por último, y_i^t , variable binaria igual a uno si y solo si el nodo i es visitado, $i \in N$.

7.1 Supuestos del modelo

A continuación se presentaran los supuestos del modelo:

- Distribución de un único producto, desde un centro de distribución o depósito, a un conjunto de clientes geográficamente dispersos durante un horizonte de planificación determinado.
- La demanda de los clientes es determinística y su nivel de inventario esta limitado por su capacidad física de almacenamiento.

- Se considera una política de inventario OU, es decir que cada que el cliente es visitado, la cantidad entregada es aquella que alcance el nivel máximo de inventario.
- Al inicio del horizonte de planificación se conoce el nivel de inventario actual del proveedor y de todos los clientes.
- Los costos de mantener el inventario son conocidos tanto para el proveedor como los clientes.
- En cada viaje, la cantidad a entregar no debe exceder la capacidad del vehículo y los clientes son visitados como máximo una vez.
- Los costos de transporte o distribución se consideran simétricos.
- Los costos de mantenimiento del inventario del proveedor y los clientes no varían en el tiempo, al igual que los costos de transporte.

Para función objetivo se tienen en cuenta dos componentes principales de costos:

- Costo asociado con la entrega de la mercancía desde el depósito a los clientes.
- Costo unitario de almacenamiento de inventario tanto para el proveedor como los clientes.

7.2 Definición de conjuntos principales y subconjuntos

CONJUNTOS PRINCIPALES

N = Conjunto de nodos indexado por i, j . Donde el nodo $i = 0$, representa el depósito.

T = Conjunto de periodos de tiempo indexado por t .

SUB-CONJUNTOS

N' = Subconjunto de nodos que representan los clientes indexado por i . $N' \subseteq N$.

7.3 Definición de parámetros

I_{prov} = Inventario inicial del proveedor.

I_{clien} = Inventario inicial del cliente i .

C_i = Capacidad de almacenamiento del inventario de cada cliente i . Donde $i \in N'$.

h_i = Costo de mantener el inventario unitario para cada cliente i . Donde $i \in N'$.

H = Costo de mantener el inventario unitario para el proveedor.

r^t = Cantidad de producto suministrado al proveedor en el periodo t . Donde $t \in T$.

d_i^t = Demanda de cada cliente i en el periodo t . Donde $i \in N'$ y $t \in T$.

Q = Capacidad disponible del vehículo.

CT_{ij} = Costo de transporte del arco (i,j) . Donde $i, j \in N$.

N_{integer} = Numero de nodos. Donde $N_{\text{integer}} > 2$.

7.4 Definición de variables de decisión

I^t = Nivel de inventario del proveedor al final del periodo t . Donde $t \in T$.

w_i^t = Nivel de inventario del cliente i al final del periodo t . Donde $i \in N'$ y $t \in T$.

q_i^t = Cantidad de producto a enviar desde el proveedor a cada cliente i en el periodo t . Donde $i \in N'$ y $t \in T$.

U_i^{kt} = Variable dada por las iteraciones de N_{integer} .

X_{ij}^t = Binaria: Número de veces que el arco (i,j) es atravesado en la ruta por el proveedor en el periodo t . Donde $i, j \in N$, $i \neq j$ y $t \in T$.

y_i^t = Binaria: “1” si el nodo i es visitado en el periodo t ; “0” de lo contrario. Donde $i \in N$ y $t \in T$.

7.4 Modelo matemático considerando un solo vehículo

El objetivo del problema es minimizar el costo total de inventario y de distribución, mientras se cumple con la demanda de cada cliente:

Minimizar:

$$\sum_{i \in N'} \sum_{t \in T} h_i w_i^t + \sum_{t \in T} H I^t + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, i \neq j} \sum_{t \in T} CT_{ij} X_{ij}^t \quad (1)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$I^t = I_{prov} + r^t - \sum_{i \in N'} q_i^t \quad \forall t \in T (t = 1) \quad (2)$$

$$I^t = I^{t-1} + r^t - \sum_{i \in N'} q_i^t \quad \forall t \in T (t > 1) \quad (2)$$

$$w_i^t = I_{clien} + q_i^t - d_i^t \quad \forall i \in N', t \in T (t = 1) \quad (3)$$

$$w_i^t = w_i^{t-1} + q_i^t - d_i^t \quad \forall i \in N', t \in T (t > 1) \quad (3)$$

$$q_i^t \leq C_i y_i^t \quad \forall i \in N', t \in T \quad (4)$$

$$q_i^t \leq C_i - w_i^{t-1} \quad \forall i \in N', t \in T \quad (5)$$

$$q_i^t \geq C_i y_i^t - w_i^{t-1} \quad \forall i \in N', t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N'} q_i^t \leq Q \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N'} q_i^t \leq Q y_0^t \quad \forall t \in T \quad (8)$$

$$U_i^t - U_j^t + N_{integer} X_{ij}^t \leq N_{integer} - 1 \quad \forall i, j \in N (i \neq j, i \geq 2, j \geq 2), t \in T \quad (9)$$

$$U_i^t \leq N_{integer} - 1 - (N_{integer} - 2) X_{1i}^t \quad \forall i \in N (i \geq 2), t \in T \quad (10)$$

$$U_i^t \leq 1 + (N_{integer} - 2) X_{i1}^t \quad \forall i \in N (i \geq 2), t \in T \quad (11)$$

$$y_i^t \leq 1 \quad \forall i \in N', t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{j \in N, i \neq j} X_{ij}^t = y_i^t \quad \forall i \in N, t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{j \in N} X_{ij}^t = \sum_{j \in N} X_{ji}^t \quad \forall i \in N, t \in T \quad (14)$$

$$I^t \geq 0 \quad \forall t \in T \quad (15)$$

$$w_i^t \geq 0 \quad \forall i \in N', t \in T \quad (16)$$

$$q_i^t \geq 0 \quad \forall i \in N', t \in T \quad (17)$$

$$X_{ij}^t \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N (i \neq j), t \in T \quad (18)$$

$$y_i^t \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, t \in T \quad (19)$$

El grupo de restricciones (2) define el nivel de inventario del proveedor al final del periodo t como su nivel de inventario al final del periodo anterior, más la cantidad r^t disponible en el periodo t , menos la cantidad total de producto enviado por el proveedor a los clientes en el periodo t . La grupo de restricciones (3) define el nivel de inventario del cliente i al final del periodo t como su nivel de inventario al final del periodo $t-1$, más la cantidad q_i^t entregada por el proveedor en el periodo t , menos la demanda en el periodo t . Las restricciones (4) – (6) definen la cantidad de producto entregado por el proveedor al cliente i en el periodo t ; estas deben asegurar que la cantidad entregada por el proveedor llenará la capacidad de inventario del cliente en caso de ser servido ($y_i^t = 1, i \in N'$). Si el cliente i no es visitado en el periodo t , entonces la restricción (4) significa que la cantidad entregada al cliente sea cero; de lo contrario, si el cliente i es visitado en el periodo t , la restricción (4) limita la cantidad entregada a la capacidad de retención de inventario del cliente, así con la restricción (5) es imposible entregar más producto de los que llenaría esta capacidad. Así la restricción (6), asegura que la cantidad entregada será exactamente la cuota prevista por la restricción (5). La restricción (7) y (8) indican que la capacidad del vehículo no puede ser superada, por lo que la sumatoria de las cantidades de producto entregado por el proveedor a los clientes en el periodo t , debe ser menor o igual a la capacidad disponible del vehículo, en caso de que exista una ruta para realizar en el periodo. La restricción (9) – (11) evitan que se generen sub-rutas en cada instante de tiempo t . El conjunto de restricciones (12) - (14) son las restricciones aseguran que cada nodo sea visitado una sola vez. Finalmente las restricciones (15) y (19) hacen cumplir la integridad y las condiciones de no negatividad en las variables.

7.5 Modelo matemático considerando varios vehículos

Coelho & Laporte (2012) y Adulyasak, Cordeau & Jans (2012), han propuesto una extensión de la formulación del modelo de Archetti et al. (2007) en virtud de las políticas OU y ML para dar solución al modelo considerando varios vehículos. Suponiendo de nuevo que la matriz de costo de transporte es simétrica y la capacidad de los vehículos es homogénea.

Adicional al modelo matemático para un solo vehículo, el modelo considerando varios vehículos utiliza a $K = \{1, 2, \dots, k\}$ como el conjunto de vehículos disponibles, que disponen de una capacidad Q_K . Otras variables cambian como X_{ij}^{kt} igual al número de veces que el arco (i, j) es atravesado en la ruta por el vehículo k en el periodo t . La variable y_i^{kt} igual a uno si y solo si el nodo i es visitado por el vehículo k en el periodo t . La variable q_i^{kt} representa la cantidad de producto a enviar desde el proveedor por el vehículo k en el periodo de tiempo t .

Suponiendo de nuevo que se aplica la política de inventario OU, el problema puede formularse de la siguiente manera:

Minimizar:

$$\sum_{i \in N'} \sum_{t \in T} h_i w_i^t + \sum_{t \in T} H I^t + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, i \neq j} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} C T_{ij} X_{ij}^{kt} \quad (18)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$I^t = I_{prov} + r^t - \sum_{k \in K} \sum_{i \in N'} q_i^{kt} \quad \forall t \in T (t = 1) \quad (19)$$

$$I^t = I^{t-1} + r^t - \sum_{k \in K} \sum_{i \in N'} q_i^{kt} \quad \forall t \in T (t > 1) \quad (19)$$

$$w_i^t = I_{clien} + \sum_{k \in K} q_i^{kt} - d_i^t \quad \forall i \in N', t \in T (t = 1) \quad (20)$$

$$w_i^t = w_i^{t-1} + \sum_{k \in K} q_i^{kt} - d_i^t \quad \forall i \in N', t \in T (t > 1) \quad (20)$$

$$w_i^t \leq C_i \quad \forall i \in N', t \in T \quad (21)$$

$$q_i^{kt} \leq C_i y_i^{kt} \quad \forall i \in N', k \in K, t \in T \quad (22)$$

$$\sum_{k \in K} q_i^{kt} \leq C_i - w_i^{t-1} \quad \forall i \in N', t \in T \quad (23)$$

$$q_i^{kt} \geq C_i y_i^{kt} - w_i^{t-1} \quad \forall i \in N', k \in K, t \in T \quad (24)$$

$$\sum_{i \in N'} q_i^{kt} \leq Q_k y_0^{kt} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (25)$$

$$U_i^{kt} - U_j^{kt} + N_{integer} X_{ij}^{kt} \leq N_{integer} - 1 \quad \forall i, j \in N (i \neq j, i \geq 2, j \geq 2), k \in K, t \in T \quad (26)$$

$$U_i^{kt} \leq N_{integer} - 1 - (N_{integer} - 2) X_{1i}^{kt} \quad \forall i \in N (i \geq 2), k \in K, t \in T \quad (27)$$

$$U_i^{kt} \leq 1 + (N_{integer} - 2) X_{i1}^{kt} \quad \forall i \in N (i \geq 2), k \in K, t \in T \quad (28)$$

$$\sum_{k \in K} y_i^{kt} \leq 1 \quad \forall i \in N', k \in K, t \in T \quad (29)$$

$$\sum_{j \in N, i \neq j} X_{ij}^{kt} = y_i^{kt} \quad \forall i \in N, k \in K, t \in T \quad (30)$$

$$\sum_{j \in N} X_{ij}^{kt} = \sum_{j \in N} X_{ji}^{kt} \quad \forall i \in N, k \in K, t \in T \quad (31)$$

$$I^t \geq 0 \quad \forall t \in T \quad (32)$$

$$w_i^t \geq 0 \quad \forall i \in N', t \in T \quad (33)$$

$$q_i^{kt} \geq 0 \quad \forall i \in N', k \in K, t \in T \quad (34)$$

$$X_{ij}^{kt} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N (i \neq j), k \in K, t \in T \quad (35)$$

$$y_i^{kt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, k \in K, t \in T \quad (36)$$

El grupo de restricciones (19) define el nivel de inventario para el proveedor al final del periodo t . El grupo de restricciones (20) es similar a la anterior, solo que esta concierne a los clientes. La restricción (21) impone el nivel de inventario máximo a los clientes. Las restricciones (22) – (24) definen las cantidades entregadas a los clientes. La restricción (25) garantiza que la cantidad entregada por el vehículo k no exceda la capacidad del mismo. La restricción (26)- (28) evita que se generen sub-rutas en cada instante de tiempo t . La restricción (29) garantiza que el cliente i sea visitado máximo una vez. La restricción (30) y (31) son las restricciones de grado de los nodos de la red. Finalmente las restricciones (32) y (36) hacen cumplir la integridad y las condiciones de no negatividad en las variables.

8. CASO DE ESTUDIO

Una vez abordadas las diferentes investigaciones y conceptos que giran en torno al proyecto; en este capítulo se pretende validar el modelo propuesto, mediante un caso de estudio que se adapte a las características del problema.

Para efectos de validación del modelo de optimización del IRP, se tomaron los datos necesarios asociados a una microempresa comercializadora y distribuidora de productos tipo snacks de la región.

A continuación se describe el sistema logístico de distribución actual de la empresa objeto de estudio, perteneciente al sector de snacks de la región y la información relevante para realizar la validación del modelo correspondiente.

8.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

La empresa distribuidora de productos tipo snacks se encuentra ubicada en el municipio de Zarzal Valle del Cauca. La empresa cuenta con flota de vehículos propia que consta de dos motocicletas con furgón cuya capacidad volumétrica es de 0.6 m^3 cada una.

La empresa distribuye producto no solo al municipio de Zarzal sino también a 8 municipios y veredas aledañas. Las entregas se realizan durante la jornada de la mañana que comprende desde las 8:00 am a 12:00 pm, y también en la tarde de 2:00 pm a 5:00 pm. 6 días a la semana (lunes a sábado), al terminar las entregas, los vehículos regresan al depósito y realizan alistamiento del producto para la ruta siguiente. Las motocicletas visitan juntos cada municipio, una vez a la semana.

Para efectos del caso de estudio, se tendrá en cuenta solo la distribución de producto al municipio de Zarzal por ser el municipio con mayor demanda y con mayor facilidad de acceso a los clientes; considerando un horizonte de tiempo de un mes cuyos periodos de tiempo son semanales.

8.1.1 Caracterización del modelo de distribución actual en Zarzal Valle

La empresa distribuye una serie de productos tipo snacks que consta de 6 ítems y que son cargados en el vehículo de acuerdo a la demanda que se ha generado regularmente en cada punto de venta o cliente (Ver tabla 8.1). Estos son distribuidos por paquetes de 12 unidades, cuyo volumen es de $0,0352 \text{ m}^3$ por paquete.

En el municipio de Zarzal se cuenta actualmente con 8 clientes que son visitados exactamente una vez a la semana cada uno, es decir, que todos los clientes son visitados en la ruta. Las características de los pedidos de los clientes se componen de varios ítems que son entregados por paquete. El proveedor conoce la demanda del cliente solo cuando este es visitado, por lo que existe la posibilidad de que el proveedor no pueda cubrirla o que sea visitado sin generar demanda alguna.

Tabla 8.1. Portafolios de productos.

ÍTEM	Número de paquetes demandados en el día crítico
A	5
B	6
C	7
D	3
E	5
F	7
Total	33

Fuente. Elaboración propia

Básicamente el proceso de distribución de la empresa se realiza desde la bodega principal hacia los diferentes puntos de venta o clientes dispersos geográficamente en el municipio de Zarzal. La asignación de los clientes a las motocicletas se realiza de acuerdo a la cercanía entre los clientes, es decir, que cada motocicleta tiene un conjunto de clientes asignados a visitar siempre cada semana; esta asignación se puede observar en la Tabla 8.2. El alistamiento del producto en los furgones se realiza minutos antes de iniciar la ruta, y el recorrido de la ruta se realiza siempre igual. Al terminar las entregas, los vehículos regresan al depósito y realizan alistamiento del producto para la ruta siguiente.

Tabla 8.2. Asignación de clientes a vehículos

Vehículo	Clientes a visitar:			
1	1	2	3	4
2	5	6	7	8

Fuente. Elaboración propia.

Las rutas que realizan los vehículos se pueden observar en la Ilustración 8.1. La ruta que realiza el vehículo 1 tiene un costo de distribución total (teniendo en cuenta costo de transporte y de mantenimiento) de 2.157,6 COP, y el costo de distribución total de la ruta del vehículo 2, es de 2.173,2 COP; para un total de 4.338,8 COP por día.

Ilustración 8.1. Rutas realizadas por los vehículos



Fuente. Elaboración Propia

8.1.2 Debilidades del sistema de distribución actual:

- La demanda de los clientes no se conoce con anticipación, por lo que todos deben ser visitados en la ruta. Por consiguiente existe la posibilidad de que el proveedor haya visitado al cliente sin ser necesario.
- Debido a que no se cuenta con la información de demanda, los furgones son cargados teniendo en cuenta la demanda que regularmente se genera, por lo que se puede originar que no se cuente con el ítem demandado por la tienda en el momento de este ser visitado; por agotamiento en visitas anteriores.
- La asignación de clientes y de ruta para las motocicletas con furgón se realizan de manera empírica de acuerdo a la cercanía entre los clientes.
- Al no conocer la demanda con anticipación, el depósito incurre con un costo de mantener inventario innecesario en algunas ocasiones.

8.2. INFORMACIÓN RELEVANTE PARA LA VALIDACIÓN DEL MODELO

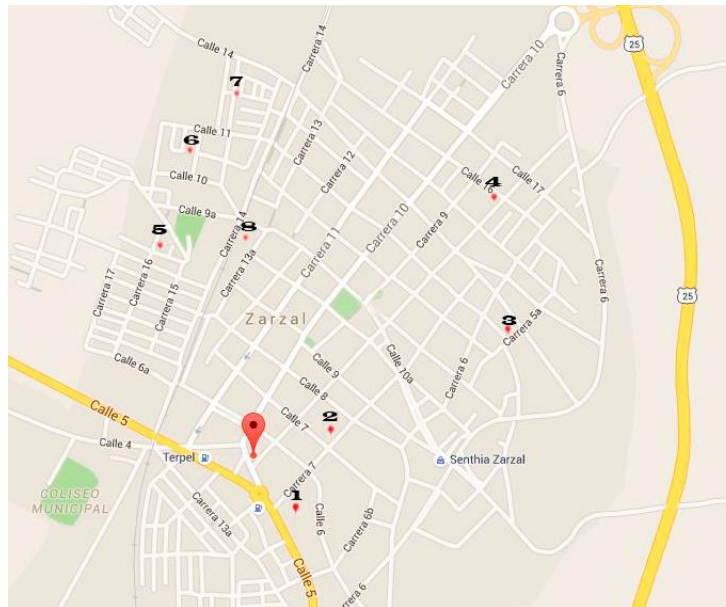
Para la validación del modelo IRP, basado en los objetivos definidos y las características propias del caso de estudios expuesto anteriormente, se toma como referencia el modelo matemático considerando varios vehículos expuesto anteriormente en el apartado 7.5.

Para la validación del modelo IRP, es de suma importancia disponer de una serie de información relacionada con el cliente, como su ubicación geográfica, demanda, capacidad máxima y el costo de mantener inventario del producto. Por otro lado, la información referente al depósito como su ubicación, cantidad de vehículos disponibles con su respectiva capacidad, costo de mantener inventario, y costo de transportar la mercancía a cada uno de los clientes, la cual se expone a continuación.

8.2.1. Ubicación geográfica del depósito y los clientes

Se cuenta con 8 clientes geográficamente dispersos como se muestra en la Ilustración 8.1, donde el punto grande pertenece al centro de distribución y los demás puntos rojos pertenecen a los clientes.

Ilustración 8.2. Mapeo de clientes.



Fuente. Google Maps ®

8.2.2. Demanda en cada punto de venta

Actualmente la distribución se realiza una vez a la semana visitando todos los clientes durante la ruta; por lo cual para la ejecución del modelo se considera un horizonte de planificación de 4 semanas. La demanda es determinística y se puede observar en la Tabla 8.3.

Tabla 8.3. Cantidad de producto demandado durante el horizonte de planificación, ejemplo con 5 clientes.

CLIENTE	DEMANDA			
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
1	3	4	2	2
2	5	6	6	5
3	6	3	5	3
4	0	2	2	1
5	4	0	4	2
6	5	5	4	3
7	5	4	6	6
8	3	4	4	3

Fuente. Elaboración propia.

8.2.3. Capacidad máxima de inventario

La capacidad máxima de almacenar inventario en los clientes no es conocida, por lo que se asume que esta es igual a la máxima demanda que el cliente ha tenido según datos históricos. Ver Tabla 8.4.

Tabla 8.4. Capacidad máxima de inventario de cada cliente

CLIENTE	Nivel máximo de inventario
1	4
2	6
3	6
4	2
5	4
6	5
7	6
8	4

Fuente. Elaboración propia.

8.2.4. Costo de mantener inventario para el proveedor y los clientes

El costo de mantener inventario para el proveedor fue proporcionado por la empresa y es de 3.175,2 COP. Para adquirir la información del costo de mantener el inventario de los clientes, se visitaron cada uno de ellos y solo 3 la conocían y la suministraron. Para los otros 5 clientes, se utilizó la tabla de componentes del costo de mantenimiento del inventario encontrada en Vidal (2010) (Ver Tabla 8.5). El costo de mantener el inventario se puede observar en la Tabla 8.6.

Tabla 8.5. Componentes del costo de mantenimiento del inventario

Componente de la tasa de costo de mantenimiento del inventario r	Rango de valores (% anual)	Ejemplo (% anual)	Porcentaje del total en el ejemplo (%)
Interés y costos de oportunidad	4.0-40.0%	30.0	83.33
Obsolescencia y depreciación	0.5-2.0	2.0	5.56
Almacenamiento y manejo	0.0-4.0	2.0	5.56
Impuestos	0.5-2.0	1.0	2.78
Seguros	0.0-2.0	1.0	2.77
TOTAL	5.0-50.0%	36.0	100.00

Fuente. Vidal (2010).

Tabla 8.6. Costo de mantener inventario para cada cliente, ejemplo con 5 clientes.

Cliente	Costo Inventario
1	484,8
2	582,9
3	556
4	484,8
5	581,2
6	484,8
7	582,1
8	484,8

Fuente. Elaboración propia

8.2.5. Cantidad de vehículos disponibles y capacidad de los mismos

La empresa cuenta con una flota de vehículos propia para la distribución del producto en el municipio de zarzal Valle de 2 motocicletas con furgón cuya capacidad es de 0,6 m³ cada una, para un total de 1,2 m³ disponibles.

8.2.6. Costo de transporte entre nodos

Para conocer el costo de transporte entre nodos es necesario conocer la distancia exacta entre cada uno de los nodos representada en Km, el costo de distribución por Km y el factor de corrección por la distancia por carretera.

Para hallar la distancia en Km entre cada uno de los nodos es necesario el uso de las herramientas Google Maps® y UTM®.

Google Maps® es un servidor de aplicaciones de mapas en la web que pertenece a Google®. Proporciona imágenes de mapas desplazables, así como fotografías por satélite del mundo e incluso la ruta entre diferentes ubicaciones o imágenes a pie de calle (Descripción general de Google Maps®, 2015).

Las coordenadas de Google Maps® están en el sistema WGS84 y se mostrará la latitud y la longitud, positiva para Norte y Este, negativa para Sur y Oeste. Una vez que se ha localizado el lugar de interés, se pueden obtener las coordenadas.

Una vez obtenidas las coordenadas geodésicas de los nodos mediante Google Maps®, se utilizó la herramienta UTM®, la cual convierte las coordenadas geodésicas en coordenadas cartesianas y viceversa, se basa en las ecuaciones de transformación deducidas para el desarrollo transversal cilíndrico terrestre de las proyecciones de Mercator (Es un tipo de proyección cilíndrica que mantiene paralelos el eje terrestre y el eje del cilindro, permite representar toda la superficie terrestre con una deformación mínima), tomando como referencia un elipsoide de revolución y dividiendo la Tierra en 60 husos iguales de 6 grados cada uno (Nuñez, 2012).

Obtenidas las coordenadas cartesianas (x,y), y mediante el uso de la fórmula de distancia euclídeana (Ver Ilustración 8.3) se hallan las distancias en Km entre cada nodo pero considerando distancia lineal; por lo que estas, deben ser multiplicadas por un factor de corrección por carretera con el fin de obtener distancias reales por carretera. Dicho factor de correlación es de 1,57. Los datos correspondientes a la matriz de distancias entre el depósito y los clientes, y las coordenadas cartesianas de los anteriores se pueden observar en el Anexo 1. (Las distancias están dadas en Km y las coordenadas en metros).

Ilustración 8.3. Fórmula de distancia

$$\sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2}$$

Fuente. Faires., J, & Franza, J. (2001)

El costo de distribución por Km es la suma del costo de transporte por kilómetro más el costo de mantenimiento del vehículo por kilómetro. Estos datos fueron proporcionados por la empresa y se pueden observar en la Tabla 8.7.

Tabla 8.7. Costo de distribución por Km

COSTO	COP
Transporte por Km	368,7862
Mantenimiento por Km	261,401
TOTAL Costo de distribución por Km	630,1872

Fuente. Elaboración propia

Así, el costo de distribución de ir de un nodo a otro, es la multiplicación de la distancia entre ellos expresada en Km y el costo de distribución por Km. La matriz del costo de distribución entre nodos, se puede observar en el [Anexo 1](#).

8.3. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez se conocen todos los datos necesarios para la aplicación del IRP al caso de estudio, se procede a la construcción de rutas mediante el uso del lenguaje de programación AMPL® (A Mathematical Programming Language), utilizando el servidor NEOS SERVER® con el fin de evaluar los resultados y resaltar las oportunidades de mejora en el sistema actual de distribución de la empresa en caso de la aplicación del IRP.

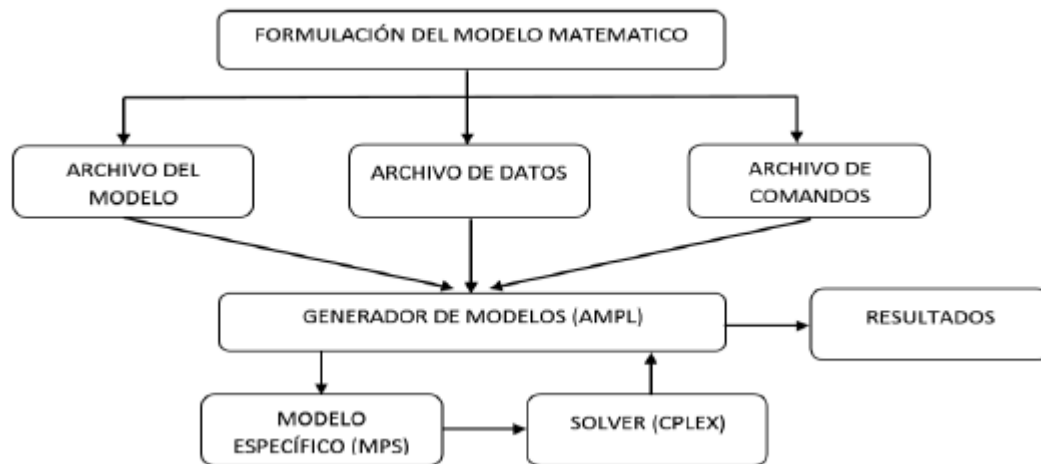
AMPL® es un lenguaje de modelación para programación matemática que posee la capacidad de formular en notación algebraica problemas de optimización, ya sean de programación lineal y no lineal, empleando variables enteras o continuas, haciendo más sencillo la comunicación entre la programación y el ordenador. Para desarrollar los modelos, este lenguaje puede utilizar algún paquete de optimización o solver, tales como, CPLEX®, MINOS®, u OSL® (Fourer, et al. 2012 citado por Perea & Dominguez 2015).

El proceso de planteamiento y solución de un modelo matemático desarrollado en el lenguaje AMPL se presenta en la Ilustración 8.3, en donde se escribe en tres archivos (Bloc de notas), teniendo en cuenta que el tercer archivo sólo denota la forma como debe organizarse las soluciones, el archivo del **modelo**, el de **datos** y el de **comandos**, se remiten a un generador de modelos, que procesa los archivos convirtiéndolos en un programa maestro para luego ser resueltos mediante el software de optimización GUROBI®, que remite los resultados al generador de modelos para que sean entregados al usuario.

NEOS SERVER®, es una plataforma de uso libre que ofrece el generador de modelos. Esta plataforma posee variados solvers que se utilizan de acuerdo con especificaciones del modelo, los solvers implementados por el NEOS® utilizan para la solución de problemas el lenguaje AMPL® y trabajan sobre los paquetes de optimización como GUROBI®, CPLEX® y

MINOS®, utilizando métodos como el Branch and Bound (B&B). Además resuelven problemas de optimización de programación lineal y no lineal, al igual que de programación lineal entera mixta. (Perea & Dominguez, 2015).

Ilustración 8.4. Proceso de planteamiento y solución en lenguaje AMPL®.



Fuente. Vidal (2011).

Para la validación del modelo IRP, basado en los objetivos definidos y las características propias del caso de estudio, se toma como referencia el modelo matemático considerando varios vehículos expuesto anteriormente en el apartado 7.5. Inicialmente se realiza el archivo “Modelo”, donde la función objetivo **minimize costo_total** busca minimizar el costo total de inventario y de distribución, mientras se cumple con la demanda de cada cliente (Ver [Anexo 2](#)). Posteriormente se realizó el archivo de “**datos**” con la información relevante para el problema que puede ser observada en el [Anexo 3](#). Por último se elabora el archivo de “**comandos**”, que se puede observar en el [Anexo 4](#).

El servidor NEOS SERVER® resuelve el modelo utilizando el paquete de optimización GUROBI® obteniendo 776 variables de las cuales, 648 son variables binarias y 128 son variables lineales. Se trabajan 170 restricciones de igualdad, 601 restricciones de desigualdad y una función objetivo lineal con 602 datos diferentes de cero. Se optimiza un modelo con 771 filas, 776 columnas y 3558 datos diferentes de cero. El tiempo de solución es de 0,33s; para una solución heurística encontrada de 27.049 mediante 114 iteraciones. Todos los resultados obtenidos se pueden observar en el [Anexo 5](#).

La secuenciación de rutas para cada vehículo durante las semanas consideradas en el horizonte de planificación se pueden observar en la Iteración 8.5. Se aclara que en la semana 1 no se realiza ruta debido a que primero se debe conocer lo que el cliente vendió el día anterior para saber cuánto debe ser la cantidad a enviar el día siguiente. El porcentaje de utilización de los vehículos disponibles se pueden observar en la siguiente Tabla 8.8.

Tabla 8.8. Tabla de utilización de vehículos disponibles.

	Capacidad		Cantidad a entregar / Paq		
	m3	Paquete	Semana 2	Semana 3	Semana 4
Vehículo 1	0,6	17	17	13	17
Vehículo 2	0,6	17	14	15	16
% Utilización	Vehículo 1		100%	76%	100%
	Vehículo 2		82%	88%	94%

Fuente. Elaboración propia

Según la secuenciación de rutas obtenidas mediante el modelo IRP, el costo total de distribución por semana o ruta a realizar en el municipio de Zarzal Valle es de 3.589,4 COP. Considerando la minimización de costos de transporte y minimización de costos de inventario en cada uno de los clientes.

Al ser la demanda determinística, el proveedor siempre va a tener nivel de inventario cero, por lo que su costo de inventario se minimiza al máximo. En el caso de los clientes su nivel de inventario está ligado a su demanda. Adicional a esto la demanda del punto de venta es satisfecha completamente creando un nivel de servicio y mucho mejor.

En la secuenciación de rutas se puede observar que en la semana 2 y semana 3, alguno de los clientes no es visitado por lo que cabe resaltar que al conocer la demanda con anticipación el proveedor suprime el costo de distribución a dicho cliente, eliminando un costo innecesario en caso de no haberse informado.

Ilustración 8.5. Secuenciación de rutas obtenidas para el horizonte de planificación.



Fuente. Elaboración propia

Ilustración 8.6. Secuenciación de rutas obtenidas para el horizonte de planificación (continuación).



Fuente. Elaboración propia

Comparación actual vs propuesta

En el sistema actual de distribución de la empresa caso de estudio, se realizan rutas y asignación de clientes a los vehículos de manera empírica. Cada semana los clientes asignados a cada uno de los vehículos son visitados por estos en el mismo orden y en su totalidad; ocurriendo el caso de que algún cliente es visitado sin ser necesario dado que su demanda en el momento es cero. Por otro lado ocurre que el proveedor no puede satisfacer la demanda total del cliente por carga inadecuada del producto en el vehículo generada por falta de información, creando una insatisfacción del cliente que en muchas veces se ha visto reflejada según los proveedores en pérdida del mismo.

El modelo propuesto de distribución considera una comunicación constante entre punto de venta y el proveedor, permite conocer la demanda con anticipación creando una ventaja frente al manejo de inventario tanto en el proveedor como en los clientes. El proveedor por su parte, podrá minimizar su nivel de inventario a cero sin ocasionar faltantes, generando un ahorro de 3.175,2 COP por paquete.

Por otro lado, la Tabla 8.9 compara el costo de distribución de las rutas obtenidas con el modelo propuesto frente a las rutas del proceso actual que presenta la empresa. Teniendo la alternativa propuesta una reducción en el costo distribución del 17%.

Tabla 8.9. Comparación entre el sistema de distribución actual y la alternativa propuesta

Sistema de distribución	Costo total de distribución (COP)
Actual	4.330,80
Propuesto	3.589,40
Diferencia	741,40
Variación	17%

Fuente. Elaboración propia.

9. CONCLUSIONES

Para el desarrollo de un modelo IRP, es necesario contemplar algunos factores relevantes que influyen en el desarrollo del problema como la distribución desde un depósito central de un único producto a un conjunto de clientes geográficamente dispersos. Además de conocer la demanda en cada punto de venta, cantidad de vehículos disponibles con sus respectivas capacidades, ubicación geográfica del depósito y clientes, nivel de inventario en depósito y clientes, costos de inventario y de distribución.

La presencia de estos factores en problemas de ruteo de vehículos con inventario hace que sean difíciles de resolver por encontrarse en la categoría NP- complejo, con base en las características derivadas de cada problema, en la literatura se proponen modelos para obtener una posible solución del problema adoptando los diferentes métodos de solución que existen para estos, como es el caso de los algoritmos, entre los cuales se encuentran los métodos de solución exactos, los algoritmos de construcción o heurísticas y las metaheurísticas.

Se realizó una revisión bibliográfica que pudiera contemplar los modelos propuestos por diferentes autores concernientes al problema de ruteo de inventario, donde se analizaron los factores críticos identificados anteriormente, con el fin de establecer una comparación entre estos y el método de solución aplicado.

Después del análisis de los diferentes autores y modelos que consideran los factores críticos analizados y planteados en este proyecto, se determina que los autores que más se ajustan a las necesidades del problema son Cohelo et al. (2012) y Sabos & Aceves (2012), considerando un único producto a distribuir a un conjunto de clientes con una demanda determinística mediante una flota de vehículos con capacidad homogénea partiendo desde un único depósito.

En el desarrollo de un modelo IRP, se deben considerar algunos supuestos como la distribución de un único producto, desde un centro de distribución o depósito a un conjunto de clientes geográficamente dispersos durante un horizonte de planificación determinado. La demanda de los clientes es determinística y su nivel de inventario está limitado por su capacidad física de almacenamiento. Se considera una política de inventario OU, es decir, que cada que el cliente es visitado y la cantidad entregada es aquella que alcance el nivel máximo de inventario. Al inicio del horizonte de planificación se conoce el nivel de inventario actual del proveedor y de todos los clientes. Los costos de mantener el inventario son conocidos tanto para el proveedor como los clientes. En cada viaje, la cantidad a entregar no debe exceder la capacidad del vehículo y los clientes son visitados como máximo una vez. Para función objetivo se tienen en cuenta dos componentes principales de costos tales como el costo asociado con la entrega de la mercancía desde el depósito a los clientes y costo unitario de almacenamiento de inventario tanto para el proveedor como los clientes.

Para la validación del modelo es necesario considerar un caso de estudio que se adapte a las características del problema IRP, en caso del presente trabajo, la empresa caso de estudio es una empresa distribuidora de productos tipo snacks ubicada en el municipio de Zarzal Valle del Cauca. La empresa cuenta con flota de vehículos propia que consta de dos motocicletas con furgón cuya capacidad volumétrica es de 0.6 m^3 cada una. La empresa distribuye producto no solo al municipio de Zarzal sino también a 8 municipios y veredas aledañas, realizando las entregas durante la jornada que comprende desde las 8:00 am a 12:00 pm, y 2:00 pm a 5:00 pm en la jornada de la tarde, durante 6 días a la semana (lunes a sábado). Al terminar las entregas, los vehículos regresan al depósito y realizan el alistamiento del producto para la ruta siguiente. Las motocicletas visitan juntos cada municipio, una vez a la semana. Para efectos del caso de estudio, solo se tuvo en cuenta la distribución de producto al municipio de Zarzal por ser el que posee mayor demanda y facilidad de acceso a los clientes; considerando un horizonte de tiempo de un mes cuyos periodos de tiempo son semanales.

En el municipio de Zarzal se cuenta actualmente con 8 clientes que son visitados exactamente una vez a la semana cada uno, es decir, que todos los clientes son visitados en la ruta. Las características de los pedidos de los clientes se componen de varios ítems que son entregados por paquete de 12 unidades, cuyo volumen es de $0,0352 \text{ m}^3$ por paquete. El proveedor conoce la demanda del cliente solo cuando este es visitado, por lo que existe la posibilidad de que el proveedor no pueda cubrirla o que sea visitado sin generar demanda alguna.

El modelo propuesto de distribución considera una comunicación constante entre el punto de venta y el proveedor, permitiendo conocer la demanda con anticipación creando una ventaja frente al manejo de inventario tanto en el proveedor como en los clientes. El proveedor por su parte, podrá minimizar su nivel de inventario a cero sin ocasionar faltantes, ahorrando 3.175,2 COP por paquete. Por otro lado, el modelo propuesto permite una reducción en el costo distribución del 17% frente al modelo actual de distribución.

Para futuras investigaciones se recomienda a la empresa realizar el modelo IRP para los otros clientes ubicados en las demás zonas de influencia, en las que la empresa realiza su proceso de distribución. De igual forma, para futuras investigaciones se sugiere emplear técnicas metaheurísticas para el desarrollo y análisis de instancias mayores, ya que por ser el modelo IRP un problema NP-Complejo, cuando las instancias son cada vez mayores, los tiempos de solución tienden a ser exponencial por la cantidad de variables binarias que considera el problema.

REFERENCIAS

- Aceves, R. y Elizondo, M. (2008). *Descomposición cruzada separable en la solución del problema de asignación – distribución*. Portal de revistas científicas y arbitradas de la UNAM. 9(1), 77-83.
- Acosta, M., Olivares, E., & Navarro, C. (2012). *La complejidad combinatoria del problema de ruteo vehicular y las heurísticas nodales de la programación lineal*. Quinto Coloquio Interdisciplinario de Doctorado – Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.
- Adulyasak, Y., Cordeau, J., & Jans, R. (2012). *Formulations and branch-and-cut algorithms for multi-vehicle production and inventory routing problems*. Technical Report. G-2012 (14), GERAD, Montreal, Canada.
- Albán, E., Salas, R., & Vargas, L. (2009). *Organización del sistema de suministro y distribución de una empresa de CATERING (Tesis de pregrado)*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- Aquino, J. (2012). *Investigación de operaciones*, México: Editorial Red Tercer Milenio.
- Archetti, C., Bertazzi, L., Laporte, G., & Speranza, M. (2007). *A branch-and-cut algorithm for a vendor-managed inventory-routing problem*. *Transportation Science*, 41(3), 382–391.
- Archetti, C., Beratazzi, L., & Speranza, M. (2009). *Solution methods for the inventory routing problem*. University of Brescia.
- Azi, N., Gendreau, M., & Potvin, J. (2010). *An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles*. *European Journal of Operational Research*, 202(3), 756-763.
- Ballou, R. (1999). *Business Logistics Management*. Fourth Edition, Prentice – Hall, USA.
- Ballou, R. (2004). *Logística de la Administración de la cadena de suministro*. Ed. 5ª.
- Balseiro, S. (2007). *Logística y distribución: Algoritmos para problemas de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad y ventanas de tiempo*. (Tesis de Maestría). Universidad de Buenos Aires, Argentina, pp. 1-5.
- Benavente, M., & Bustos, J. (2005). *Estado del arte en el problema de ruteo de vehículos (VRP)*. Temuco. Ediciones Universidad La Frontera.
- Bertazzi, L., & Speranza, G. (2012) *Inventory Routing Problems: an introduction*. *EURO J Transp Logist*, pp. 307-326.

Bodin, L., & Golden, B. (1981). *Classification in Vehicle-Routing and Scheduling*. Networks, 11(2), 97-108.

Bodin, L., Golden, B., Assad, A., & Ball, M., (1983). *Routing and scheduling of vehicles and crews – the state of the art*. Computers & Operations Research 10.

Bustos, J. (s.f). *Estado del arte en el problema de ruteo de vehículos (VRP)*. Laboratorio de ingeniería aplicada, departamento de ingeniería de sistemas. Universidad de la Frontera.

Campbell, A., Clarke, L., Kleywegt, A., &Salvelsbergh, M. (1997). *The Inventory Routing Problem*. The Logistics Institute School of Industrial and Systems Engineering Georgia Institute of Technology, Atlanta.

Campbell, A., Clarke, L., &Savelsberg, M. (2001). *Inventory routing in practice*. En: Toth, P., & Vigo, D. (eds.). *The vehicle routing problem*. 1a ed. Society for industrial and applied mathematics. pp 309 - 330.

Campbell, A., &Salvelsbergh, M. (2004). *A Decomposition Approach for the Inventory-Routing Problem*. Transportation Science, 38(4), 488-502.

Christofides, N., Mingozzi, A., &Toth, P. (1979). *The Vehicle Routing Problem*. In: *CombinatorialOptimization*. Wiley, Chichester. pp 315-338.

Coelho, L., & Laporte, G. (2012). *The exact solution of several classes of inventory-routing problems*. Computers & Operations Research, Forthcoming.

Conceptos, algoritmo y aplicación de las N- reinas. Capítulo 2. Heurística y Metaheurística. Recuperado de http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtualData/monografias/basic/riojas_ca/cap2.pdf

Cruz, I. (1990). *Fundamentos de Marketing*. Ariel Economía, Barcelona.

Cruz, Y. (Julio, 2010). *El inventario y su importancia dentro de las empresas*.

Dantzig, G., &Ramser, J. (1959). *The truck dispatching problem*. Management Science, 6(1), 80-91.

Desrochers, M., Lenstra, J., & Savelsbergh, M. (1990). *A Classification Scheme for Vehicle-Routing and Scheduling Problems*. European Journal of Operational Research, 46 (3), 322-332.

Diez de Castro, E. (s.f). *Naturaleza de la Distribución*.

Edward, H. F. (2001). *Supply Chain Strategy: The Logistics of Supply Chain Management*. McGraw-Hill Professional.

Estrada, M. (2007). *Análisis de estrategias eficientes en la logística de distribución de paquetería*. Barcelona, 2007. p.7. Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. (2008). N° 45 Septiembre, p. 173

Federgruen, A., & Zipkin, P. (1984). *"A Combined Vehicle Routing and Inventory Allocation Problem*.

Galván, S; Arias, J., & Lamos, H.(2013). *Optimización por simulación basada en Epso para el problema de ruteo de vehículos con demanda estocástica*. Universidad Nacional de Colombia.

Galvis, J., Jaimes, G., & Quiroga, N. (2011). *Estudia cuantitativo de tres aplicaciones del problema de ruteo de vehículos VRP en la Universidad Industrial de Santander*. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

Gestión de Inventarios de Demanda Independiente. (2004): *Diseños de Sistemas Productivos y Logísticos*.

González, G., & González, F. (2006). *Metaheurísticas aplicadas al ruteo de vehículos. Un caso de estudio. Parte 1: formulación del problema*. Ingeniería e Investigación, 26(3), 149 – 156.

González, G., & González, F. (2006), *Metaheurísticas aplicadas al ruteo de vehículos. Parte 1: formulación del problema*, Ingeniería e Investigación Universidad Nacional de Colombia, 26(3), 149-156.

Hillier, F., & Lieberman, G. (2006). *Introducción a la investigación de operaciones*. México, McGraw-Hill.

Jaramillo, J. (2012). *Búsqueda Tabú para el Ruteo de Vehículos*. España y Portugal.

Laporte, G. (1991). *The Vehicle Routing Problem: An over view of exact and approximate algorithms*. European Journal of Operational Research. 59, 345-358

Laporte, G., Reanud, J., & Boctor, F. (1996). *An improved petal heuristic for the vehicle routing problem*, The Journal of the Operational Research Society. 47(2), 329- 336.

Luer, A., Benavente, M., Bustos, J. y Venegas, B. (2009). *El problema de rutas de vehículos: Extensiones y métodos de resolución, estado del arte*. Proceedings of EIG. Departamento de Ingeniería de Sistemas, Universidad de la Frontera, Chile.

Maquera, N., Abensur, D., Parracho, A. (Septiembre, 2007). *Logística inversa y ruteo de vehículos: búsqueda dispersa aplicada al problema de ruteo de vehículos con colecta y entrega simultánea*. Primer Congreso de Logística y Gestión de la Cadena de Suministro, Zaragoza.

Martí, R. (s.f). *Procedimientos heurísticos en optimización combinatoria*, Universidad de Valencia. Facultad de Matemáticas. Pp 9.

Monterroso, E. (2000). *El proceso logístico y la gestión de la cadena de abastecimiento*. Recuperado de www.ope20156/unlu.edu.ar

Monterroso, E., González, Y., & Terán, L. (2010). *Diseño de un modelo para la asignación y ruteo de las bombas estacionarias desde las plantas de concreto de Holcim (Colombia) s.a, zona Bogotá*. Especialización en gerencia en logística integral. Universidad militar Nueva Granada, Bogotá D.C.

Mora, L. (2010). *Gestión logística integral*. Bogotá, 2008. Artículos metalmecánicos para la industria y comercializadoras de autopartes en las ciudades de Pereira y Dosquebradas. Universidad católica popular del Risaralda.

Mora, L. (s.f). Diccionario de logística y SCM. Recuperado de http://www.fesc.edu.co/portal/archivos/e_libros/logistica/dic_logistica.pdf

Moreno, K., Para, C., & Ulabarry, L. (2012). *Diseño y estructuración del modelo de ruteo de transporte para la distribución de productos cárnicos en un canal de distribución tradicional (tienda a tienda)*. Tesis de Pregrado, Ingeniería Industrial. Universidad de San Buenaventura Cali, Santiago de Cali, Colombia.

Naranjo, M. (2006). *Manejo de inventarios en una cadena de supermercados*. (Tesis de magister en gestión de operaciones). Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Núñez, E. (2012). *Calculadora Geodésica Utm<>Geo*. Recuperado de <http://enmaderal.jimdo.com/descargas/calculadora-utm/>

Soporte de Google®. (2015). *Ayuda de Google Maps*. Recuperado de <https://support.google.com/maps/#>

Olivera, A. (2004). *Heurística para problemas de ruteo de vehículos*. Reporte de Investigación, Instituto de Computación – Facultad de Ingeniería, UDELAR, Montevideo. Uruguay, pp. 7.

Papadimitriou, C. (1982). *Combinatorial optimization: algorithms and complexity*. 2da edición de Dover.

Perea, O., & Domínguez, C. (2015). *Propuesta de un modelo de ruteo de vehículos para una empresa distribuidora de alimentos de la región*. (Tesis de pregrado). Universidad del Valle, Zarzal Valle, Colombia.

Redacción Economía. (2015). *Transporte de carga por carretera creció 11,04% en primer trimestre*. El Espectador. Recuperado de <http://www.elespectador.com/noticias/economia/transporte-de-carga-carretera-crecio-1104-primer-trimes-articulo-564552>

- Resa, S. (2012). *Causas y efectos de la rotura de la cadena de suministro: Alternativas para conseguir la máxima eficiencia en el sistema logístico*. Distribución y consumo.
- Rios, R., & González, J. (2000). *Investigación de Operaciones en acción: heurísticas para la solución del TSP*. Ingenierías, 3(9), 15-16.
- Rocha, L., González, E., & Orjuela, J. (2011). *Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución*. En: Ingeniería, 16(2), 35-55.
- Rodriguez, A. (2007). *Integración de un sig con modelos de cálculo y optimización de rutas de vehículos cvrp y software de gestión de flotas*. XI Congreso de Ingeniería de Organización: International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management Madrid.
- Sandoya, F. (2007). *Métodos exactos y heurísticos para resolver el problema del agente viajero (TSP) y el problema de ruteo de vehículos (VRP)*. Pp. 10-14.
- Salto, R. (2014). *Optimización del reabastecimiento de una red de cajeros automáticos con estimación difusa de la demanda*. (Tesis de maestría en ingeniería). Universidad Autónoma de México, México, D. F.
- Sarmiento, A. (2014). *Estudio del problema de ruteo de vehículos con balance de carga: Aplicación de la meta-heurística Búsqueda Tabú*. (Trabajo de grado de Magíster en Gerencia de Operaciones). Chía: Universidad de La Sabana.
- Sipper, D., & Bulfin, R. (1998). *Planeación y control de la producción*. Mc Graw Hill.
- Transporte de carga extra-dimensionada. (2007). CESVI COLOMBIA: "Operación especial, medidas especiales".
- Teorías de Inventarios o Stock . (s.f). Cátedra: Producción I. Cap.9.
- Toth, P., & Vigo, D. (2000). *An Overview of Vehicle Routing Problems, Monographs on Discrete Mathematics and Applications*. In: The Vehicle Routing Problem. SIAM, pp. 1-26.
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem*. Society of Industrial and Applied Mathematics (SIAM) monographs on discrete mathematics and applications, Philadelphia, USA.
- Tucker, H. (s.f). *El verdadero impacto de las roturas de stock en el mundo de Retail*.
- Velázquez, E. (2012). *Canales de distribución y logística*. Red Tercer Milenio.
- Vilana, J. (2011). *La gestión de la cadena de suministro*. Escuela de Organización Industrial. pp 2.
- Villalobos, A. (2007). *Integración de un sig con modelos de cálculo y optimización de rutas de vehículos CVRP y software de gestión de flotas*. XI Congreso de Ingeniería de Organización International. Conference on Industrial Engineering and Industrial Management.

Universidad de los andes; 2001; Septiembre de 2007; Recuperado de <http://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/rev22art19>

Yepes, V. (2002). *Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW*. Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos – Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Zabala, P. (2006). *Problemas de Ruteo de Vehículos*. (Tesis Doctoral). Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires, pp.1.