

Información Importante

La Universidad de La Sabana informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea de la Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad de La Sabana.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento para todos los usos que tengan finalidad académica, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le de crédito al documento y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, La Universidad de La Sabana informa que los derechos sobre los documentos son propiedad de los autores y tienen sobre su obra, entre otros, los derechos morales a que hacen referencia los mencionados artículos.

BIBLIOTECA OCTAVIO ARIZMENDI POSADA
UNIVERSIDAD DE LA SABANA
Chía - Cundinamarca

**MODELO PARA OPTIMIZAR LA DISTRIBUCIÓN
DE FACTURAS DE UNA EMPRESA DE SERVICIOS EN UNA CIUDAD**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para obtener el título de

Magíster en Gerencia de Operaciones
(Modalidad de Profundización)

Yira Caneva Gómez

Asesor de Trabajo de Grado

Christopher Mejía (PhD)

Líder Académico y Asociado Post Doctoral

Fundación LOGYCA / INVESTIGACIÓN

Universidad de la Sabana
Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas
Chía, Colombia
2015

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres y a mis hermanas por ser el motor de mi vida; a Iván por estar junto a mí motivándome e impulsándome; a Christopher Mejía por su aporte a esta investigación y exigencias para lograr un buen resultado; a Lorena Reyes por apoyarme y guiarme en este proceso; a Laura Villarreal por ser un gran apoyo, y en general a todas las personas que aportaron de alguna manera para que lograra culminar esta etapa importante en mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1	8
INTRODUCCIÓN	8
CAPITULO 2	13
MARCO TEÓRICO RELACIONADO CON EL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS.....	13
CAPITULO 3	23
CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA	23
CAPITULO 4	35
PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA DE LA EMPRESA DE SERVICIOS ANALIZADA Y SU SITUACIÓN ACTUAL.....	35
CAPITULO 5	41
METODOLOGÍA Y MODELO DE OPTIMIZACIÓN	41
<i>Notación</i>	47
<i>Conjuntos e índices</i>	47
<i>Variables de decisión</i>	47
<i>Parámetros</i>	47
<i>Modelo</i>	48
CAPITULO 6	50
ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
CAPITULO 7	60
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	60
REFERENCIAS	64
ANEXO 1	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 6-Técnicas de solución al problema de rutas de vehículos.	15
Figura 1-Mapa de Bogotá sectorizado.	24
Figura 2-Policentros de concentración de clientes en la zona norte de Bogotá. .	26
Figura 3-Tiempos de viaje promedio de Motos y automóviles.	30
Figura 4-Problemática vinculada a la DUM.	32
Figura 5-Esquema de la Estructura General de la Logística del transporte urbano de mercancías.	32
Figura 7-Diagrama de flujo de proceso de la distribución de las facturas según clasificación de clientes.	36
Figura 8-Máximo de facturas entregadas por día del mes.	39
Figura 9-Tendencia de la entrega de facturas durante 2014 por mes.	40
Figura 10-Gráfica del análisis de sensibilidad.	52

LISTA DE TABLAS

Tabla 1-Motivos de devolución de facturas por porcentaje de ocurrencia.....	9
Tabla 2-Diferencia entre bienes y servicios.	33
Tabla 3-Clases de VRP con sus principales características y objetivo. Clases de VRP con sus principales características y objetivo.	19
Tabla 4-Casos prácticos VRP aplicado a servicios.....	21
Tabla 5-Distribución de clientes zona norte de Bogotá.....	35
Tabla 6-Histórico de facturas devueltas en la zona norte de Bogotá (años 2012, 2013 y 2014).....	37
Tabla 7-Clientes visitados durante los meses de medición.....	38
Tabla 8-Total de facturas emitidas desde 01 de junio de 2014 a 10 de agosto de 2014 (meses de medición).....	38
Tabla 9-Promedio de velocidad de las motos.....	46
Tabla 10-Descripción de los escenarios planteados para el análisis de sensibilidad	51
Tabla 11-Clientes con ventanas de tiempo estrictas.	51
Tabla 12-Valor de la función objetivo para cada escenario.....	52
Tabla 13-Porcentaje de mejora en el tiempo de ruta.....	53

GLOSARIO

Término	Significado
Factura	Documento que soporta transacciones de venta de bienes y/o servicios que debe ser expedido, aceptado y conservado por el cliente y/o usuario.
Proceso	Conjunto de actividades y recursos que al interrelacionarse transforman elementos de entrada en elementos de salida con un valor agregado para el cliente.
Flujo de Proceso	Gráfica con la descripción del proceso paso a paso.
Red de Transporte	Infraestructura que permite la circulación de vehículos que transportan, personas y productos.
Plataforma de rastreo	Página web que contiene la información histórica obtenida por los sistemas de posicionamiento global.

ACRÓNIMOS

VRP	Problema de Ruteo de Vehículos
DUM	Distribución Urbana de Mercancías
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
SIM	Módulo de Identificación de Abonado
PIB	Producto Interno Bruto
IDU	Instituto de Desarrollo Urbano
POT	Plan de Ordenamiento Territorial
SDM	Secretaría Distrital de Movilidad
CEDI	Centro de Distribución
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
BANREP	Banco de la República
OMU	Observatorio de Movilidad Urbana

RESUMEN

La investigación de operaciones, dentro de sus retos, tiene nuevos campos de experimentación, uno de esos es el sector servicios y el manejo de distribución de mercancías en este sector.

La presente tesis de profundización, permite enmarcar la problemática de una empresa de servicios con las características que presenta una ciudad como Bogotá dentro de un mercado emergente, donde se manifiestan fenómenos como el crecimiento desordenado, desigualdad de ingresos, problemas de movilidad, entre otros, introducidos gracias al uso de dispositivos de posicionamiento global, que permitieron utilizar una velocidad real para las rutas en vez de promedios de fuentes externas.

Se utilizan conceptos que engloban la situación actual de la distribución de facturas en el norte de Bogotá para la empresa bajo estudio, por lo que se construye un modelo de optimización que busca minimizar el tiempo de ruta y el tiempo de servicio utilizado por los mensajeros para efectuar esta distribución; esta reducción de tiempos pretende dar solución a los altos índices de devolución de facturas que están afectando la percepción de calidad del servicio de los clientes hacia la empresa.

Por medio del análisis histórico y la experimentación para obtención de datos, así como el análisis de sensibilidad del modelo propuesto, se busca encontrar los factores que más impactan y producen ineficiencia en la entrega de las facturas, teniendo en cuenta las características del entorno en el cual se desarrolla la empresa.

Este trabajo de profundización, es el primer estudio que se efectúa sobre la operación de la empresa de servicios legales y con esto se pretende realizar un levantamiento de información, que junto con la modelación arroje las mejores opciones de rutas, bajo diversos escenarios planteados, para la distribución de las facturas bajo un entorno determinístico dejando como trabajo futuro aspectos estocásticos.

ABSTRACT

Operations research in their challenges, has new fields of experimentation, one of those is the services sector and management of distribution of goods in this.

This thesis allows to frame the issue of a service company with the features found in a city like Bogota in an emerging market, where phenomena like sprawl, income inequality, mobility problems, manifested among others introduced through the use of global positioning devices, which use real speed allowed for routes rather than average data acquired from external sources.

Concepts that include the current status of the distribution of invoices in the north of Bogota to the company under study are used, so an optimization model that seeks to minimize the travel and service time used by messengers.

This time reduction aims to reduce the high rates of invoices return that are significantly affecting the perception of quality customer service of the company. Through historical analysis and experimentation to obtain data and sensitivity analysis of the proposed model, it seeks to find the factors that impact and cause inefficiency in the delivery of invoices, taking into account the characteristics of the environment in which the company develops.

This research is the first study made on the operation of the service company and this is intended to make a collection of information, together with modeling dispose of most route options, under various scenarios proposed, to the distribution of invoices under a deterministic environment leaving for future work the stochastic aspects.

PALABRAS CLAVE: mercado emergente, problema de ruteo de vehículos, empresa de servicios, distribución de facturas.

KEYWORDS: emerging market, vehicle routing problem, service company, invoice distribution.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

Las empresas de servicios se han caracterizado por la complejidad de sus operaciones al tener productos intangibles conocidos como servicios, lo que conduce a procesos de difícil medición. Esto ha hecho que las investigaciones hayan centrado su atención en sectores como la manufactura, que plantean otro tipo de retos (Heizer & Render, 2007).

Al comparar un bien con un servicio se complica la descripción exacta de un servicio y las operaciones que éste involucra, debido a que no existe una definición consistente, lo que provoca que muchos de los datos y estadísticas que se han publicado acerca del sector servicios sean imprecisos. “La teoría económica se basa principalmente en las actividades de producción de bienes. Por consiguiente, la mayor parte de los datos económicos que se publican se refieren a la producción de bienes” (Heizer & Render, 2007); sin embargo los datos indican que la economía de servicios ha aumentado de tamaño (Dirección de estudios e investigaciones, 2004), por lo que se presenta como un punto de interés para la investigación.

Los servicios, al igual que los productos, representan uno de los pilares fundamentales dentro de la economía de una ciudad (Grupo de estudios económicos y financieros, 2014), especialmente en las ciudades principales donde se concentran las empresas más importantes de un país. En Bogotá, por ejemplo, la participación del sector servicios, de acuerdo con el boletín del Observatorio de Desarrollo Económico del Distrito, indica que “las actividades registraron, para el tercer trimestre de 2013 un crecimiento anual de 6.9%, mientras que en el inicio del año registraron un incremento de 5.9% y 6.6% en el primer y segundo trimestres” (Revista Dinero, 2014).

En el año 2012 el sector servicios tenía una participación de 59% en el PIB de Colombia, es decir, que más del 50% de los ingresos del país provenían de actividades relacionadas con servicios (Cámara de Comercio de Bogotá, 2013). En cuanto a Bogotá, los servicios representan el 70% del PIB, aportando 75.926 millones de dólares en el 2012 al PIB de la ciudad.

Esta creciente importancia del sector servicios en la economía presenta un reto importante centrado en el manejo del cliente. En el caso específico de la empresa de servicios legales para la cual se realiza el estudio, el cierre del ciclo, luego de prestar el servicio es la entrega de la factura¹. Esta entrega depende de características específicas de una ciudad como el tráfico, la malla vial, el vehículo usado para la entrega, entre otros factores, por lo que se vuelve prioritario controlar la forma en la que se lleva a cabo dicha entrega. En este caso la Distribución Urbana de Mercancías (DUM) enmarca todo el proceso existente entre procesos internos de carga y descarga hasta su llegada al cliente (Antun, 2013).

La distribución y entrega de facturas de una empresa no sólo afecta la percepción del nivel de servicio por parte del cliente, sino que una mala gestión, genera re-procesos y sobrecostos que afectan directamente la empresa y el entorno donde se desarrolla. Estos problemas hacen importante optimizar la DUM, como bien resalta Antun (2013): “La importancia de la optimización de la Distribución Urbana de Mercancías radica en el dinamismo económico que supone para la ciudad y el bienestar de sus ciudadanos, ya que sus problemas influyen negativa y directamente en la congestión, contaminación, consumo energético y ocupación del espacio urbano”. Para esta distribución, la empresa de servicios legales cuenta con un equipo de mensajería que se considera, no distribuye de manera eficiente las facturas, debido a que algunas son devueltas por los clientes por diferentes motivos. Los porcentajes de ocurrencia de devoluciones, se muestran en la Tabla 1.

Motivos de devolución por porcentaje de ocurrencia	Porcentaje de ocurrencia
Entrega Tardía	70%
Cambio de razón social	20%
Dirección incompleta	5%

Tabla 1-Motivos de devolución de facturas por porcentaje de ocurrencia.
Fuente: creación propia del autor con base en datos internos del área logística de la empresa (2014)

¹ Documento que soporta la prestación de un servicio (Calvo & Chacon, 2011).

Como se observa en la Tabla 1, la “entrega tardía” es el motivo más frecuente de devolución y se presenta cuando la factura es entregada fuera de las ventanas de tiempo establecidas por los clientes, es decir, la factura se entrega fuera de los periodos de tiempo (las ventanas de tiempo duras) que los clientes definen para la recepción de facturas. La fecha de vencimiento de la factura no tiene influencia en este indicador. La devolución por entrega tardía actualmente representa el 70% de las facturas totales devueltas por mes en la zona norte de Bogotá. Ofrecer una solución a esta situación brinda la posibilidad de mejorar el proceso debido a que hasta el momento la empresa no ha propuesto un plan de acción que reduzca el índice de entregas tardías, no ha establecido medidas de desempeño ni ha realizado un control de tiempos y rutas para analizar de qué forma se puede mejorar la distribución de las facturas.

Por lo anterior, este estudio se orienta a responder un interrogante: ¿en qué medida un modelo matemático para el diseño de rutas permite a la empresa optimizar la distribución de sus facturas en la zona norte de la ciudad de Bogotá?, además se plantea la siguiente pregunta específica: ¿cómo lograr la entrega oportuna de las facturas en la zona norte de Bogotá creando un esquema de rutas óptimas que considere características propias de Bogotá?. Con base en las interrogantes propuestas en esta tesis, se plantean las siguientes hipótesis:

Ho: Una variante del modelo de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo considerando información de velocidad y tiempo real, puede ser resuelto con métodos exactos para la distribución de facturas en el norte de Bogotá logrando disminuir las devoluciones.

H1: Una variante del modelo de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo considerando información de velocidad y tiempo real, puede ser resuelto con métodos de aproximación para la distribución de facturas en el norte de Bogotá logrando disminuir las devoluciones.

Para comprobar o refutar estas hipótesis se presentan los siguientes objetivos:

Objetivo general: Diseñar un modelo de optimización para minimizar el tiempo de viaje de los vehículos de una empresa de servicios legales, que permita la

entrega eficiente de las facturas a sus clientes ubicados en la zona norte de Bogotá.

Para cumplir con este objetivo general, se definieron los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la situación actual de la logística y distribución de las facturas en la zona norte de Bogotá para la empresa prestadora de servicios legales.
- Efectuar la recolección de datos necesarios, en tiempo real, mediante el uso de GPS: sistemas de posicionamiento geográfico para realizar un análisis de estos datos, buscando identificar las principales dificultades en el sistema de distribución de facturas de la empresa bajo estudio.
- Definir un modelo matemático que permita a la empresa optimizar los tiempos de ruta en la distribución de las facturas en la zona norte de Bogotá, considerando factores propios de una ciudad como: tráfico, distancia entre puntos, horario de cierre de los clientes y tiempo de servicio.
- Generar acciones que respondan eficientemente a la operación, a fin de disminuir el indicador de devolución de facturas por entrega tardía por parte de la empresa de servicios legales.

Los objetivos propuestos y acordes con la operación actual de la empresa se alcanzarán mediante el uso de la optimización definiéndola como: el proceso de encontrar la mejor solución posible para un determinado problema. En un problema de optimización existen diferentes soluciones y un criterio para discriminar entre ellas. De forma más precisa, estos problemas se pueden expresar cómo encontrar el valor de variables de decisión para las que una determinada función objetivo alcance su valor máximo o mínimo, con base en una abstracción de la realidad creada a través de un modelo que está sujeto a unas restricciones (Marti, 2003). Principalmente “existe un conjunto de variables de decisión que deben maximizar/minimizar una función objetivo sometida a un conjunto de restricciones” (Ramos, Sanchez, Ferrer, Barquin, & Linares, 2010) por lo tanto se aplicará un modelo de optimización, debido a que es el modelo que presenta varias ventajas, mencionadas por autores como

Ramos et al (2001), quienes destacan que la optimización: organiza los datos y la información disponible sobre el sistema para organizar, estructurar y mejorar la comprensión de éste; permite compartir supuestos y resultados; proporciona un entorno ágil para el análisis de sensibilidad e indica la dirección de mejora en las decisiones.

Las ventajas brindadas por un modelo de optimización estuvieron acordes con el objetivo de esta investigación principalmente porque 1) organiza información: como es el primer análisis de ruteo para la empresa que se realiza, la optimización obliga a que se efectúe un levantamiento de información sin precedente en la empresa que permita la modelación. 2) ayuda a analizar la información recogida y comprenderla para poder identificar los factores influyentes en las rutas de distribución para así, encontrar una estrategia para realizar la entrega de facturas eficientemente. Es importante destacar que la distribución de las facturas se realiza actualmente bajo un sistema conocido y con factores determinados y el modelo se plantea con un único objetivo, minimizar tiempo de ruta, por lo que no era necesario enfocarse en la simulación para poder conocer información del sistema o conocer el entorno donde se realiza la operación. La diferencia entre los modelos evaluados se presenta por (Petit Guasch, Piera, Casanovas, & Figueras, 2003) como:

Modelos de simulación: describen de forma muy precisa el comportamiento a lo largo del tiempo de toda o partes de la red en función de los parámetros más significativos y estrategias de funcionamiento seleccionadas.

Modelo de optimización: permiten determinar el punto de diseño o el punto de funcionamiento óptimo de un sistema.

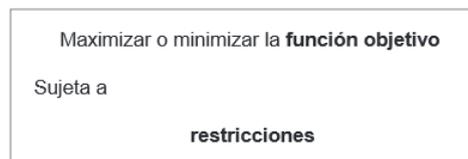
Teniendo claros los conceptos generales que se usarán durante esta investigación, se presentan a continuación 6 capítulos donde se profundizará sobre el concepto de problema de ruteo de vehículos que se aplicará para la construcción del modelo propuesto; se brindará una visión global de la problemática de la empresa de estudio y sus características para efectuar la modelación y finalmente se expondrán los resultados y conclusiones obtenidos con la investigación.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO RELACIONADO CON EL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

Un modelo se define como “una representación idealizada del sistema real estudiado, y puede ser utilizado para predecir el efecto que sobre el sistema tiene posibles cambios en este.” “Los modelos matemáticos representan situaciones del mundo real expresadas mediante ecuaciones. Estas ecuaciones utilizan símbolos para representar todos y cada uno de los componentes del sistema. La solución a estas ecuaciones sirve para predecir estados futuros del sistema, o bien para explicar los cambios que este sistema sufre a través del tiempo”. (Moya, 2003)

Taha, A. Hamdy en su libro expresa: “en general, el primer paso crucial de cualquier modelo es la definición de las alternativas o las variables de decisión del problema. A continuación se usan las variables de decisión para construir la función objetivo y las restricciones del modelo. Terminados los pasos, el modelo de investigación de operaciones se suele organizar con el siguiente formato general:



Una solución del modelo es factible si satisface todas las restricciones y es óptima, si además de ser factible, produce el mejor valor (máximo o mínimo) de la función objetivo” (Taha, 2004) adicional, “la calidad de la solución que se obtenga depende de la exactitud del modelo para representar el sistema real”. Pensando en esta calidad el uso del GPS fue primordial debido a que permitió conocer los tiempos reales de las rutas actuales.

En cuanto al tipo de modelo matemático, luego de la revisión de literatura, se encontró que la implementación del Problema de Ruteo de Vehículos es el más acorde para cumplir con el objetivo de esta investigación. Este problema permite abarcar las condiciones que tiene el proceso objeto de estudio (distribución de facturas) y permite optimizar la distribución, minimizando el

tiempo de viaje de los mensajeros, por lo cual a continuación se detallarán la definición y características del Problema de Ruteo.

El Problema de Ruteo de Vehículos fue descrito por primera vez por Dantzing y Ramser (1959), como una extensión del Problema del Agente Viajero (Travelling Salesman Problem) (Pillac, Gendreau, Guéret, & Medaglia, 2011); consiste en hallar un conjunto de rutas óptimas con una cantidad de vehículos iguales que parten del mismo lugar con el objetivo de que cada cliente o requerimiento sea atendido una vez mientras se minimizan el costo de cada ruta, la distancia total recorrida por todos los vehículos y/o el tiempo de ruta. Las variantes de este problema se plantean con restricciones de capacidad limitada en los vehículos, el número de los mismos, tiempos de entrega, recogida, etc.

En otras palabras, el problema consiste en encontrar las rutas óptimas de vehículos para satisfacer las necesidades de todos los clientes al mínimo costo (en términos de tiempo de tránsito, etc.) sin violar las restricciones con las que cuentan los clientes y el entorno en el que se desplaza el vehículo. (Tan, Lee, Zhu, & Ou, 2001).

Esta definición resume el objetivo de esta investigación por lo que luego de hacer una revisión de diferentes variantes del VRP para analizar cuál podría capturar mejor las características del problema bajo estudio a través de 50 artículos, se encontró que lo más cercano es un problema de VRPTW con tiempos de servicio.

El Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW) es un problema de optimización tipo NP-hard y cuenta con mayores restricciones que las del VRP debido a que incluye horarios específicos de cumplimiento. Este problema tiene variantes como el SVRPTW que incluye tiempos de viaje y de servicio estocásticos, introducido recientemente por (Li, Tian, & Leung, 2010). De acuerdo con este autor, el modelo SVRPTW es más difícil de abordar que el VRP debido a su naturaleza estocástica, lo que produce un efecto sobre la información. Sin embargo debido a que los tiempos de servicio y de viaje pocas veces pueden saberse, el autor recomienda el uso de modelos estocásticos. Para este estudio se analizó un VRPTW determinístico debido a que se

conocían los tiempos de servicio y de viaje, debido a la obtención de esta información real a través del uso de GPS en la ciudad bajo estudio.

Principalmente todas las variantes del Problema de Ruteo con Ventanas de Tiempo tienen el mismo objetivo, minimizar tiempos o costos de ruta, satisfaciendo la demanda de todos los clientes dentro de los horarios establecidos por estos (ventanas de tiempo duras), considerando explícitamente los tiempos de servicio.

Este problema ha sido ampliamente estudiado especialmente por un grupo de investigadores como Laporte, Gendreau, Cordeau, Bektas, Crainic, Desaulniers, Rosseau entre otros reconocidos autores, principalmente por su importante aporte en los métodos de solución heurísticos y exactos, desarrollando nuevas técnicas y estableciendo nuevas variantes del problema que vayan satisfaciendo las restricciones y características que se van incluyendo en los sistemas de operaciones (Lei, Laporte, & Guo, 2011).

Para resolver este tipo de problemas hay varias técnicas de solución que se encuentran documentadas en la literatura y que han buscado la forma más acertada de resolver los problemas de ruteo de vehículos.

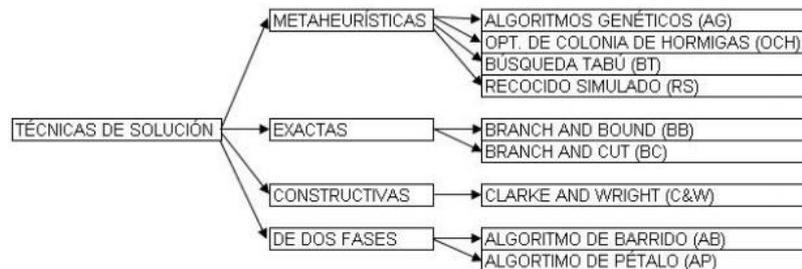


Figura 1-Técnicas de solución al problema de rutas de vehículos. Fuente: (Barajas, 2009)

Las soluciones para problemas de ruteo se pueden dividir en cuatro categorías dentro de las cuales las más usadas son: métodos exactos y heurísticas.

Los **métodos exactos** son eficientes en problemas de un tamaño limitado por temas de restricción computacional y dentro de los cuales están los algoritmos conocidos como búsqueda directa de árbol, programación dinámica, programación lineal y entera (Laporte, 1992).

Las **heurísticas** son métodos que permiten encontrar una solución no óptima

debido a que es una búsqueda en un espacio limitado. Dentro de las heurísticas se tienen algunas reconocidas como el algoritmo de ahorros, algoritmo de ramificación, búsqueda local, mejora de ruta simple. (Medina, La Rota, & Castro, 2011)

Para este trabajo, se formuló un modelo de programación lineal entera mixta que fue resuelto con métodos exactos de solución; estos son “aquellos que parten de la formulación como modelos de programación lineal (enteros o similares), y llegan a una solución factible (entera) gracias a algoritmos de acotamiento del conjunto de soluciones factibles”. (Luer, Benavente, Bustos, & Venegas, 2009). Por lo que los métodos exactos, “intentan descartar familias enteras de posibles soluciones para acelerar la búsqueda y llegar a la conclusión de que la mejor solución encontrada en realidad es la óptima”. (Duran, 2006).

Específicamente dentro del método exacto se implementó un algoritmo de Branch and Bound que “se basa en dos estrategias: dividir (branching) y explorar (bounding). La división se hace con el fin de disminuir el espacio de búsqueda en espacios de menor tamaño para los cuales encontrar la solución sea más fácil. La división se debe hacer sucesivamente hasta que la solución de cada subespacio sea entera. La exploración consiste en determinar soluciones parciales para cada uno de estos subespacios generados por la división del problema y con cada una de estas soluciones el algoritmo puede ir descartando cada uno de estos espacios. El óptimo global es la mejor solución de las encontradas en cada uno de los subespacios”. (Tapias-Isaza, Galeano-Ossa, & Hincapie-Isaza, 2010).

Para tener una perspectiva clara del modelo aplicado y su solución, la Tabla 2 resume los tipos de problema de ruteo revisados que aportan al problema bajo estudio, considerando sus principales características, su objetivo y al menos un autor relevante que lo planteó. Esta tabla no pretende ser exhaustiva, debido a que el objetivo de la investigación es la resolución de un problema específico.

Atributo	Acrónimo	Característica	Objetivo	Autor	Año
Problema del agente viajero	TSP	Visitar varios clientes una sola vez en un solo día regresando al punto de partida.	Minimizar tiempo	Flood	1956
Problema del agente viajero múltiple	m-TSP	Un depósito y múltiples agentes viajeros deben visitar una vez cada cliente y regresar al depósito con un mínimo de clientes visitados. Cada cliente tiene una demanda y cada agente una capacidad.	Generar una ruta para cada agente, para que cada uno visite a un cliente.	Miller, Tucker y Zemlin	1960
Problema de ruteo de vehículos	VRP	Cantidad de vehículos homogéneos, parten del mismo lugar y deben visitar determinados clientes una sola vez.	Hallar rutas óptimas, minimizando costo o tiempo.	Dantzing	1959
Problema de ruteo de vehículos con restricciones de distancia	DVRP	La restricción de capacidad es reemplazada por la restricción de tiempo o máxima longitud.	Reducir el número de visitas y hallar rutas que hagan el menor recorrido en distancia posible.	Laporte	1984
Problema de ruteo de vehículos capacitado	CVRP	Vehículos iguales, salen de un depósito y deben regresar. Deben satisfacer la demanda de unos clientes; visitar una sola vez con un solo vehículo.	Minimizar el costo de la distribución.	Dantzig and Ramsey	1959
Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo	VRPTW	Intervalo de tiempo donde el cliente debe ser atendido. Si el vehículo llega antes del tiempo establecido, debe esperar. Si llega después de tiempo pierde el viaje.	Minimizar costo o tiempo de la ruta cumpliendo viajes dentro de las ventanas de tiempo de los clientes. Incluyen dentro de la función objetivo del modelo tiempos de viaje y tiempos de servicio.	Pullen y Webb	1967
Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo flexibles	VRPSTW	Los tiempos de visita a clientes pueden ser ajustados.	Minimizar costos	Koskosidis, Powell y Solomon-Ferland y Fortin	1992-1989
Problema de ruteo de vehículos con retornos y ventanas de tiempo	VRPBTW	Se requiere recoger y entregar en todos los clientes en tiempos de recorrido específicos para cada uno.	Minimizar costos y garantizar cumplimientos.	Potvin, Duhamel y Guertin	1994

Atributo	Acrónimo	Característica	Objetivo	Autor	Año
Problema de ruteo de vehículos con entregas fraccionadas y ventanas de tiempo	SDVRPTW	La demanda de un cliente se puede dividir entre varios vehículos para cumplir el tiempo establecido por el cliente para el cumplimiento de su solicitud.	Minimizar costos	Frizzel y Giffin-Sierksman y Tijssen	1995-1996
Problema de ruteo de vehículos periódico	PVRP	La planeación de rutas se hace para m días.	Reducir al mínimo la flota de vehículos y la suma de tiempo de viaje necesaria para abastecer a todos los clientes. Este modelo incluye los tiempos de viaje y de servicio para las rutas.	Rusell y Gribbin	1991
Problema de ruteo de vehículos capacitados con distancia máxima de viaje por ruta y costos adicionales por servicio	CVRP	Incluye restricciones de distancia y costos de servicio.	Minimizar costo de ruta aplicando la simulación de Montecarlo.	Juan, Adelantado, Grasman, Faulin y Montoya	2009
Problema de ruteo de vehículos simple y múltiple con restricción de tiempo de servicio	sVRP y mVRP	Problema de ruteo de vehículos con requisitos de tiempo de servicio para la entrega.	Generar de rutas usando aleatoriedad.	Montoya, Alfonso, Gutierrez, Halabi	2009
Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y Tiempos de viaje y de servicio estocásticos	SVRPTW	Incluye en la función objetivo tiempo de viaje y de servicio estocástico.	Minimizar las rutas y tiempos de ruta respetando las ventanas de tiempo.	Li, Tian y Leung	2010
Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, período de descanso del conductor y múltiples instalaciones	VRPTW	Utiliza la logística inversa en la recolección de basura, incluye ventanas de tiempo para cada punto de parada, tiempo de reposo de conductores y tiempo de servicio en su función objetivo.	Minimizar distancia de ruta aplicando la heurística de Búsqueda Tabú.	Benjamin, Beasley	2010
Problema de ruteo de vehículos con capacidad con demanda estocástica y ventanas de tiempo	CVRPSDTW	Crea rutas que empiecen en el <i>depot</i> . Si se excede la capacidad, se interviene la ruta para compensar.	Minimizar tiempos de ruta cubriendo demanda y ventanas de tiempo	Lei, Laporte y Guo	2011

Atributo	Acrónimo	Característica	Objetivo	Autor	Año
Problema de ruteo con tiempos de viaje estocástico incluyendo ventanas de tiempo suaves y costo de servicio.	VRPTW	Incluye en sus parámetros el costo de servicio, utiliza ventanas de tiempo suaves y tiempos de viaje.	Minimizar costo de ruta.	Tas, Deallert, Woensel y Kok	2013
Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y tiempos de viaje estocástico	SVRPTW	Modelo donde se asume que las ventanas de tiempo no se respetan pero garantiza un nivel de servicio determinado para todos los clientes.	Calcular el tiempo de inicio del servicio y distribución de tiempo de llegada a cada cliente manteniendo un nivel específico de servicio.	Ehmke, Campbell, Urban	2015
Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo duras y tiempos de servicio estocásticos	VRPTW-ST	Modelo de probabilidad que considera ventanas de tiempo duras con tiempos de servicio estocásticos. Se trabaja en dos niveles, un ruteo <i>a priori</i> y una modificación de ese plan con información posterior.	Minimizar costo de ruta.	Errico, Desaulniers, Gendreau, Rei, Rousseau	2015

Tabla 2-Clases de VRP con sus principales características y objetivo. Fuente: creación propia del autor con base en (Arenas & Reynoso, 2013), (Lin, 2011), (Cordeau, Gendreau, & Laporte, 2002), (Current & Marsh, 1993), (Daza, Montoya-Torres, & Narducci, 2009), (Figliozzi, 2010), (Golden, S, & Wasil, 2008), (Gonzalez, Delgado, Fraire, Martinez, & Morales, 2010), (Guerrero-Campanur, Perez-Loaiza, & Olivares-Benitez, 2011), (Karagul, 2014), (Kek, Long Cheu, & Meng, 2008), (Koc & Karaoglan, 2011), (De Maghalaes & De Sousa, 2006), (Montemanni, Gambardella, Rizzoli, & Donati, 2004), (Nagarajan & Ravi, 2012), (Perez & Jaramillo, 2013), (Pillac, Gendreau, Guéret, & Medaglia, 2011), (Pino, Lozano, Martínez, & Villanueva, 2011), (Rand, 2009), (Campo, Baldoquin de la Peña, & Escobar, 2012), (Salas, 2012), (Tomala & Villa, 2010), (Tan, Lee, Zhu, & Ou, 2001), (Vidal, Crainic, Gendreau, & Prins, 2014), (Ordoñez, Dessouky, & Wang, 2011), (Li, Tian, & Leung, 2010), (Tas, Dellaert, Woensel, & De Kok, 2013), (Lei, Laporte, & Guo, 2011), (Juan, Adelantado, Grasman, Faulin, & Montoya-Torres, 2009), (Montoya-Torres, Alfonso-Lizarazo, Gutierrez-Franco, & Halabi, 2009), (Benjamin & Beasley, 2010), (Ehmke, Campbell, & Urban, 2015), (Errico, Desaulniers, Gendreau, Rei, & Rousseau, 2015).

En la Tabla 3 , se muestran ejemplos del VRP aplicado a servicios con estudios realizados en diferentes países e industrias con el detalle del objetivo, el modelo aplicado y los resultados obtenidos, que permiten ver los beneficios y mejoras obtenidas por la aplicación del problema de ruteo de vehículos.

Nombre	País	Caracterización del problema	Objetivo	Método de solución	Resultado
Un nuevo acercamiento al ruteo de al servicio de courier de entrega con demanda urgente	Estados Unidos	Problema de ruteo vehicular con múltiples viajes y ventanas de tiempos	Minimizar costos y mejorar la calidad del servicio.	Búsqueda Tabú	Reducción de costos entre el 16% y 17%.
Estudio de un problema de distribución de productos alimenticios permitiendo dividir las entregas	España	Problema de ruteo de vehículos con división en las entregas (SDVRP)	Minimizar los costos de transporte y maximizar el uso de la flotilla.	Método multiarranque: Construcción de una solución inicial factible y mejora a la solución por medio de la Búsqueda Tabú.	Se logra reducción de vehículos utilizados y distancia recorrida.
Diseño de un modelo matemático para el despacho de vehículos de emergencias médicas en Colombia	Colombia	Problema de Ruteo de Vehículo con multidepósito y ventanas de tiempo. (MDVRPTW)	Minimizar los tiempos de respuesta para la atención de llamadas de urgencia.	Programación lineal entera mixta.	Se mejoró el tiempo de respuesta en el 33% de los casos.

Nombre	País	Caracterización del problema	Objetivo	Método de solución	Resultado
Un caso logístico del problema de ruteo vehicular múltiple m-VRP resuelto con la heurística de Fisher & Jaikumar.	México	Problema de ruteo vehicular múltiple	Proponer rutas óptimas para el desarrollo de la actividad. Minimizar costos, mejorar el uso de los vehículos disponibles y lograr la satisfacción de todos los clientes.	Cluster First-Route second. Heurística de asignación generalizada de Fisher & Jaikumar	Se logró un ahorro del 2% al mes y se priorizaron clientes en la asignación de rutas.
Distribución de paquetes pequeños en áreas metropolitanas por medio de servicios de mensajería motorizados.	Taiwán	Red de distribución de Punto a Punto y Red de mensajería Hub-and-spoke con ventanas de tiempo.	Investigar modelos de negocios adaptables a la mensajería de áreas metropolitanas	Modelo matemático simplificado para adaptar demandas del mercado.	Menor inversión en capital al usar motos y mejor calidad efectividad en el servicio. La opción de Hub-and-spoke reduce el tiempo de recorrido entre 50 a 70 min, mientras que con el Punto a Punto el tiempo toma 150min.

Tabla 3-Casos prácticos VRP aplicado a servicios. Fuente: creación propia del autor basado en: (Ordoñez, Dessouky, & Wang, 2011), (Campo, Baldoquin de la Peña, & Escobar, 2012), (Salas, 2012), (Guerrero-Campanur, Perez-Loaiza, & Olivares-Benitez, 2011), (Wang, 2008).

Los resultados de la aplicación de este método de solución para VRP se detallarán en el Capítulo 6.

En el Capítulo 3 se presentará la información que permitirá contextualizar el entorno donde se desarrolla la empresa objeto de estudio, su situación actual y la importancia de ofrecer una solución a la problemática de la empresa para poder entender las variables, restricciones y condiciones aplicadas en el modelo.

CAPITULO 3

CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA

Durante este capítulo se brindará explicación concreta de los conceptos que enmarcan la investigación, definiciones que permitirán contextualizar el entorno en el cuál se desarrolla la toma de datos y la problemática de la empresa prestadora de servicios.

Mercados Emergentes se refiere a economías que comprenden cerca del 85% de la población mundial, su bajo nivel de ingresos per cápita ha hecho que su participación en el PIB² mundial se mantenga alrededor del 20% (Agtmael, 2007). En los últimos años estos mercados se han convertido en protagonistas de la economía, debido a que generan grandes captaciones de capital al ser atractivos a inversiones extranjeras. Además, los Mercados Emergentes representan economías independientes de las grandes potencias, con ciclos diferentes, altos volúmenes de inversión, alta densidad poblacional, crecimiento desordenado y gobiernos inestables. (Campos, Castro, Cuy, & Gonzalo, 2005). De acuerdo con lo anterior este estudio se realiza en el contexto de una ciudad en un mercado emergente que es Colombia. Bogotá es la ciudad en la que se efectúa el estudio, siendo la capital de Colombia y la ciudad con mayor aglomeración poblacional del país, concentrando 7.878.783 personas (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE, 2011) que representan el 16% de la población nacional. Esto como resultado de una tendencia en la dinámica demográfica y migración. Bogotá tiene una densidad poblacional de cerca de 14,755 habitantes por kilómetro cuadrado (Corporación Andina de Fomento CAF, 2011) lo que la convierte en una de las 15 ciudades más densamente pobladas del mundo, estando por encima de otras importantes ciudades latinoamericanas (Citimayors, 2007) como Lima, Caracas, Ciudad de México, Sao Paulo y Santiago” (Galvis, 2013).

Bogotá se divide en 20 zonas políticas y administrativas denominadas localidades. Dentro de las localidades más pobladas de la ciudad se encuentran Suba, Kennedy, Engativá, Ciudad Bolívar y Usaquén, las cuales representan más del 50% de la población total de la ciudad. El área de la

² Producto interno bruto.

ciudad delimitada para la investigación comprende la zona norte de Bogotá. Por esta razón, se presentan a continuación las características principales de esta zona en cuanto a su distribución y malla vial, aspectos fundamentales para un análisis logístico.

1. Zona Centro
2. Zona Oriente
3. Zona Noroccidente
4. Zona Norte
5. Zona Occidente
6. Zona Sur
7. Alrededores de Bogotá



Figura 2-Mapa de Bogotá sectorizado. Fuente: (Paginasamarillas.com, 2014)

Para efectos prácticos se definirá como zona norte las zonas 2, 3 y 4, detalladas en la Figura 2.

Estas zonas están conformadas por las localidades de Usaquén, Suba y Chapinero, segmentación que facilitará la compilación e interpretación de la información.

Las principales vías de acceso de ésta zona son las siguientes:

De sur a norte: Carrera 7, Autopista Norte, Carrera 30 y Avenida Suba. De oriente a occidente: Calle 80, Calle 100, Calle 127 y Calle 170.

Según el último informe del Instituto de Desarrollo Urbano IDU (Instituto de Desarrollo Urbano, 2014): el estado de la malla vial de los principales corredores de Bogotá es preocupante, ya que el 56% de la malla local se encuentra en mal estado, al igual que la malla vial intermedia con un 30% y la malla vial troncal con el 15% en mal estado, siendo este el campo de acción en el que este instituto centra sus esfuerzos para la movilidad en la capital. La zona norte por su lado tiene en promedio el 78% de las vías en buen estado, 10% en un estado regular y 12% en mal estado. (Instituto de Desarrollo Urbano, 2014)

La malla vial troncal corresponde a las vías que soportan el funcionamiento de las vías arteriales, es decir, son las vías secundaria que unen barrios y localidades, cuyo tráfico no corresponde a la gran mayoría del tráfico en la

zona pero que alimentan y ayudan a la descongestión de las vías principales. El estado de estas vías, en comparación con el de las vías principales, no presenta un escenario tan optimista, pues en promedio el 61% de las vías se encuentran en regular o mal estado y sólo el 39% está en buen estado, es decir tan sólo 74 km/carril de 190 km/carril. En ese sentido la distribución desfavorece notablemente el estado de las vías de la localidad de Usaquén donde sólo el 9% de sus vías alternas son transitables de manera adecuada (Instituto de Desarrollo Urbano, 2014).

El estado de la malla vial es uno de los factores analizados para comprender una de las principales características de una ciudad: el congestionamiento; que desde hace algunos años se ha venido incrementando y provocando una disminución en la velocidad promedio en los vehículos de la ciudad. Lo anterior aunado al aumento del parque automotor y la necesidad de crear nuevos sistemas de transporte o renovar los existentes para facilitar la movilidad y distribución urbanas (Alcaldía Mayor de Bogotá y Secretaría Distrital de Movilidad, 2013) han aumentado el congestionamiento urbano.

De acuerdo con la Secretaria de Tránsito y transporte (2006), Bogotá ha ido concentrando importantes actividades en diferentes locaciones fuera del centro de la ciudad buscando distribuir puntos de actividad que mejoren la movilidad y la congestión; permitiendo descentralizar las actividades.

Una ventaja de este fenómeno llamado policentrismo es la reducción de tiempos de viaje. Sin embargo, estos cambios en la infraestructura y ocupación de la ciudad no se han alineado con las mejoras en la malla vial y con los cambios en movilidad, lo que ha causado mayor congestión (Secretaria de Transito y transporte, 2006).

Los policentros de Bogotá presentan características especiales que se deben tener en cuenta a la hora de organizar y diseñar estrategias logísticas para clientes o distribución de mercancías en determinados sectores; por ejemplo, para esta investigación, los puntos de la ciudad más importantes son aquellos donde está ubicada la mayor cantidad de clientes analizados. Para esto se han ubicado las direcciones en Google Maps y se han establecido los centros de

importancia para la distribución de facturas para la empresa como se muestra en la Figura 3.

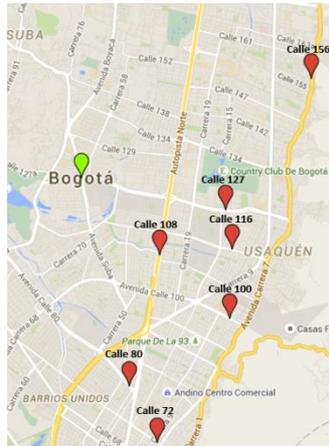


Figura 3-Policentros de concentración de clientes en la zona norte de Bogotá. Fuente: creación propia del autor.

A continuación se especificarán detalles de estas zonas identificadas:

Calle 72: Es considerado uno de los puntos más importantes de la ciudad de Bogotá. Su ubicación central le permite tener una alta concentración de empresas, bancos, restaurantes e importantes centros de estudios.

Entre sus calles principales se encuentra el acceso en la Avenida Caracas con calle 72. La carrera 11, la carrera 9 sentido sur-norte y la carrera 7, una de las principales vías de la ciudad que la atraviesa de norte a sur por el costado oriental. El espacio disponible para nuevos ocupantes es reducido, provocando un problema de espacio de parqueos y gran densidad poblacional.

Calle 80: Es una importante vía que atraviesa la ciudad de Oriente a Occidente, esta vía comienza en el monumento a Los Héroes ubicado en la calle 80 con Autopista Norte y termina en el río Bogotá donde se ubica actualmente el puente de guadua Jenny Garzón que limita la ciudad y da inicio a la Autopista Medellín, vía Cota-Siberia, un punto estratégico de Bogotá, lugar al cual se han trasladado desde hace unos años importantes empresas y fábricas desde productores de colchones hasta agentes de carga. Se caracteriza por su gran volumen de vehículos que transitan durante todo el día debido a que es una de las entradas y salidas más importantes de Bogotá.

Calle 100: Guarda su mayor importancia en la existencia del edificio World Trade Center, construido en los años 80. Esta zona se extiende entre la Carrera 7 y la Avenida Suba donde se transforma en la Avenida 68.

Está constituido por modernos edificios que albergan oficinas de importantes empresas nacionales y multinacionales. Entre sus calles principales se encuentra la Carrera 7; así como la Autopista Norte y la Carrera 11.

Calle 108: Se transforma en un punto central y en crecimiento al ser vía principal del paso vehicular del norte de la ciudad. La zona ha alcanzado un gran desarrollo comercial especialmente por un importante centro empresarial, como lo es Paralelo 108, además de centros de salud y clínicas.

Este punto cuenta con gran congestión vehicular y pocos espacios para estacionamiento, impidiendo el rápido flujo de vehículos y aumentando la necesidad de desplazamientos caminando.

Calle 116: Es una de las principales vías que recorre la ciudad de oriente a occidente desde la carrera séptima hasta la avenida córdoba. Está rodeada de importantes centros empresariales. Las principales vías que atraviesa son la Carrera Séptima, la Carrera Novena que más adelante se transforma en la Avenida NQS y la Carrera 11. Esta zona presenta un tráfico y congestión generalizado además de un problema de espacio para zonas de parqueo y estacionamiento.

Calle 127: Esta importante arteria del norte de Bogotá corta la ciudad de oriente a occidente dándole fluidez sector. Se extiende desde la Carrera 7 hasta la Avenida Suba. Entre las principales vías que cruza se encuentra la Carrera 7, la Avenida Novena, la Carrera 19, la Autopista Norte, la Avenida Boyacá y la Avenida Suba. Es una calle ampliamente dinámica, con un tráfico denso y una composición mixta entre las características comerciales de la zona.

Calle 156: En esta calle se encuentra ubicado un importante centro empresarial conocido como North Point, compuesto por cuatro torres de edificios donde están ubicadas importantes oficinas de empresas petroleras, del sector inmobiliario, entre otros. Esta zona a pesar de ser residencial tiene una ventaja de terrenos sobre los cerros que permite mega construcciones

bordeando la carrera séptima, principal vía de acceso; esta zona tiene mayor espacio de parqueo.

Como se ha mencionado, los centros de actividad que se han generado en la ciudad trajeron consigo un crecimiento en la estructura de urbanización pero ésta no vino acompañada por un desarrollo en la malla vial, por lo cual ha sido deficiente la red de infraestructura urbana (estacionamientos, acceso a transporte, vías principales, áreas libres y espacio público para el tránsito).

Para evitar un crecimiento desordenado como el que se ha presentado en Bogotá y lograr un desarrollo eficiente de las ciudades, son muy importantes la planeación y el diseño urbano que buscan se acomoden todos los puntos importantes de la ciudad de acuerdo con las necesidades de crecimiento que ésta vaya teniendo, evitando congestionamiento e invasión de espacios.

De acuerdo con organizaciones como IDU, CAF y la Universidad Nacional, en Bogotá para el diseño y configuración de la red vial se deben tener en cuenta dos factores principales: la movilidad y la accesibilidad para incrementar la fluidez de la red vial, además de su conectividad y permeabilidad. (Corporación Andina de Fomento; Instituto de Desarrollo Urbano; Universidad Nacional, 2012)

Una de las consecuencias del crecimiento de las ciudades, es la mayor demanda de ciertos bienes tanto de consumo duradero como no duraderos a través de actividades logísticas como el transporte. Dentro de estos bienes, la demanda de vehículos es un elemento que requiere especial atención, pues afecta la situación de movilidad y congestión en la ciudad.

En el caso de automóviles, Bogotá experimentó un crecimiento sustancial en el parque automotor, especialmente a partir del año 2003. Esto posiblemente resultado de las medidas del pico y placa, que limitaron la movilidad de los vehículos particulares y taxis.

“En la capital circulan 1’481.000 vehículos particulares, más de 68.384 taxis, buses, busetas, articulados y biarticulados, y 424.588 motos”—según el Registro Distrital Automotor—. Entre el 2002 y el 2014 el parque automotor se incrementó el 100 por ciento” (El Tiempo, 2015). Tal es el incremento, que en Bogotá hay un carro por cada 6 habitantes. Dado que esto no ha sido consecuente con la

ampliación y construcción de vías para mejorar la movilidad, los problemas de congestión vehicular son cada vez más complejos (Maldonado & Gómez, 2010).

La cantidad de motos circulantes, estimada como la suma de las registradas en la ciudad y el 20% de las registradas en otros municipios del país, convierte a Bogotá en la ciudad de Colombia con más motocicletas. Este fenómeno se explica en gran medida porque la motocicleta permite movilizarse más fácil en medio de los puntos afectados por la congestión y a que el costo de las mismas se ha abaratado, convirtiéndolas en el nuevo *commodity* para la gente de escasos recursos y de negocios crecientes como la mensajería.

Esta cantidad de vehículos ha aumentado la congestión, afectando varios puntos de la movilidad, uno de estos es la velocidad de circulación. Durante los últimos años se ha presentado que la velocidad promedio de los vehículos particulares es la mayor comparada con la del vehículo público. (Galvis, 2013)

El servicio público es deficiente y además ha reducido la velocidad por el exceso de automóviles en las vías. Para motivar el uso del transporte público, más bien su capacidad, infraestructura, accesibilidad, facilidad y cobertura integral se debe mejorar: el nivel de servicio, la forma de pago, la comunicación y difusión de la complejidad de las rutas, las frecuencias de las rutas y la congestión (Archila, 2015).

Siguiendo esa misma línea, se tiene que la velocidad promedio de la ciudad depende de diferentes factores como la disposición de la malla vial y de la cantidad de vehículos en circulación (Alcaldía Mayor de Bogotá y Secretaría Distrital de Movilidad, 2013). Para el 2005 el parque automotor rondaba los 800.000 vehículos, mientras que para el 2011 se registraron más de 1.500.000 vehículos en la ciudad, lo que indica un crecimiento aproximado del 87,5% en un periodo de 6 años. El resultado de este crecimiento es una reducción en la velocidad promedio de la ciudad, pasando de 30km/h en el 2002 a 23km/h en el 2011. (Dirección de estudios sectoriales y de servicios, 2012)

Actualmente el panorama es aún más complejo, “en los últimos siete años la velocidad promedio de desplazamiento se ha disminuido un 15%: hoy, tanto los

carros, el transporte público, como los buses se desplazan a 19,3 km/h” (El Tiempo, 2015). Estas cifras se presentan como parte de la contextualización, sin embargo no son usadas en el modelo debido a que la principal contribución de este trabajo en cuanto a las características de la ciudad es no utilizar el tiempo promedio de las fuentes distritales sino la velocidad real para las rutas obtenida con el uso del GPS.

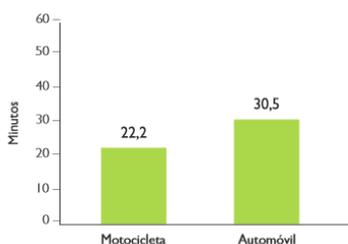


Figura 4-Tiempos de viaje promedio de Motos y automóviles. Fuente: (Corporación Andina de Fomento CAF, 2011)

En cuanto a los tiempos de viaje, al igual que en Bogotá, el mejor promedio en las ciudades de un importante estudio³ (Figura 4) es el de las motos donde lleva una ventaja de 8,3 minutos sobre el automóvil, ya que como se conoce, tiene mayor facilidad para evitar la congestión, tener acceso a vías y trasladarse en la malla vial.

Estas cifras enunciadas permiten dimensionar los retos a los cuales se enfrenta actualmente el transporte y la distribución en una ciudad como Bogotá, y precisamente estos retos hacen que las empresas busquen nuevos modos de transporte para el desplazamiento eficiente, logrando el traslado de personas pero también la distribución de carga, dentro de la cual está la distribución de documentos.

Para este caso específico, la moto se ha convertido en una opción aceptable para lograr cumplir con entregas en menores tiempos que cuando se usa el vehículo o transporte público. Un ejemplo en cifras es que en 2012, el tiempo de viaje promedio en Bogotá para el carro particular era de 37 minutos en contraste con una moto donde el tiempo promedio era de 29 minutos (Universidad de los Andes, 2013).

³ Buenos Aires, Belo Horizonte, Curitiba, Porto Alegre, Rio de Janeiro, Sao Paulo, Santiago, Bogotá, San José, Ciudad de México, Guadalajara, León, Lima, Montevideo y Caracas

Teniendo en cuenta lo anterior, la distribución urbana de mercancías (DUM) busca optimizar la distribución logística en una ciudad, por lo que la DUM es un foco interesante dentro del entorno en el que se quiere efectuar la investigación, ya que la búsqueda de optimización de esta DUM permite agilizar los procesos logísticos que se presentan en una ciudad. La DUM se puede realizar de acuerdo con varios parámetros enmarcados en la investigación de Antun (2010):

- Según coordinación de destinatarios-cooperación: destinatarios sin una logística de distribución propia, destinatarios con una logística de distribución coordinada por las compañías, destinatarios con una logística de distribución coordinada entre ellos mismos.
- Según sean los itinerarios centralizados o con paradas múltiples: distribución centralizada, distribución con paradas múltiples y distribución combinada.
- Según características del reparto y factores que influyen en la elección del vehículo.
- Según optimización de la ruta: rutas optimizadas por distancias y rutas optimizadas por ventanas horarias
- Según el factor de carga del vehículo: rutas con factores de carga baja y rutas con factores de carga alta.

Para este proyecto en específico se usarán como parámetros rutas optimizadas por tiempos y por ventanas horarias debido a que son los que se ajustan al objetivo de la tesis, logrando que al minimizar el tiempo entre rutas, teniendo en cuenta los cierres de clientes, se reduzca la devolución de facturas y se vuelva más eficiente el proceso de distribución.

De acuerdo con lo anterior, se deben tener en cuenta características de la DUM enunciadas por el Banco Interamericano de Desarrollo en su informe presentado en febrero de 2013 por el Departamento de Infraestructura y del Medio Ambiente:

- La influencia de la infraestructura
- La estrategia de la distribución

-Las características de los vehículos, que deben adaptarse a las condiciones de infraestructura y a las estrategias de distribución.

La influencia de la DUM en la logística de una ciudad la hace un aspecto fundamental en la logística de una empresa debido a que es un punto importante para agregar valor a través de toda su cadena de negocio y para poder optimizarla es necesario tener en cuenta sus principales problemas que se presentan en la Figura 5.

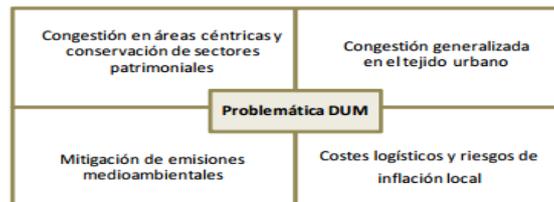


Figura 5-Problemática vinculada a la DUM. Fuente: (Antun, 2013)

Además de la DUM, se tienen diversos factores que influyen y componen la logística de una ciudad; factores que se deben reconocer al hacer análisis un análisis logístico, sobre todo en entornos con características tan complejas como las de una ciudad en un país emergente.

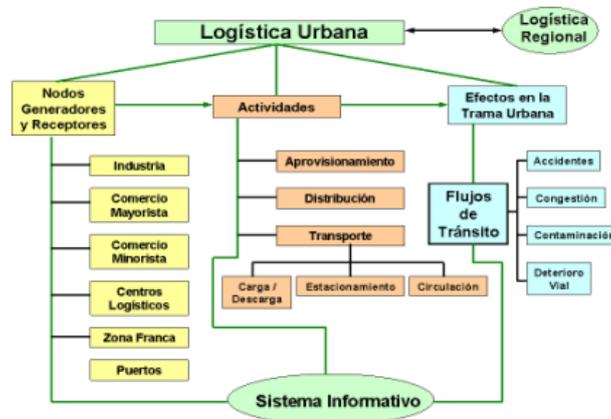


Figura 6-Esquema de la Estructura General de la Logística del transporte urbano de mercancías. Fuente: (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2011)

Del esquema de logística de transporte en la Figura 6 se concluye que actualmente las operaciones tienen un gran reto al buscar encontrar modelos y soluciones que optimicen los procesos de transporte y distribución, evitando así que factores del entorno, afecten la calidad de los productos o en el caso de esta investigación, la calidad del servicio.

Para comprender cómo afectan los procesos de distribución la calidad del servicio prestado, es necesario entender el concepto de servicio, que corresponde a las actividades económicas que generalmente originan productos intangibles (como educación, ocio, hostelería, administración pública, servicios financieros, servicios médicos, servicios legales) (Heizer & Render, 2007).

Estos autores definen varias características del sector servicios como que son intangibles, se producen y consumen simultáneamente, son habitualmente únicos, suponen gran interacción con el cliente, se basan normalmente en conocimiento, se proveen en general de forma dispersa.

De acuerdo con lo anterior, una empresa de servicios está dedicada a “aquellas actividades que no producen una mercancía en sí, pero que son necesarias para el funcionamiento de la economía. Como ejemplos de ello se tienen el comercio, los restaurantes, los hoteles, el transporte, los servicios financieros, de educación y profesionales, las comunicaciones, el gobierno, etc.” (Banco de la República, BANREP, 2015). La empresa en la que se va a centrar la investigación presta servicios legales, por lo está en el sector servicios, también conocido como sector terciario de la economía.

La Tabla 4 compara los atributos principales de los bienes y servicios:

Atributos de los bienes (Producto Tangible)	Atributos de los servicios (Producto Intangible)
El producto puede ser revendido	No es habitual revender un servicio
El producto puede almacenarse	Pocos servicios pueden almacenarse
Se pueden medir algunos aspectos de su calidad	Muchos aspectos de su calidad son difíciles de medir
La venta es distinta de la producción	La venta es normalmente una parte del servicio
El producto se puede transportar	El proveedor (no el producto) puede desplazarse habitualmente.
El lugar de la instalación es importante para el costo	El lugar de la instalación importa para el contacto con el cliente
Normalmente es fácil de automatizar	Normalmente el servicio es difícil de automatizar.
Los ingresos provienen fundamentalmente del producto tangible	Los ingresos provienen fundamentalmente de los servicios intangibles

Tabla 4-Diferencia entre bienes y servicios. Fuente: (Heizer & Render, 2007)

La Tabla 4 brinda una visión de la complejidad de los servicios, convirtiéndolos como se ha mencionado en un reto para la investigación de operaciones.

Para obtener la información en tiempo real de la velocidad, tiempos y cómo afectaba la malla vial y el congestionamiento en las rutas de la empresa objeto de estudio se utilizó un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) que es un sistema de navegación compuesto por una flotilla de satélites puestos en órbita por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (Rey, 2012). Este sistema permite determinar la ubicación de un objeto por su latitud y altitud.

El desarrollo del GPS tuvo sus inicios en las fuerzas armadas estadounidenses que necesitaban un sistema exacto y en tiempo real para ubicar a sus enemigos (U.S. Air Force, 2015); el primer sistema fue desarrollado en 1978, desde ese momento se ha usado para múltiples fines y se ha trabajado para hacerlo mucho más exacto y detallado.

El funcionamiento del Sistema de Posicionamiento Global radica en la transmisión de cada satélite de su posición exacta y una señal de tiempo de los receptores extremadamente precisa para los receptores en la tierra. “Dada esta información, los receptores GPS pueden calcular su distancia al satélite, y combinando esta información de cuatro satélites, el receptor puede calcular su posición exacta usando un proceso llamado trilateración” (Rey, 2012).

Para este estudio en específico, se usó el GPS para navegación y control de las flotas de vehículos (Pozo Ruz, Ribeiro, & García, 2000) que permita la recolección de información de rutas, tiempos de viaje y de servicio en tiempo real y sin utilizar velocidades promedio, que se usará para la construcción de un modelo matemático para optimizar las rutas de los vehículos que distribuyen las facturas en la empresa de servicios.

En el siguiente capítulo, se presenta una breve descripción de la problemática bajo estudio a fin de establecer las bases de estudio del presente trabajo de investigación y respaldar la elección del modelo VRP como una alternativa de solución.

CAPITULO 4

PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA DE LA EMPRESA DE SERVICIOS ANALIZADA Y SU SITUACIÓN ACTUAL

En las secciones anteriores, se expusieron los conceptos y la base teórica para describir el marco de esta investigación; a continuación, se presentará el panorama actual de la empresa de servicios objeto de estudio, que permitirá entender el problema y el objetivo de esta investigación.

Situación actual de la empresa objeto de análisis

La empresa brinda servicios legales, es de gran prestigio en Colombia; cuenta con 250 empleados y más de 2500 clientes.

Del total de clientes el 70% se encuentra ubicado en Bogotá y, de esos clientes el 70% tiene su dirección de correspondencia en la zona norte de Bogotá.

TOTAL CLIENTES BOGOTA	ZONA NORTE	OTRA ZONA
1566	1097	469

Tabla 5-Distribución de clientes zona norte de Bogotá. Fuente: creación propia del autor.

El procedimiento que actualmente se lleva a cabo para la distribución de facturas en la empresa es el siguiente:

1. El Departamento de Facturación emite las facturas.
2. Facturación entrega los documentos al área de mensajería.
3. El jefe de mensajeros se encarga de revisar la documentación y diligenciar un formato de control.
4. Se segmenta la documentación de acuerdo con la ubicación del destinatario y el jefe de mensajeros hace la separación respectiva entre las facturas emitidas a clientes locales, nacionales e internacionales.
5. Se entrega los documentos al mensajero correspondiente a la zona en la cual está ubicado el cliente para la entrega de la factura.
6. El mensajero sale a hacer la distribución durante dos jornadas, mañana y tarde.

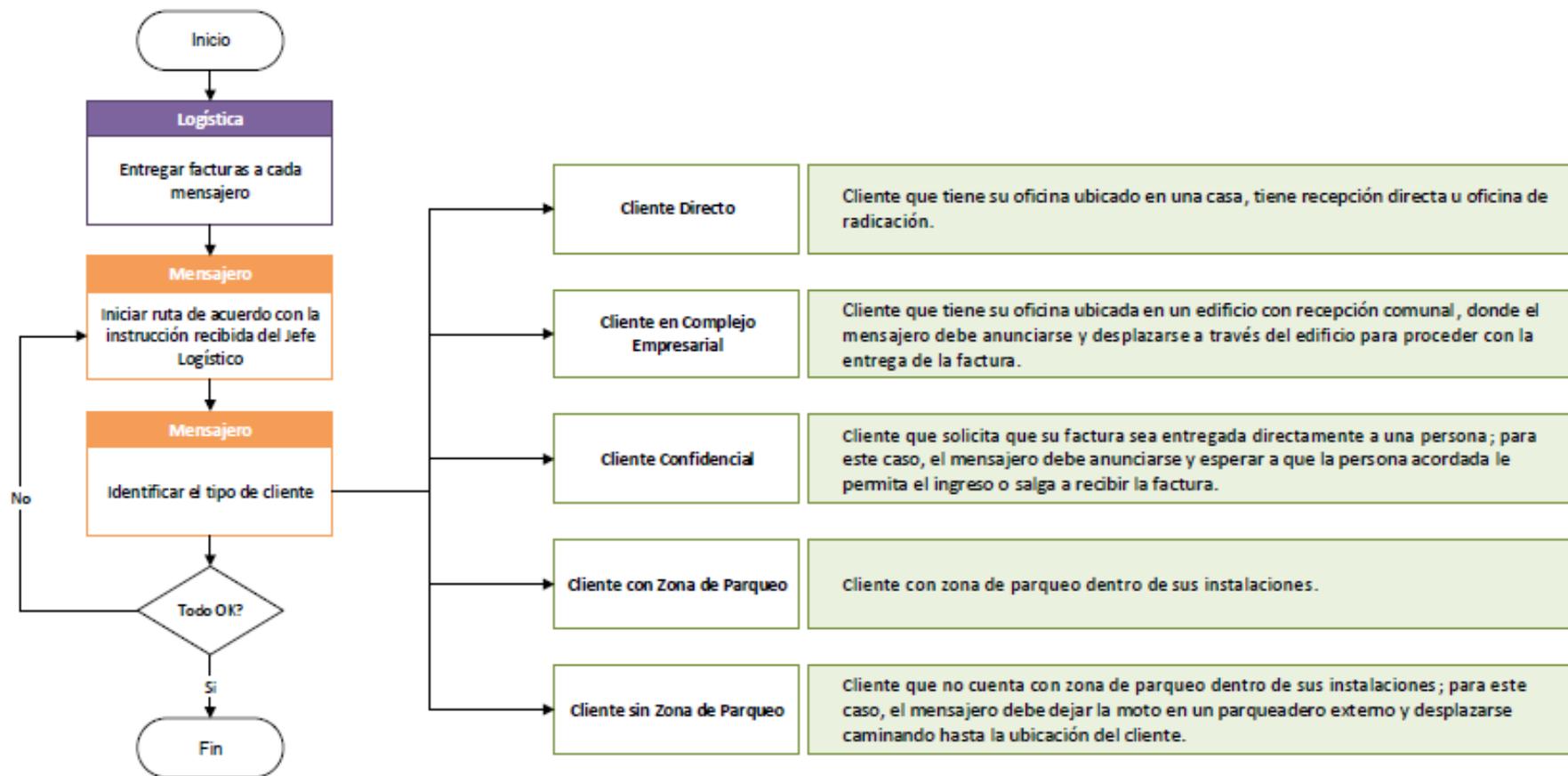


Figura 7-Diagrama de flujo de proceso de la distribución de las facturas según clasificación de clientes. Fuente: creación propia del autor consultando (Formato Educativo Escuela de Negocios, 2015).

La Figura 7, muestra el proceso global de la distribución de facturas de acuerdo con el tipo de cliente, clasificado según sus características de entrega.

En el proceso global, se presenta que la ruta va acorde con la urgencia de la correspondencia y la cercanía entre puntos. La ruta es definida por el jefe de mensajería quien le indica a cada mensajero las facturas que debe entregar y el orden de prioridad. El mensajero toma la ruta que considera mejor para hacer la distribución de las facturas., lo que conlleva a constantes retrasos en las entregas fuera de las ventanas de tiempo autorizadas por los clientes, causando que se presentan devoluciones, lo que genera reprocesos y sobrecostos en papelería, mensajería y mano de obra (Nave, 2002).

En la Tabla 6 se muestran las cifras correspondientes a facturas devueltas durante el año 2014:

FACTURAS DEVUELTAS ZONA NORTE BOGOTÁ			
TRIMESTRE	AÑO 2012	AÑO 2013	AÑO 2014
1	56	82	142
2	91	47	205
3	86	73	250
4	82	58	150
TOTAL	315	260	952

Tabla 6-Histórico de facturas devueltas en la zona norte de Bogotá (años 2012, 2013 y 2014). Fuente: creación propia del autor.

La Tabla 6 relaciona el histórico de facturas devueltas por trimestre durante los años 2012, 2013 y 2014, tomando los datos del 2014 con corte a 31 de octubre; lo cual muestra la importancia de reducir estos números que afectan visiblemente la operación.

La Tabla 7 refleja las cifras de los clientes visitados durante los meses de medición en la zona norte de Bogotá, donde el 37% de los clientes visitados en la ciudad corresponde a la zona de estudio:

CLIENTES VISITADOS DURANTES LOS MESES DE MEDICIÓN	
Cliente ubicados en la ciudad de Bogotá	351
Clientes ubicados en la zona norte de Bogotá	132

Tabla 7-Clientes visitados durante los meses de medición. Fuente: creación propia del autor.

En la Tabla 8 son presentadas las cifras correspondientes a las facturas expedidas a los clientes objeto de estudio durante los meses de la recolección de datos:

TOTAL DE FACTURAS EMITIDAS DESDE 01 DE JUNIO DE 2014 A 10 DE AGOSTO DE 2014	
Total de facturas emitidas	3393
Total de facturas emitidas para clientes en Bogotá	1485
Porcentaje: total de facturas emitidas para clientes en Bogotá/ Total de facturas emitidas	44%
Total facturas emitidas para distribución en la zona norte	607
Porcentaje: Total de facturas zona norte de Bogotá/ Total de facturas de Bogotá	41%

Tabla 8-Total de facturas emitidas desde 01 de junio de 2014 a 10 de agosto de 2014 (meses de medición). Fuente: creación propia del autor.

El volumen de facturas entregadas no permanece constante a lo largo del mes debido a procesos internos de la empresa. En la Figura 8 y la Figura 9 se analizará el comportamiento de la distribución de facturas durante los días del mes y durante los meses del año 2014.



Figura 8-Máximo de facturas entregadas por día del mes. Fuente: creación propia del autor, con base en información de la empresa.

La tendencia que se refleja en la Figura 8 durante el año 2014, es que el mayor número de facturas entregadas se realiza puntualmente los días 15 y 20 de cada mes. Esto obedece a que el volumen de facturación se incrementa de según las necesidades de los clientes, la estrategia de la empresa y la proximidad del cierre de mes.

Los primeros 8-9 días de cada mes, son inoperantes, dada la composición de trabajo de la empresa, en la que los asuntos/casos, luego de llegar a acuerdo con cada cliente, comienzan su ciclo de facturación.

Por otra parte, durante los últimos 5 días de cada mes, se puede apreciar que no hay entrega de facturas, dado que el cierre de recepción de facturas en su mayoría para las empresas colombianas, inicia a partir del día 25 de acuerdo con el ciclo del cierre contable de cada cliente. Tal es el caso que el día de cada mes en el que menos se han entregado facturas, ha sido el día 31, cuya máxima entrega ha sido de 3 facturas.

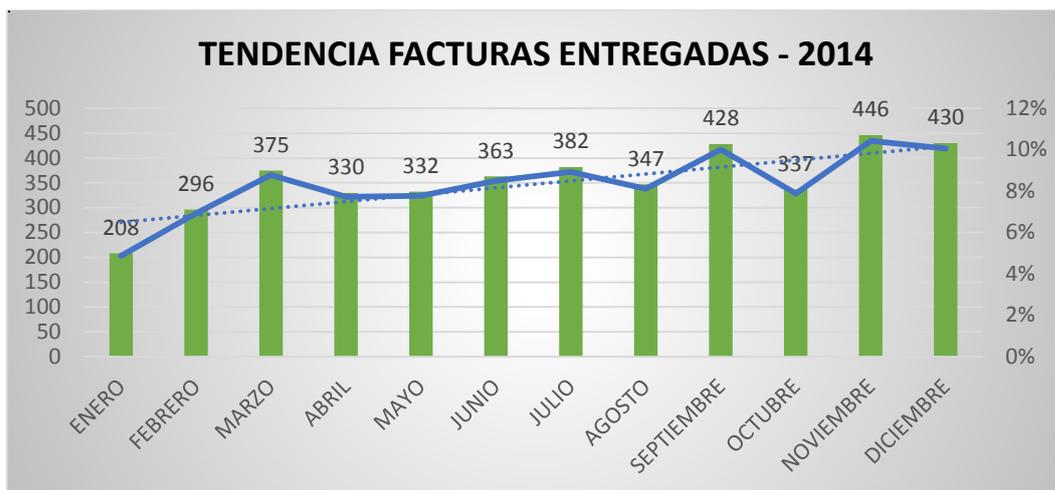


Figura 9-Tendencia de la entrega de facturas durante 2014 por mes.
Fuente: creación propia del autor, con base en información de la empresa 2014.

La tendencia que se evidenció durante el año 2014, muestra un aumento del volumen de facturas distribuidas. Entre enero y diciembre se evidencia un aumento en las entregas de un 106,7%

El mes que registró mayor volumen de facturas entregadas fue noviembre, con un total de 446 unidades, representando así un 25,22% más que las facturas entregadas en promedio durante todo el año.

En conclusión, a lo largo del mes es necesario optimizar la distribución de entregas entre los días 9 y 25, fechas en que debido a los procesos internos de la empresa, se tiene el mayor volumen de facturas emitidas y se debe hacer la mayor parte de entregas.

Pudiendo establecer la situación actual de la empresa de estudio, en el Capítulo 5 se presentará en detalle la metodología implementada para la aplicación del modelo de VRPTW, presentando la propuesta de solución con sus especificaciones.

CAPITULO 5

METODOLOGÍA Y MODELO DE OPTIMIZACIÓN

El modelo de optimización propuesto es un modelo genérico de VRPTW, pero cuyos parámetros son afectados por características del entorno estudiado: una ciudad de mercados emergentes con problemas de congestión, policentrismo y falta de infraestructura. Este entorno influye principalmente la velocidad que es información fundamental usada en los parámetros de Tiempo de Viaje para el modelo de optimización propuesto.

Para poder construir el modelo de optimización, se definió un horizonte de planeación para la recolección de información de dos meses, en los cuales se tuvieron en cuenta únicamente los datos de los días hábiles dentro del horario laboral de 8 a.m. a 6 p.m. Adicional a esta información, se usó el análisis los datos de años anteriores que permitió efectuar el análisis histórico de la información real de la empresa de estudio relacionada con la entrega de facturas. Estos datos históricos, permitieron buscar tendencias, visualizar estacionalidades o datos que generaban ruido (datos que al ser dispersos pueden distorsionar el modelo) al momento de aplicar el modelo de optimización.

La zona delimitada para el levantamiento de información sobre la distribución de facturas es la zona norte de Bogotá, debido a que el 70% de los clientes locales de la empresa objeto de estudio, se encuentra ubicado en ese sector. Se define como zona norte la comprendida entre la calle 72 con carrera 4 y calle 235 con Av. Boyacá (carrera 72). Cabe señalar que para esta zona la empresa cuenta actualmente con dos mensajeros (dos motos) y que la operación de la empresa genera facturas durante todo el mes a cualquier hora (dentro del horario laboral).

Para la recolección de datos, se usó un equipo de GPS instalados en los motores de las dos motos, que se utilizan para transporte de los mensajeros.

Este equipo de GPS se implementó con la empresa Isyscol⁴ y fue necesario para esta investigación debido a que es una herramienta que brinda datos en tiempo real, información actualizada y de fácil acceso, para lograr conocer el desempeño de los mensajeros al ejecutar las rutas designadas en la distribución de facturas en la zona norte de Bogotá.

Fue seleccionada la empresa Isyscol con base en su experiencia en el mercado, facilidad de instalación del GPS y disponibilidad de un dispositivo que permitiera un rastreo exacto, pero sin necesidad de ser operado por una persona o estar expuesto a manipulación (sujeto a error). El GPS seleccionado para el experimento es un dispositivo básico que funciona a través de una Tarjeta SIM⁵ y la plataforma de datos se obtiene a través de una página web que permite generar: reportes de velocidad, reportes de tiempo detenido, reportes de distancia recorrida, control de kilómetros recorridos y rutas. Con la herramienta brindada por el proveedor, fue posible la obtención de datos cruciales para la modelación y se pudieron caracterizar las rutas que los mensajeros recorrian en tiempo y velocidad real, comprobando que no tenían un patrón, orden o secuencia que permitiera tiempos óptimos ni una distribución eficiente.

Buscando cumplir con los objetivos de esta investigación, los pasos para el desarrollo de la metodología fueron:

1. Recolección de la información actual de la empresa para análisis situacional.

La recolección de esta información consistió en:

- Entrevista con el jefe logístico y coordinador de mensajería para conocer cómo se maneja actualmente la distribución de facturas, qué rutas usan los mensajeros y cómo se diseñan las visitas a los clientes.

En este punto se pudo establecer que antes de este estudio, no se había

⁴ Empresa dedicada a la implementación de sistemas de administración satelital
<http://www.isyscol.com/>

⁵ Una tarjeta SIM, de las siglas en inglés Subscriber Identity Module, en español Módulo de Identificación de Abonado, es una tarjeta inteligente (chip) desmontable usada en los teléfonos móviles. Las tarjetas SIM almacenan la clave de servicio del suscriptor usada para identificarse ante la red.
<http://www.pergaminovirtual.com.ar/>

hecho análisis alguno para mejorar los tiempos de ruta ni se habían evaluado las estrategias para la reducción del indicador de devolución de facturas.

- Análisis de las cifras de la entrega de facturas en el año 2014 para los clientes de la zona norte de Bogotá para identificar la tendencia de entrega por día y por mes; conociendo el comportamiento anual y mensual de la entrega de facturas en la zona establecida para generar un primer acercamiento al comportamiento de los picos de demanda.
- Revisión de la base de datos de clientes y planillas físicas de los mensajeros para comparar con la información obtenida con el GPS confirmando la coherencia de los datos.
- Elaboración de flujo de proceso para conocer e identificar el proceso de distribución de facturas con la caracterización de entrega por cliente.

2. Revisión de la literatura.

La revisión de la literatura se basó en la revisión del material recopilada que permitiera una base teórica para la elaboración del modelo matemático. Se revisaron investigaciones previas sobre distribución de documentos en las ciudades de mercados emergentes, problemas de ruteo y diseño de rutas para empresas de servicios, diseño y planeación de la ciudad de Bogotá y todos los temas enfocados a la contextualización de la investigación.

3. Cotización de empresa prestadora de servicio de rastreo vehicular, compra e instalación de los dispositivos en las motos.

4. Formulación del modelo matemático.

El modelo matemático se formuló con base en la investigación teórica y de conocimiento práctico de la empresa, buscando dar solución a los objetivos propuestos al inicio del trabajo, minimizando el tiempo de ruta de la distribución de facturas. Logrando una reducción en la devolución de facturas por parte de clientes.

5. Recolección y depuración de la información obtenida con el GPS.

La recolección de información se realizó durante un período de dos meses en

el cual era necesario entrar periódicamente a la plataforma de rastreo para verificar que la toma de datos (rutas) se estuviese efectuando de forma correcta. La comprobación se efectuó comparando los datos arrojados por la plataforma con las planillas manuales que diligencian los mensajeros para control de recorrido, un registro interno que solicita la empresa.

La depuración consistió en organizar los datos obtenidos de acuerdo con los parámetros y variables que se necesitaban para el modelo planteado y que más adelante serán resaltados. El procedimiento de depuración consistió en los siguientes pasos:

- Exportar a Excel la información desde la plataforma de GPS.
- Organizar la información identificando los horarios laborales y los clientes de la zona norte de Bogotá visitados de acuerdo con las direcciones obtenidas.
- Convertir los tiempos de servicio y tiempos de viaje de horas a minutos debido a que el modelo de optimización se estableció en minutos para facilitar los cálculos.

6. Selección de clientes para el modelo matemático (muestra).

Debido a que los clientes de la Empresa ubicados en la zona norte de Bogotá componen una base de 1.067, fue necesario realizar un análisis histórico de los clientes a los que se les ha emitido facturas durante los últimos 3 años (2012, 2013 y 2014), considerando de esos cuáles tenían casos abiertos con la Empresa y elaborando un análisis Pareto donde se identificaran los clientes más activos y representativos de la zona. De esta revisión se pudo obtener una base de datos de 162 clientes, que conforman la muestra para el estudio.

7. Análisis de los resultados.

Para el análisis de resultados se hizo un análisis de sensibilidad donde se buscó determinar varios escenarios que reflejaran cuáles condiciones de operación debían ser modificados para que ésta fuese más eficiente y se redujera el tiempo de ruta.

La elaboración de escenarios se efectuó a partir de posibles situaciones a las cuales la operación de la empresa podría enfrentarse, generando cambios en los parámetros del modelo como los vehículos, la jornada, las ventanas de

tiempo para poder analizar el resultado de la función objetivo y el impacto de los cambios en la organización.

La propuesta presenta las siguientes características:

- La función objetivo es minimizar el tiempo de viaje y servicio de las rutas de las motos para que la distribución de facturas en la zona norte de Bogotá sea más efectiva y se reduzca el indicador de devolución de facturas por entregas tardías.
- Debido a que los elementos que se transportan en cada una de las motos son documentos, la capacidad se considera como infinita (Eksioglu, Volkan Vural, & Reisman, 2009); (Chang & Yen, 2012); cada cliente tiene una demanda D_{jd} específica y 8 de estos clientes cuentan con ventanas de tiempo estrictas que deben ser respetadas.
- Para la distribución de facturas, se usarán dos motos.
- Cada cliente debe ser visitado una sola vez por día, por una sola moto.
- Las visitas a clientes dependen de una demanda que será tomada como la emisión de facturas por día para cada cliente.
- Cada cliente agrega un tiempo de servicio $T_s(j)$ a la ruta que incluye el tiempo de descargue y el tiempo de entrega.

Para la construcción del modelo, fue necesaria la elaboración de cuatro matrices y una tabla de datos.

Matriz de tiempos de viaje: La matriz de tiempos de viaje se elaboró a partir de Google Maps, donde se ingresó la dirección de cada cliente para obtener la latitud y longitud de cada uno; teniendo las coordenadas de cada cliente, se procedió a calcular las distancias Manhattan entre éstos.

Una vez se tenía la distancia entre cada cliente, se tomó la velocidad promedio por día; cabe aclarar que esta velocidad promedio fue obtenida a partir de los datos del GPS, con base en el informe de velocidad de los dos meses, se generó el promedio por moto, por día y se tomó finalmente el promedio de esa velocidad por día para las dos motos como se muestra en la Tabla 9.

PROMEDIO DE VELOCIDAD MOTOS		
Día de la semana	km/hora	km/minuto
Lunes	27,8	2,16
Martes	28,93	2,07
Miércoles	27,06	2,22
Jueves	28,96	2,07
Viernes	27,55	2,18

Tabla 9-Promedio de velocidad de las motos. Fuente: creación propia del autor con base en datos obtenidos del GPS.

La matriz se culminó tomando la distancia Manhattan de cada cliente hasta el siguiente cliente cada día de la semana por la velocidad promedio por día.

Tabla de tiempos de servicio: Los tiempos de servicio fueron tomados de la información obtenida con el GPS, para este caso se tomó el promedio de tiempos de servicio para cada cliente, sin embargo, como la medición se realizó únicamente durante 2 meses, de los 162 clientes elegidos hubo varios que no se visitaron con el GPS debido a que no se realizó la entrega de facturas durante este período. Para esos clientes, se generó un valor de tiempo de servicio aleatorio que no excediera ni el máximo ni el mínimo de los tiempos de servicio tomados con el GPS. Estos tiempos de servicio se vieron influenciados por las características propias de la ciudad enmarcada en un mercado emergente que afecta la velocidad y tiempo de servicio aumentándolos debido a problemas de congestionamiento, entre otros.

Matriz de demanda: La matriz de demanda (entrega de facturas cada día de la semana) se elaboró a partir de una simulación de opción de visita para los 162 clientes que permitiera definir si se debía hacer la entrega de factura al cliente durante esa semana. Esto fue necesario, debido a que no existe un patrón de demanda que permita conocer a los clientes a los que se les va a emitir factura, tampoco proyectar con seguridad la demanda semanal de estos.

Matrices de ventanas de tiempos: Para la elaboración de estas matrices fue necesario identificar a los clientes con restricción de horarios para la recepción de facturas, de tal forma que se construyó la matriz con el horario laboral de 8:30 a.m. a 5:30 p.m., exceptuando 8 clientes con restricción u horario diferente al habitual especificado en la matriz.

Notación

Conjuntos e índices

- I Conjunto de clientes que deben ser visitados cada día $\{E \cup J\}$
- E Subconjunto de I que describe la empresa de servicios (*depot*)
- J Subconjunto de clientes I que describe los clientes que deben ser visitados cada día. Conjunto similar (alias) a I
- D Conjunto de días, conformado por los días entre lunes y viernes.
- M Conjunto de motos usados para la distribución de facturas.

VARIABLES DE DECISIÓN

- X_{ij}^{dm} Variable binaria. 1 si el vehículo m viaja del origen i al destino j en el día d y 0 de lo contrario.
- Y_{id} Variable continua que determina el instante en el que se debe realizar la entrega de la factura al cliente i en el día d .

Parámetros

- $Dem_{j,d}$ Demanda para el cliente j en el día d , tomando como demanda el número de facturas por día que se emitan para cada cliente.

$Tv_{i,j,d,m}$ Tiempo de viaje desde el cliente i al cliente j en el día d en la moto m .

TS_i Tiempo de servicio en el cliente i .

$Horamáxima_{i,d}$ Cota superior de la ventana de tiempo para el cliente i en el día d .

$Horamínima_{i,d}$ Cota inferior de la ventana de tiempo para el cliente i en el día d .

K Número arbitrario muy grande.

$Jornada$ La jornada corresponde a 420 minutos (7 horas laborales).

Modelo

$$MinZ = \sum_{\forall i} \sum_{\forall j} \sum_{\forall d} \sum_{\forall m} X_{ij}^{dm} (Tv(i, j, d, m) + TS(i)) \quad (1)$$

$$\sum_{\forall j} X_{1j}^{dm} \leq 1 \quad \forall d, \forall m, \forall i \in E \quad (2)$$

$$\sum_{\forall i} X_{i1}^{dm} \leq 1 \quad \forall d, \forall m, \forall j \in E \quad (3)$$

$$\sum_{\forall i} \sum_{\forall j} X_{ij}^{dm} (Tv(i, j, d) + Ts(i)) \leq Jornada \quad \forall d, \forall m \quad (4)$$

$$Y_{id} \leq HoraMáxima(i, d) \quad \forall i \in \{E\}, \forall d \quad (5)$$

$$Y_{id} \geq HoraMínima(i, d) \quad \forall i \in \{E\}, \forall d$$

$$Y_{id} + Ts(i) + Tv(i, j, d) \leq Y_{jd} + K(1 - \sum_{\forall m} X_{ij}^{dm}) \quad \forall i \in \{E\}, \forall j \in \{E\}, \forall d \quad (6)$$

$$\sum_{\forall m} \sum_{\forall i} X_{ij}^{dm} = Dem(j, d) \quad \forall d, \forall j \in \{E\} \quad (7)$$

$$\sum_{\forall i} X_{ij}^{dm} = \sum_{\forall i} X_{ji}^{dm} \quad \forall d, \forall m, \forall j \in \{E\} \quad (8)$$

$$\sum_{\forall i} \sum_{\forall m} X_{ij}^{dm} \leq 1 \quad \forall d, \forall j \in \{E\} \quad (9)$$

$$Y_{id} \geq 0 \quad \forall i, \forall d \quad (10)$$

$$X_{ij}^{dm} \in \{1, 0\} \quad \forall i, \forall j, \forall d, \forall m \quad (11)$$

De acuerdo con el estudio y lo que se quiere obtener con el modelo de optimización, la función objetivo del modelo (1) consiste en minimizar el tiempo de ruta para la distribución de facturas a los clientes. La red de clientes ij tiene un total de 162 clientes, todas las distancias están representadas por una distancia Manhattan; la velocidad de cada vehículo m se determina como el promedio obtenido a partir de las mediciones de velocidad realizadas durante dos meses para cada moto, por día (ver Tabla 9).

La restricción (2) garantiza que cada vehículo m salga de la empresa de servicios (que funciona como *depot*) durante el día para la distribución de las facturas una vez; mientras la restricción (3) hace que las salidas estén correspondidas con las llegadas a la empresa de servicios de cada vehículo. La restricción (4) limita las horas diarias laborales; las demoras y tiempos de ocio se incluyen en el promedio de velocidad, por lo que en estos factores se descartan evitando elaborar una restricción adicional. Las restricciones (5) corresponden a la cota superior e inferior de las ventanas de tiempo duras para los clientes que tienen límites de horario, lo que elimina los subtours que se podrían presentar en un problema de ruteo.

La restricción (6) garantiza la relación entre las variables de decisión. La restricción (7) garantiza que la demanda del cliente sea satisfecha por alguna de las motos en un día específico, teniendo en cuenta que el cliente puede ser visitado únicamente por una moto. La restricción (8) asegura la continuidad de la ruta, garantizando que cada moto llegue a un cliente y salga de él al siguiente punto. La restricción (9) obliga al modelo a que cada cliente sea visitado sólo una vez por una moto y las restricciones (10) y (11) caracterizan las variables de decisión consideradas en el modelo.

CAPITULO 6

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la validación del modelo planteado, se utilizó el lenguaje del software comercial GAMS 23.6 utilizando el solver CPLEX donde se usaron los algoritmos clásicos de Branch and Bound, ejecutado en un Intel(R) Core(TM) i5-2450M CPU de 2,5 GHz con 4 GB de RAM. La validación tuvo una duración promedio por escenario de 1 hora con 30 minutos que se llevó a cabo de manera secuencial, es decir, no se ejecutaba más de un modelo u operación a la vez, esto con el fin de hacer uso de toda la capacidad del computador y tener las mismas condiciones para cada escenario propuesto. El tiempo de validación no afecta la operatividad del modelo, dado que la planeación de las rutas se realiza de manera semanal y se realiza el viernes de cada semana previa, permitiendo planear anticipadamente.

En el desarrollo del modelo, el proceso para la obtención de resultados estuvo apoyado 100% en la empresa de estudio. El análisis de la información obtenida tanto de los datos históricos de la empresa como del GPS, brindó una visión general de la operación enfocada a la distribución de las facturas; mostrando un ambiente complejo asociado a las condiciones de movilidad en la ciudad, y la ubicación de los clientes.

La principal dificultad de esta investigación radicó en la construcción del modelo y su validación en GAMS⁶ debido a que consistió en la abstracción de la operación actual de la empresa, su distribución y los factores que influyen en la distribución. La operación es compleja y lograr incluir en el modelo los puntos importantes para la empresa representó un reto en la realización de este trabajo.

Para obtener los resultados, se realizaron 13 pruebas en GAMS que permitieron observar el comportamiento del modelo al variar los valores de los diferentes parámetros.

⁶ *The General Algebraic Modeling System, es un sistema para de alto nivel que permite resolver problemas de modelación y optimización.*

En la Tabla 10 se muestran las características de los 8 escenarios analizados en la validación del modelo y en la Tabla 11 se especifican los clientes con ventanas de tiempos estrictas.

Escenario	Restricción de ventanas de tiempo	Jornada	Motos
Escenario 1	8 clientes con TW ⁷ estrictas y 154 con TW de 8:30 a.m. a 5:30 p.m.	7 horas (420 minutos)	2
Escenario 2	8 clientes con TW estrictas y 154 con TW de 8:30 a.m. a 5:30 p.m.	14,16 horas (850 minutos)	2
Escenario 3	Todos los clientes con TW de 8:00 a.m. a 6:00 p.m.	14,16 horas (850 minutos)	2
Escenario 4	8 clientes con TW estrictas y 154 con TW de 8:30 a.m. a 5:30 p.m.	16,6 horas (1000 minutos)	2
Escenario 5	8 clientes con TW estrictas y 154 con TW de 8:30 a.m. a 5:30 p.m.	14,16 horas (850 minutos)	4
Escenario 6	8 clientes con TW estrictas y 154 con TW de 8:30 a.m. a 5:30 p.m.	14,16 horas (850 minutos)	3
Escenario 7	Todos los clientes con TW de 8:30 a.m. a 5:30 p.m.	16,6 horas (1000 minutos)	2
Escenario 8	8 clientes con TW estrictas y 154 con TW de 8:30 a.m. a 5:30 p.m.	20 horas (1200 minutos)	3

Tabla 10-Descripción de los escenarios planteados para el análisis de sensibilidad. Fuente: creación propia del autor.

CLIENTE	VENTANAS DE TIEMPO ESTRICTAS
13	Horario de atención de 8:00 a.m. a 12:30 p.m.
31	Horario de atención de 8:00 a.m. a 1:00 p.m.
58	Horario de atención de 1:00 p.m. a 5:00 p.m.
77	Horario de atención de 8:00 a.m. a 6:00 p.m.
81	Horario de atención de 8:00 a.m. a 12:00 p.m.
95	Horario de atención de 8:00 a.m. a 4:00 p.m.
115	Horario de atención de 8:00 a.m. a 12:00 p.m.
137	Horario de atención de 7:30 a.m. a 11:30 a.m.

Tabla 11-Clientes con ventanas de tiempo estrictas. Fuente: creación propia del autor.

Como se muestra en la Tabla 10, las variaciones en los escenarios consisten en modificaciones en las ventanas de tiempo, la jornada laboral y la cantidad de motos usadas para la distribución de facturas. Factores que son posibles modificar en la operación actual de la empresa de servicios y que afectarán el tiempo de ruta.

⁷ TW=Ventanas de tiempo.

La Tabla 12 muestra los valores de la función objetivo para cada uno de los escenarios analizados.

Escenario	Valor Z
Escenario 1	sin solución
Escenario 2	3926,87
Escenario 3	4139,23
Escenario 4	3859,47
Escenario 5	3877,58
Escenario 6	sin solución
Escenario 7	3869,19
Escenario 8	3891,62

Tabla 12-Valor de la función objetivo para cada escenario. Fuente: Elaboración propia del autor.

Los valores descritos en la tabla anterior, se mostrarán en la Figura 10 en una gráfica que permite visualizar los escenarios que representan mejores tiempos de ruta de acuerdo con los resultados obtenidos.

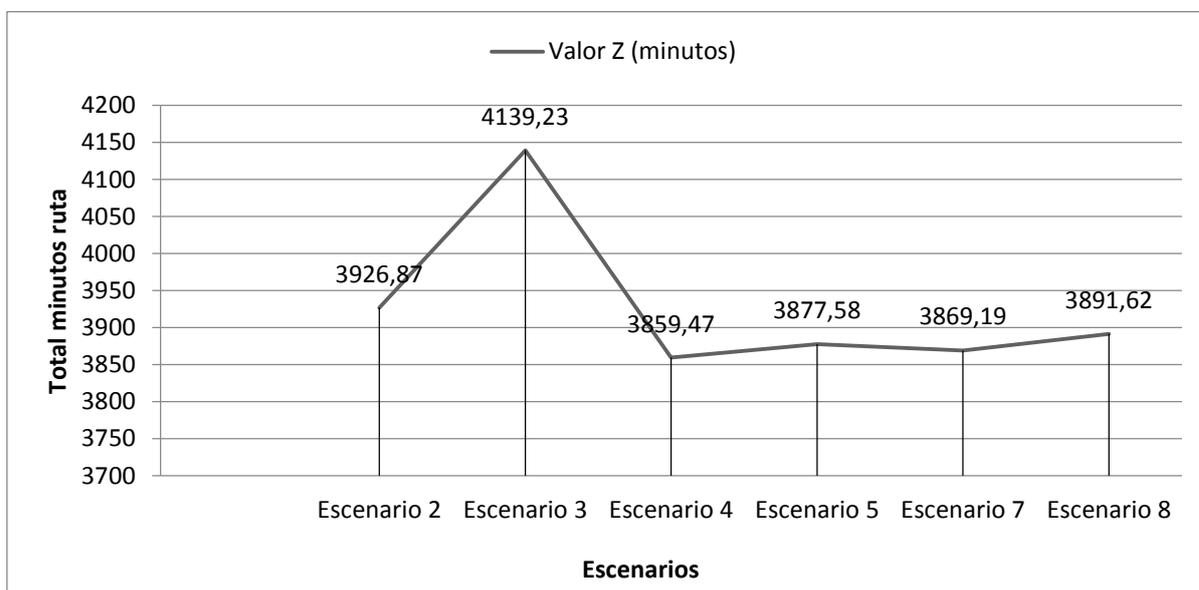


Figura 10-Gráfica del análisis de sensibilidad. Fuente: Elaboración propia del autor.

La Figura 10 muestra como el escenario que arroja un menor valor de la función objetivo es el escenario 4, donde en una jornada de 16, 6 horas,

teniendo dos motos y las condiciones actuales de ventanas de tiempo (horarios restrictivos y clientes con ventanas de tiempo estrictas), se podría realizar la distribución óptima de las facturas invirtiendo un tiempo de ruta para cada mensajero de 6,43 horas por día.

El segundo escenario con menor valor de la función objetivo es el escenario 7, sin embargo, este escenario podría aplicarse únicamente a los clientes que no tienen ventanas de tiempo estrictas por lo cual se tendrían que modificar las condiciones actuales de los clientes para que este escenario se aplicara en su totalidad.

Según los escenarios planteados y efectuando la comparación de cada uno y el promedio de la ruta actual se obtiene el porcentaje de mejora detallado en la siguiente tabla:

Escenario	Rutas óptimas (hrs)	Ruta actual (hrs)	Mejora (hrs)	Porcentaje de mejora
Escenario 2	6,54	7,41	0,86	12%
Escenario 3	6,90	7,41	0,51	7%
Escenario 4	6,43	7,41	0,97	13%
Escenario 5	3,23	7,41	4,17	56%
Escenario 7	6,45	7,41	0,96	13%
Escenario 8	4,32	7,41	3,08	42%

Tabla 13- Porcentaje de mejora en el tiempo de ruta. Fuente: Elaboración propia del autor.

Con la información de la Tabla 13 se evidencia la mejora en el tiempo de ruta con las rutas óptimas arrojadas por el modelo comparado con los tiempos de la ruta actual; resaltando que la ruta actual no cumple en su mayoría con las ventanas de tiempos de clientes ni el recorrido completo y en cambio, las rutas óptimas respetan los horarios de los clientes, optimizan los tiempos de ruta y por tanto, el proceso de distribución de facturas; cumpliendo con la demanda del cliente y evitando la devolución de facturas.

En el caso del escenario 4 (escenario con mayor posibilidad de aplicación) se obtendría un 13% de mejora en el tiempo de ruta, lo cual beneficiaría a la

empresa en cuanto a eficiencia de distribución, cumpliendo con la demanda de los clientes dentro de los horarios estipulados.

La implementación de las rutas óptimas arrojadas por el modelo, implicaría para la empresa de servicios eliminar la distribución basada en urgencia o cercanía estipulada por el jefe de mensajería. Cabe resaltar que al no tener definida la emisión de facturas para cada cliente durante el mes (demanda), la programación de las rutas tendría que hacerse semanal, aplicando el modelo a los clientes a los que se deba entregar facturas en un segmento de tiempo determinado.

De acuerdo con los porcentajes de mejora especificados en la Tabla 13 y características de cada escenario enunciadas en la Tabla 10, se mostrará a continuación el detalle de la ruta óptima arrojada para el escenario 4 que fue seleccionada como la más cercana a aplicación en la empresa de servicios objeto de estudio. Los escenarios restantes se detallarán en el ANEXO 1.

Escenario 4

El cuarto escenario fue planteado modificando la jornada laboral, aumentándola de 7 horas a las horas necesarias para cumplir con la distribución total de facturas con las motos que se tienen disponibles y con los clientes que tienen restricción en el horario de atención.

Para este escenario, el modelo arrojó un valor de la función objetivo de $Z= 3.859,47$ minutos para las 2 motos durante los 5 días de la semana como la solución óptima para hacer la ruta. Es decir, 6.43 horas por moto cada día.

Los mapas a continuación, muestran las rutas óptimas arrojadas por el modelo para este escenario donde el recorrido de la moto 1 está constituido por la visita de 11 clientes el día lunes; 26 clientes el día martes; 31 clientes el día miércoles y 27 clientes el día jueves, sin visitar clientes con ventanas de tiempo estrictas el lunes y martes pero visitando este tipo de clientes los días miércoles donde se entregan facturas en los clientes 13 y 77 y el jueves en los clientes 95 y 58. Entregando durante la semana un total de 95 facturas.

ESCENARIO 4 MOTO 1 - LUNES



ESCENARIO 4 MOTO 1 - MARTES



LUNES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	84	510
84	2	554
2	52	584
52	85	629
85	113	642
113	73	662
73	29	996
29	143	1006
143	122	1012
122	72	1023
72	59	1050
59	1	1056

MARTES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	38	510
38	50	533
50	132	551
132	4	565
4	102	573
102	160	588
160	119	592
119	54	605
54	138	624
138	149	649
149	62	662
62	107	730
107	114	757
114	145	795
145	162	849
162	144	875
144	101	907
101	156	941
156	110	952
110	117	964
117	68	1003
68	128	1016
128	26	1024
26	45	1031
45	122	1037
122	18	1050
18	1	1055

Las rutas óptimas arrojadas por el algoritmo, son lógicas teniendo en cuenta el recorrido y horarios de llegada. Las rutas se ubican en la zona delimitada por la investigación y atraviesan los puntos de importancia donde se concentran la mayor parte de los clientes explicados en la sección de policentros.

ESCENARIO 4 MOTO 1 - MIÉRCOLES



ESCENARIO 4 MOTO 1 - JUEVES

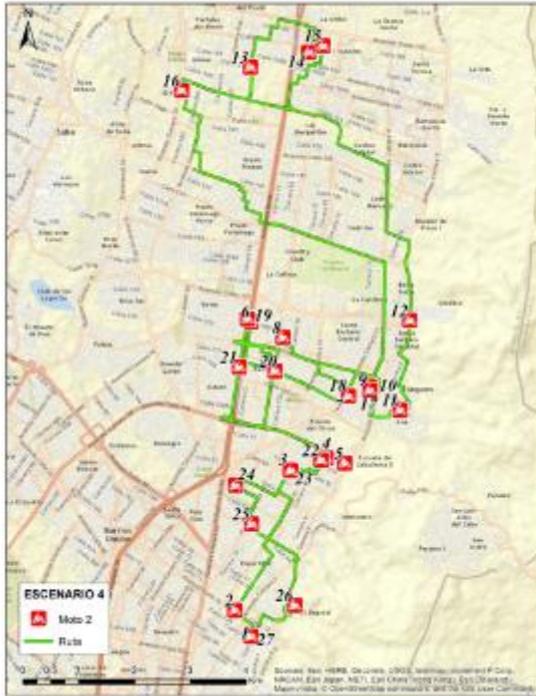


MIÉRCOLES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	10	510
10	13	520
13	118	534
118	105	541
105	6	547
6	146	573
146	134	582
134	74	602
74	133	627
133	154	638
154	124	659
124	112	692
112	89	694
89	21	722
21	46	728
46	125	745
125	100	756
100	77	763
77	8	799
8	97	825
97	121	841
121	120	851
120	91	884
91	159	911
159	3	917
3	152	949
152	76	970
76	47	1003
47	69	1009
69	30	1043
30	65	1050
65	1	1053

JUEVES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	43	510
43	49	529
49	94	541
94	129	546
129	155	572
155	95	620
95	90	651
90	67	671
67	42	685
42	157	699
157	130	714
130	119	730
119	39	738
39	106	751
106	53	788
53	139	804
139	140	836
140	28	842
28	37	885
37	75	894
75	92	912
92	78	943
78	57	961
57	41	993
41	58	1020
58	123	1033
123	79	1050
79	1	1056

En cada ruta se puede comprobar que el modelo de acuerdo con las restricciones establecidas, respeta las ventanas de tiempo de los clientes y prioriza aquellos con ventanas de tiempo estrictas.

ESCENARIO 4 MOTO 2 - LUNES



ESCENARIO 4 MOTO 2 - MARTES



LUNES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	19		510
19	71		521
71	31		530
31	22		607
22	127		646
127	103		661
103	158		702
158	90		710
90	141		730
141	161		743
161	121		772
121	116		785
116	142		795
142	11		853
11	138		883
138	88		909
88	126		927
126	100		972
100	32		978
32	51		985
51	104		1007
104	98		1014
98	83		1020
83	55		1024
55	147		1050
147	1		1052

MARTES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	136		510
136	40		528
40	82		566
82	63		575
63	93		601
93	60		627
60	99		646
99	81		661
81	15		985
15	80		997
80	131		998
131	108		1006
108	23		1050
23	1		1054

Las rutas cada día son afectadas por la velocidad promedio por día donde la mayor velocidad se presenta los días jueves y martes y la menor, los días viernes y miércoles.



MIÉRCOLES			
Desde		Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora	
1	66	510	
66	17	541	
17	25	573	
25	70	1050	
70	1	1050	

JUEVES			
Desde		Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora	
1	61	510	
61	87	530	
87	109	549	
109	115	593	
115	12	624	
12	36	630	
36	56	940	
56	35	953	
35	34	985	
34	98	1017	
98	134	1021	
134	96	1040	
96	20	1050	
20	1	1054	

Los tamaños de ruta dependen de la velocidad, del tiempo de viaje y del tiempo de servicio en cada cliente. Las rutas más cortas son aquellas en las que los clientes tienen un procedimiento para la entrega de la factura lento donde el mensajero debe invertir más tiempo, por lo que el modelo no programa más entregas buscando cumplir con las demandas en los tiempos estipulados.



VIERNES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	33	510
33	123	523
123	7	538
7	89	547
89	24	573
24	151	612
151	128	653
128	137	662
137	9	706
9	27	713
27	153	731
153	148	885
148	120	907
120	111	933
111	5	951
5	48	963
48	135	977
135	150	981
150	44	994
44	64	1021
64	16	1038
16	14	1050
14	1	1057

Las rutas óptimas para el escenario 4 moto 2 están constituidas por la visita de 25 clientes el lunes; 13 clientes el martes; 4 clientes el miércoles; 13 clientes el jueves y 22 clientes el viernes. Estas rutas incluyen clientes con ventanas de tiempo estrictas los días lunes donde visita el cliente 31, martes donde visita el cliente 81, jueves donde se visita el cliente 115 y viernes en el cliente 137.

En total la moto 2 a través de la semana distribuye facturas en 77 clientes, entregando en total 77 facturas.

Todas las rutas óptimas empiezan su recorrido saliendo de la empresa de servicios y regresando a ella una vez finalizadas las visitas y en cada una se puede confirmar que el algoritmo arroja resultados correctos, aplicables y acordes con la información real suministrada de la operación de la empresa.

La siguiente sección establece las conclusiones principales, trabajo futuro y perspectivas de investigación del trabajo de investigación presentado.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo de investigación enfoque de profundización es presentada una solución para optimizar la distribución de facturas de una empresa de servicios en la zona norte de Bogotá, enmarcada en el contexto de mercado emergente. La función objetivo se planteó para minimizar el tiempo de ruta conformada por el tiempo de viaje más el tiempo de servicio para un grupo de clientes, cumpliendo con las ventanas de tiempo (duras) que restringen el horario de recepción de las facturas en cada uno.

Para la elaboración de esta investigación se identificaron las principales características de un Mercado Emergente, de Bogotá, de una empresa de servicios y los problemas de ruteo, encontrando que el sector servicios presenta un gran reto para las operaciones al ser un campo poco explorado, más al ser enmarcado dentro de una ciudad que presenta características especiales como el crecimiento desordenado, problemas de tráfico y congestión.

La investigación permitió concluir las principales dificultades presentes en la zona de distribución de Bogotá para la empresa de estudio, por ejemplo, deficiencias en las entregas por tiempos muertos efectuados por los mensajeros al demorarse en puntos diferentes a clientes; adicionalmente, se ofrece un análisis que expone varios aspectos a mejorar en la operación interna de la empresa como, por ejemplo, los días de emisión de facturas.

El modelo matemático fue elaborado con base en el Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo para poder minimizar el tiempo de ruta, que permitió conceptualizar la realidad y elaborar varios escenarios que establecen las condiciones que se deben cumplir para mejorar la distribución de facturas. El uso del GPS fue fundamental para la obtención de datos permitiendo la recolección de información en tiempo real, evitando el uso de información de fuentes externas que se alejaran del contexto de la empresa (Letham, 2001).

De acuerdo con estos escenarios, se puede concluir que actualmente la empresa puede cumplir con los requerimientos y la demanda de facturas

emitidas para los clientes siguiendo las rutas establecidas por el modelo, en tiempos específicos, variando la distribución que efectúan las motos actualmente, organizando de una forma más estructurada la operación y no dejando a decisión del mensajero la entrega de los documentos. La validación del modelo con los datos de la programación semanal tiene una duración promedio de 1 hora con 30 minutos, tiempo que la empresa puede asumir puesto que tiene las facturas que debe entregar durante la semana desde el día viernes de la semana anterior, por lo que se puede disponer del tiempo para la validación del modelo con la programación semanal cada viernes, permitiendo establecer el itinerario de la semana siguiente.

Es importante resaltar que el escenario en el que se concentró mayor atención fue el escenario 4 al presentar el mejor porcentaje de mejora provocando menos cambios en la estructura actual de la empresa de estudio, sin embargo, no se descarta la posibilidad de implementar las rutas y características de otros escenarios con porcentajes de mejora mayores como es el escenario 5 que arrojó un 56% de mejora, muy por encima de los demás escenarios. Para la aplicación del escenario 5 sería necesario persuadir a los directivos de la empresa de estudio sobre la mejora significativa del proceso comparado con el impacto de los cambios como el aumento en la cantidad de motos utilizadas para la distribución, haciendo un análisis del costo de oportunidad y cómo ésta implementación aunque genere un incremento de costos inicialmente, brindaría la posibilidad de aumentar la calidad del servicio brindado a los clientes.

Vale la pena aclarar que no se centró atención en el tamaño de los clientes debido a que los clientes de la empresa de servicios tienen un tamaño considerable y la importancia en la entrega de la factura no radica en el tamaño del cliente sino en el valor de la factura que varía de acuerdo con el tipo de asesoría y no es posible simularlo para esta investigación.

De acuerdo con lo anterior, se concluye que los principales aportes de esta investigación son: analizar, desde el contexto de una ciudad en un mercado emergente, una empresa de servicios y el proceso de distribución de facturas por ella generada recolectando información en tiempo real; adelantar el primer estudio para poder determinar las mejores rutas teniendo en cuenta las

restricciones de los clientes y que así la empresa pueda aplicarlas, creando un modelo dinámico que permita programar las rutas semanales para un grupo de clientes. Adicionalmente, este trabajo aportó un análisis de los picos y tendencia de la emisión y entrega de facturas, permitiendo encontrar puntos de mejora para optimizar la operación interna de la empresa, que pueden aportar a mejorar la percepción de servicio por parte del cliente pudiendo concluir que hay días de baja operación que podrían aprovecharse para la emisión y distribución de facturas con ventanas de tiempo estrictas.

Aunque este trabajo haya enfocado su objetivo en la solución de un problema de una empresa. Es posible proponer varias alternativas de solución a problemas de la ciudad que ayudarían a mejorar la distribución, como la implementación de puntos especiales de parqueo para motocicletas y vehículos de mensajería en carriles cercanos a los policentros, permitiendo que los mensajeros reduzcan los tiempos de servicio que incluyen el buscar parqueadero y desplazarse caminando hasta la ubicación del cliente para hacer la entrega de la factura.

El modelo propuesto en esta investigación, es aplicable a cualquier sector de una ciudad al ser un problema general de ruteo sin embargo esta investigación sólo centró su atención en la zona norte debido a que ésta zona es la de mayor importancia para la empresa objeto de estudio. Cuando se desarrolle en otras zonas de la ciudad es vital analizar las características propias de malla vial, puntos de parqueo, accesos a centros empresariales, congestión e incluso la velocidad real que varía de acuerdo con la congestión de cada zona.

De acuerdo con los resultados obtenidos, sabiendo que efectivamente las rutas mostraron mejoras notables hasta de un 56% de ahorro en el tiempo de ruta, se pretende presentar estas rutas óptimas a la empresa para su implementación buscando más adelante hacer una evaluación del impacto de estos cambios en la operación y qué tan efectivo fue la aplicación de estas rutas en la reducción del indicador de devolución y la calidad del servicio ante el cliente.

Perspectivas de Investigación

Este trabajo de investigación se realizó limitado a la zona norte de Bogotá, una investigación que lo complementaría, sería extender este análisis a otras zonas de Bogotá, teniendo en cuenta las características propias de cada una.

Es fundamental seguir explorando el campo de servicios y el proceso de distribución de documentos en ciudades de mercados en potencial crecimiento, debido a que el desarrollo tecnológico y de mercado hace que las empresas busquen optimizar sus operaciones y un modelo como el presentado en este trabajo puede brindar soluciones rápidas a problemas de distribución de documentos.

Un aspecto a evaluar, más adelante es incluir costos en el análisis para poder tener una función objetivo que no sólo minimice el tiempo de ruta sino también costos de ruta, de tal forma que se pueda dar una solución más completa a problemas cotidianos de las empresas de servicios, con los objetivos fundamentales de costo y tiempo. Planteando preguntas como: ¿cuánto ahorro económico representa para la empresa de estudio la reducción de los tiempos de ruta?

Adicional se propone para un trabajo futuro, lograr determinar o proyectar la demanda de tal forma que la programación de rutas se pudiera hacer mensualmente y no semanalmente como lo plantea el modelo objeto de esta investigación.

El componente estocástico de este problema es una extensión inmediata que podría realizarse para considerar tiempos estocásticos en el problema estudiado en este modelo determinístico y contrastar valores y rutas obtenidas.

Finalmente, se motiva a que un estudio complementario incluya el análisis de datos como ¿cuántos clientes se pierden por la reincidencia en la devolución de facturas?. Esta revisión permitiría ampliar el alcance de este trabajo y brindar una mejor perspectiva de la problemática y la importancia de su solución.

REFERENCIAS

- Agtmael, A. V. (2007). *El Siglo de los Mercados Emergentes*. Nueva York: The Free Press.
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2011). *Plan de Ordenamiento Logístico*. Bogotá: Alcaldía mayor de Bogotá.
- Alcaldía Mayor de Bogotá y Secretaría Distrital de Movilidad. (2013). *Movilidad en cifras 2012*. Bogotá: Secretaria de Movilidad.
- Antun, J. P. (2013). *Distribución Urbana de Mercancías: Estrategias con Centros Logísticos*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Archila, A. F. (2015). *Combo 2600*. Obtenido de Combo 2600: <http://combo2600.com/transmilenio-y-sitp-ganando-la-batalla-perdiendo-la-guerra/>
- Arenas, M. R., & Reynoso, L. F. (2013). Optimización de la asignación y programación del despacho y control de mensajería interna y externa de una empresa productora y distribuidora de productos de consumo masivo. *Repositorio Digital de Tesis PUCP*, 1(1), 5-11.
- Banco de la República, BANREP. (2015). *Sectores económicos*. Bogotá: Subgerencia Cultural del Banco de la República.
- Barajas, W. N. (2009). Desarrollo de un Algoritmo Heurístico para establecer las rutas de transporte escolar de la secretraía de educación de Bogotá. *Universidad Nacional de Colombia*, 1(1), 1-62.
- Benjamin, A., & Beasley, J. (2010). Metaheuristics for the waste collection vehicle routing problem with time windows, driver rest period and multiple disposal facilities. *Computers & Operations Research*, 37(12), 2270-2280.
- Calvo, J. M., & Chacon, A. (2011). La factura electrónica en Colombia: visión integral. *Revista punto de vista* 3, 2(3), 222.
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2013). *Balance de la Economía de la región Bogotá-Cundinamarca*. Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá.
- Campo, A. J., Baldoquin de la Peña, M., & Escobar, W. (2012). *Diseño de un modelo matemático para el despacho de vehículos de emergencias médicas en Colombia*. Rio de Janeiro: XVI Latin-Ibero-American Conference on Operation Research/XLIV Brazilian Symposium on Operation Research (XVI CLAIO/XVIV SPBO).

- Campos, S., Castro, M., Cuy, M., & Gonzalo, F. (2005). CAPM en mercados emergentes. *Institut d'educació contínua*, 3(1), 4-6.
- Chang, T.-S., & Yen, H.-M. (2012). City-Courier routing and scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 489-498.
- Citimayors. (2007). *Citimayors*. Recuperado el 20 de Agosto de 2015, de Citimayors: <http://www.citymayors.com/statistics/largest-cities-density-125.html>
- Cordeau, J.-F., Gendreau, M., & Laporte, G. (2002). A guide to Vehicle Routing Heuristics. *The Journal of the Operational Research Society*, 53(5), 512-522.
- Corporación Andina de Fomento CAF. (2011). *Desarrollo urbano y movilidad en América Latina*. Ciudad de Panamá: Corporación Andina de Fomento CAF.
- Corporación Andina de Fomento; Instituto de Desarrollo Urbano; Universidad Nacional. (2012). *Guía para el diseño de vías urbanas para Bogotá D.C.* Bogotá: Instituto de Desarrollo Urbano (IDU).
- Current, J., & Marsh, M. (1993). Multiobjective transportation network design and routing problems: Taxonomy and annotation. *European Journal of Operational*, 65(1), 5-7.
- Daza, J. M., Montoya-Torres, J. R., & Narducci, F. (2009). Resolución del problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases. *Revista EIA, ISSN 1794-1237* (12), 24-29.
- De Maghalaes, J. M., & De Sousa, J. (2006). Dynamic VRP in pharmaceutical distribution- a case study. *Central European Journal of Operations Research*, 14(2), 181-183.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE. (2011). *Estimaciones de población 1985-2005 Proyecciones de población 2005-2020 nacional y departamental desagregado por área, sexo y grupos quinquenales de edad*. Bogotá: DANE.
- Dirección de estudios e investigaciones. (2004). *El sector servicios en la región Bogotá-Cundinamarca*. Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá.
- Dirección de estudios sectoriales y de servicios. (2012). *Evaluación de alternativas de modificación de la medida de restricción del tránsito de vehículos particulares "pico y placa"*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá.

- Duran, G. (2006). *Investigación de operaciones, modelos matemáticos y optimización*. Santiago de Chile: Seminario JUNAEB-DII.
- Ehmke, J. F., Campbell, A. M., & Urban, T. (2015). Ensuring service levels in routing problems with time windows and stochastic travel times. *European Journal of Operational Research*, 240(2), 539-550.
- Eksioglu, B., Volkan Vural, A., & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), 1472-1483.
- El Tiempo. (2015). Bogotá pierde siete millones de horas al año en trancones. *El Tiempo*, pág. 1.
- Errico, F., Desaulniers, G., Gendreau, M., Rei, W., & Rousseau, L.-M. (2015). A priori optimization with recourse for the vehicle routing problem with hard time windows and stochastic service times. *European Journal of Operational Research*, In Press, In Press, Accepted Manuscript.
- Figliozzi, M. A. (2010). An Iterative Route construction and Improvement Algorithm for the vehicle routing problem with soft and hard time windows. *College of Engineering and Computer Science-Portland State University-CEE*, 18(5), 2-8.
- Formato Educativo Escuela de Negocios. (2015). *El Mapa de procesos y Análisis de Procesos Clave*. Obtenido de formatoedu: http://www.formatoedu.com/web_gades/docs/2__Mapa_de_Procesos_1.pdf
- Galvis, L. A. (2013). *¿El triunfo de Bogotá? desempeño reciente de la ciudad capital*. Cartagena: Banco de la Republica.
- Golden, B., S, R., & Wasil, E. (2008). *The vehicle routing problem*. College Park: Springer Science + Business Media, LLC.
- Gonzalez, J., Delgado, J., Fraire, H., Martinez, J., & Morales, M. (2010). Construcción de una solución óptima para un problema de asignación de rutas, horarios y cargas del mundo real. *Computación y Sistemas*, 13(004), 399-406.
- Grupo de estudios económicos y financieros. (2014). *Comportamiento de las 1.000 empresas más grandes del sector real*. Bogotá: Superintendencia de Sociedades.
- Guerrero-Campanur, A., Perez-Loaiza, R., & Olivares-Benitez, E. (2011). Un caso logístico del problema de ruteo vehicular múltiple m-VRP resuelto con la heurística de Fisher & Jaikumar. *Taller Latino de Investigación de Operaciones*, 81(187), 2-5.

- Heizer, J., & Render, B. (2007). *Dirección de la producción y de operaciones. Decisiones estratégicas*. (Séptima ed.). Madrid: Pearson.
- Instituto de Desarrollo Urbano. (2014). *Estadísticas Malla Vial 2014 Corte Diciembre de 2014*. Bogotá: Instituto de Desarrollo Urbano (IDU).
- Juan, A. A., Adelantado, F., Grasman, S., Faulin, J., & Montoya-Torres, J. (2009). Solving the capacitated vehicle routing problem with maximum traveling distance and service time requirements: an approach based on Monte Carlo simulation. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC-2009)*, ISBN: 978-1-4244-5772-4, 2467-2475.
- Karagul, K. (2014). A new Heuristic routing algorithm for fleet size and mix vehicle routing problem. *Gazi university Journal of Science*, 27(3), 1-6.
- Kek, A., Long Cheu, R., & Meng, Q. (2008). Distance-constrained capacitated vehicle routing problems with flexible assignment of start and end depots. *Science Direct*, 47(1), 140-149.
- Koc, C., & Karaoglan, I. (2011). A branch and cut algorithm for the vehicles routing problem with multiple use of vehicles. *41st International Conference on Computers & Industrial Engineering* (págs. 1-5). Los Angeles: Proceedings of the 41st International Conference on Computers & Industrial Engineering.
- Laporte, G. (1992). The Vehicle Routing Problem: An Overview of exact and approximate Algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59(3), 345-358.
- Lei, H., Laporte, G., & Guo, B. (2011). The capacitated vehicle routing problem with stochastic demands and time windows. *Computers and operation Research*, 38(12), 1775-1783.
- Letham, L. (2001). *GPS Fácil*. Barcelona: Paidotribo.
- Li, X., Tian, P., & Leung, S. (2010). Vehicle routing problems with time windows and stochastic travel and service times: Models and algorithm. *International Journal of Production Economics*, 125(1), 137-145.
- Lin, C. (2011). A vehicle routing problem with pick up and delivery time windows and coordination of transportable resources. *Computers & Operations Research*, 38(11), 1596-1609.
- Luer, A., Benavente, M., Bustos, J., & Venegas, B. (2009). El problema de rutas de vehículos: Extensiones y métodos de resolución, estado del arte. *Workshop EIG 2009, EIG2009*, 1-4.

- Maldonado, C. E., & Gómez, N. A. (2010). Modelamiento y simulación de sistemas complejos. *Serie de Documento de Administración. Universidad del Rosario, ISSN 0124-8219(66)*, 26-28. Obtenido de <http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/3782/01248219-2010-66.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Marti, R. (2003). Procedimiento Metaheurísticos en Optimización Combinatoria. *Departament d'Estadística i Investigació Operativa-Universitat de València*, 1(1), 3-63.
- Medina, L. B., La Rota, E. C., & Castro, J. A. (2011). Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. *Ingeniería*, 16(2), 35-55.
- Montemanni, R., Gambardella, L., Rizzoli, A.-E., & Donati, A. (2004). Ant colony system for a dynamic vehicle routing problem. *Journal of Combinatorial Optimization*, 10(4), 327-343.
- Montoya-Torres, J., Alfonso-Lizarazo, E., Gutierrez-Franco, E., & Halabi, A. (2009). Using Randomization to solve Deterministic Vehicle Routing Problem with Service Times Requirements. *Winter Simulation Conference (WSC-2009)*, ISBN: 978-1-4244-5772-4, 2989-2994.
- Moya, M. J. (2003). *Investigación de Operaciones*. San José, Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
- Nagarajan, V., & Ravi, R. (2012). Approximation Algorithms for distance constrained vehicle routing problem. *Networks*, 59(2), 209-214.
- Nave, D. (2002). How to compare six sigma, lean and the theory of constraints. *Quality Progress*, 35(3), 73-80.
- Ordoñez, F., Dessouky, M., & Wang, C. (2011). *A New Approach for Routing Courier Delivery Services with Urgent Demand*. Los Angeles: Metrans. Transportation Center.
- Paginasamarillas.com. (2014). *Inmobiliaria Servivalores*. Obtenido de Inmobiliaria Servivalores: <http://www.inmobiliariaservivalores.com/inmuebles-en-venta/>
- Perez, J. I., & Jaramillo, G. P. (2013). Espacio literario relevante sobre el problema del vendedor viajero (TSP): contenido, clasificación, métodos y campos de inspiración. *Production Journal*, 23(4), 866-876.
- Petit Guasch, A., Piera, M. Á., Casanovas, J., & Figueras, J. (2003). *Modelado y simulación : aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

- Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., & Medaglia, A. (2011). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 225(1), 1-11.
- Pino, R., Lozano, J., Martínez, C., & Villanueva, V. (2011). Estado del arte para la resolución de enrutamiento de vehículos con restricciones de capacidad. *XV Congreso de Ingeniería de Organización* (págs. 848-850). Cartagena: XV Congreso de Ingeniería de Organización.
- Pozo Ruz, A., Ribeiro, A., & García, A. (23 de Abril de 2000). Sistema de posicionamiento global (GPS): Descripción, análisis de errores, aplicaciones y futuro. Madrid, España.
- Ramos, A., Sanchez, P., Ferrer, J. M., Barquin, J., & Linares, P. (Septiembre de 2010). *Modelos Matemáticos de Optimización*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad Pontificia ICAI.
- Rand, G. K. (2009). The life and times of the Savings Method for Vehicle Routing Problems. *Orion: The Journal of ORSSA*, 25(2), 125-132.
- Revista Dinero. (2014). *Revista Dinero*. Recuperado el 11 de mayo de 2014, de Revista Dinero: <http://www.dinero.com/economia/articulo/economia-bogota/191993>
- Rey, J. R. (2012). *EDIS University of Florida IFAS Extension*. Recuperado el 31 de Octubre de 2014, de EDIS University of Florida IFAS Extension: <http://edis.ifas.ufl.edu/in657>
- Salas, D. G. (2012). Estudio de un problema de distribución de productos alimenticios permitiendo particionar las entregas. *Universidad Autónoma de Nuevo León*, 1(1), 1-42.
- Secretaria de Transito y transporte. (2006). *Formulación del Plan Maestro de Movilidad para Bogotá que incluye ordenamiento de estacionamientos*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Taha, A. H. (2004). *Investigación de Operaciones* (Séptima ed.). Fayetteville: Pearson.
- Tan, K., Lee, L., Zhu, Q., & Ou, K. (2001). Heuristic Methods for vehicle routing problem with time windows. *Artificial Intelligence in Engineering*, 15(3), 281-295.
- Tapias-Isaza, C. J., Galeano-Ossa, A. A., & Hincapie-Isaza, R. A. (2010). Planeación de sistemas secundarios de distribución usando el algoritmo de branch and bound. *Ingeniería y Ciencia*, ISSN 1794-9165, 7(13), 55-56.

- Tas, D., Dellaert, N., Woensel, T. v., & De Kok, T. (2013). Vehicle routing problem with stochastic travel times including soft time windows and service costs. *Computers & Operations Research*, 40(1), 214-224.
- Tomala, J., & Villa, J. (2010). *Diseño de un sistema de soporte de decisiones para resolver el problema de ruteo en un servicio Courier*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- U.S. Air Force. (2015). *GPS.GOV*. Obtenido de GPS.GOV: <http://www.gps.gov/>
- Universidad de los Andes. (2013). *Uniandes*. Obtenido de Uniandes: <http://www.uniandes.edu.co/xplorer/especiales/movilidad2/bogota.html>
- Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., & Prins, C. (2014). A unified solution framework for multi-attribute vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 234(3), 658-670.
- Wang, I.-L. (2008). Distribution of small packages in metropolitan area by motorcycle courier services. *International Journal of Integrated Supply Management*, 4(1), 88-101.

ANEXO 1

Escenario 1

El primer escenario se refiere al resultado obtenido cuando el modelo se trabajó en GAMS bajo las condiciones reales de la empresa; luego de hacer los ajustes se obtuvo como resultado que el modelo no tenía solución debido a que los recursos con los que se contaba para hacer la distribución de las facturas, las ventanas de tiempos que debía cumplir para la distribución de las facturas y la jornada laboral no eran suficientes para poder hacer la ruta diaria esperada y lograr la entrega completa.

Escenario 2

El segundo escenario fue planteado para analizar el comportamiento del modelo al ampliar la jornada laboral hasta el punto mínimo que permitiera cumplir con la distribución completa de las facturas a los clientes propuestos.

Para este escenario, el modelo arrojó un resultado de la función objetivo $Z=3.926,87$ minutos como la solución óptima para efectuar la ruta para las 2 motos, 5 días de la semana. Es decir, una ruta diaria por moto de 6,54 horas.



LUNES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	19		510
19	52		516
52	85		561
85	113		573
113	83		593
83	55		975
55	147		1001
147	2		1018
2	84		1050
84	1		1060

MARTES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	38		510
38	4		533
4	101		541
101	144		574
144	117		606
117	68		645
68	128		659
128	108		666
108	45		989
45	93		997
93	63		1022
63	40		1050
40	1		1054

ESCENARIO 2 MOTO 1 - MIÉRCOLES



ESCENARIO 2 MOTO 1 - JUEVES



MIÉRCOLES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	105		510
105	74		517
74	89		543
89	76		570
76	46		602
46	125		619
125	100		630
100	77		637
77	8		766
8	97		792
97	120		809
120	91		842
91	159		869
159	3		875
3	152		907
152	121		921
121	21		937
21	112		944
112	124		946
124	154		980
154	133		1000
133	47		1011
47	69		1017
69	134		1050
134	1		1057

JUEVES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	20		510
20	87		542
87	115		562
115	98		593
98	49		863
49	94		874
94	41		879
41	129		907
129	58		930
58	34		942
34	35		972
35	36		1006
36	79		1034
79	61		1050
61	1		1053

ESCENARIO 2 MOTO 1 - VIERNES



ESCENARIO 2 MOTO 2 - LUNES



VIERNES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	123		510
123	16		1035
16	33		1050
33	1		1063

LUNES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	29		510
29	72		520
72	73		547
73	143		551
143	98		556
98	71		560
71	122		568
122	31		580
31	104		656
104	32		664
32	103		671
103	141		712
141	161		724
161	121		754
121	116		767
116	11		789
11	142		813
142	138		850
138	88		876
88	90		893
90	126		914
126	158		958
158	127		967
127	100		982
100	51		989
51	22		1010
22	59		1050
59	1		1056

ESCENARIO 2 MOTO 2 - MARTES



ESCENARIO 2 MOTO 2 - MIÉRCOLES



MARTES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	132	510
132	82	525
82	18	532
18	60	573
60	122	593
122	99	603
99	81	618
81	26	653
26	15	689
15	110	703
110	156	715
156	114	727
114	107	765
107	54	795
54	138	814
138	160	842
160	102	846
102	119	860
119	149	877
149	62	889
62	145	957
145	162	987
162	80	1016
80	131	1017
131	23	1025
23	50	1031
50	136	1050
136	1	1053

MIÉRCOLES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	25	510
25	10	538
10	13	548
13	65	561
65	118	598
118	146	605
146	6	936
6	30	962
30	17	973
17	70	1006
70	66	1050
66	1	1050

ESCENARIO 2 MOTO 2 - JUEVES



ESCENARIO 2 MOTO 2 - VIERNES



JUEVES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	43	510
43	96	529
96	123	538
123	37	556
37	28	565
28	95	608
95	67	639
67	42	688
42	139	701
139	130	736
130	53	750
53	39	760
39	106	774
106	119	805
119	157	820
157	90	835
90	140	856
140	155	862
155	75	910
75	92	928
92	78	959
78	57	977
57	56	1011
56	134	1024
134	12	1043
12	109	1050
109	1	1055

VIERNES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	14	510
14	64	535
64	89	550
89	128	578
128	5	587
5	137	599
137	153	643
153	148	664
148	120	687
120	27	712
27	9	886
9	111	894
111	48	912
48	135	926
135	150	930
150	151	944
151	44	984
44	24	1010
24	7	1050
7	1	1058

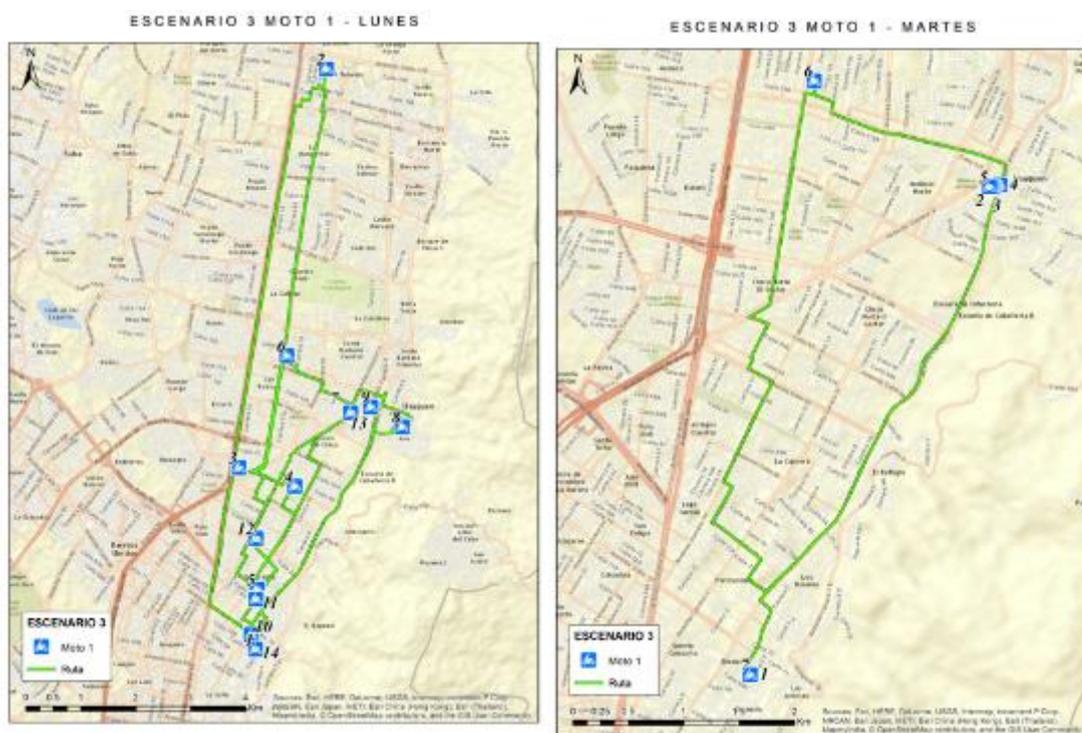
Escenario 3

El tercer escenario fue planteado para analizar el comportamiento del modelo al ampliar las ventanas de tiempo buscando dar mayor flexibilidad al modelo y permitiendo que los tiempos de viaje y de servicio no tuvieran que ser tan

estrictos para cumplir con las cotas inferiores y superiores de los horarios de cada cliente.

Se determinó entonces aplicar el horario de 8:00 a.m. a 6:00 p.m. a todos los clientes, eliminando la restricción de los 8 clientes que tenían horarios diferentes con ventanas de tiempo estrictas.

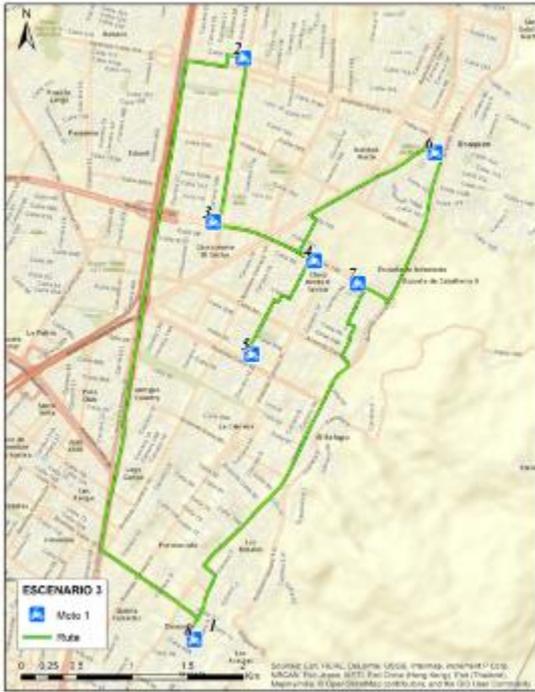
Para este escenario, el modelo arrojó un resultado de la función objetivo de $Z=4.139,23$ minutos como la solución óptima para hacer la ruta. Es decir, 6,89 horas por moto por día.



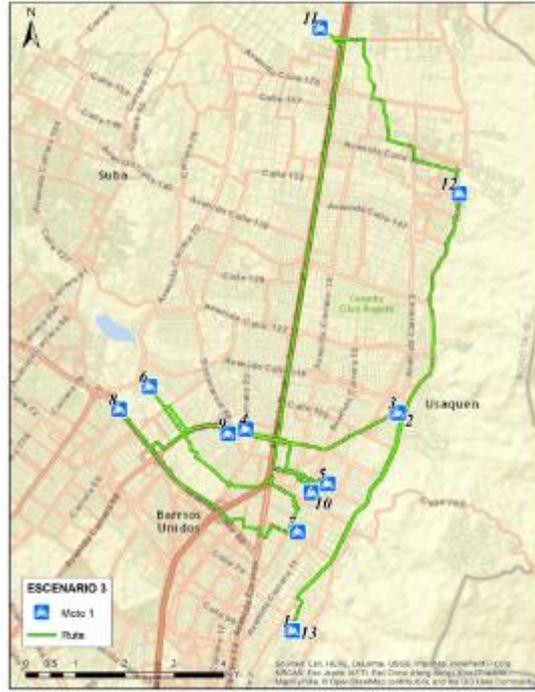
LUNES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	11	480
11	29	521
29	98	531
98	52	540
52	158	592
158	126	601
126	161	646
161	90	672
90	84	705
84	2	748
2	55	781
55	103	813
103	1	824

MARTES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	62	480
62	162	548
162	114	573
114	145	611
145	156	642
156	1	7579

ESCENARIO 3 MOTO 1 - MIÉRCOLES



ESCENARIO 3 MOTO 1 - JUEVES



MIÉRCOLES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	155	480
155	123	532
123	129	547
129	96	573
96	42	587
42	92	604
92	1	644

JUEVES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	90	480
90	67	500
67	56	520
56	98	532
98	109	538
109	20	581
20	61	614
61	115	636
115	36	668
36	39	715
39	106	1080
106	1	1103

ESCENARIO 3 MOTO 1 - VIERNES



ESCENARIO 3 MOTO 2 - LUNES



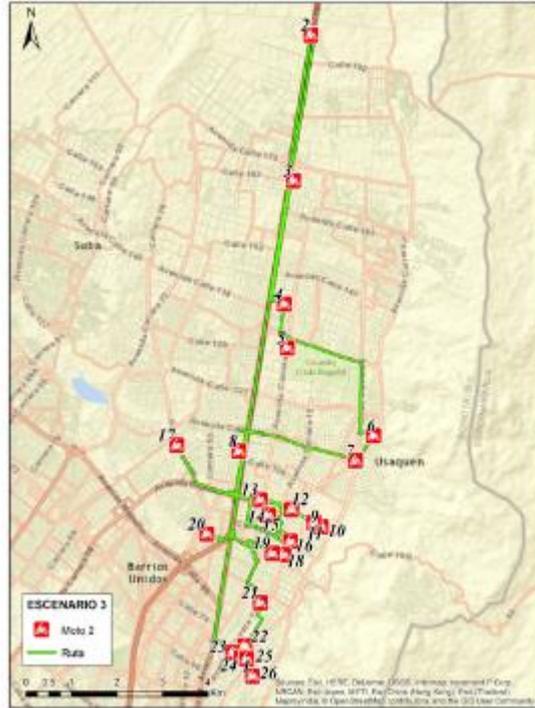
VIERNES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	27		480
27	120		503
120	148		526
148	153		546
153	137		799
137	111		842
111	5		860
5	48		872
48	135		886
135	150		890
150	44		903
44	151		930
151	24		970
24	89		1009
89	64		1036
64	123		1051
123	16		1068
16	14		1080
14	1		1087

LUNES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	127		480
127	138		501
138	122		533
122	73		715
73	59		719
59	72		744
72	71		772
71	88		786
88	22		806
22	142		857
142	19		911
19	113		920
113	85		940
85	147		954
147	51		978
51	31		1000
31	141		1080
141	1		1093

ESCENARIO 3 MOTO 2 - MARTES



ESCENARIO 3 MOTO 2 - MIÉRCOLES



MARTES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta	Hora	
1	68	480	
68	128	493	
128	15	501	
15	108	512	
108	81	556	
81	23	591	
23	93	601	
93	63	626	
63	60	653	
60	99	673	
99	122	687	
122	117	701	
117	144	738	
144	101	770	
101	18	810	
18	40	850	
40	132	888	
132	50	902	
50	38	923	
38	136	946	
136	4	963	
4	102	972	
102	160	986	
160	138	996	
138	54	1019	
54	149	1040	
149	107	1052	
107	110	1080	
110	1	1092	

MIÉRCOLES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta	Hora	
1	91	480	
91	3	507	
3	120	545	
120	97	567	
97	8	583	
8	77	623	
77	125	666	
125	46	675	
46	21	692	
21	76	698	
76	89	729	
89	124	757	
124	154	790	
154	133	810	
133	74	822	
74	69	847	
69	134	880	
134	6	899	
6	65	927	
65	13	964	
13	25	978	
25	70	1005	
70	66	1049	
66	17	1080	
17	1	1081	

ESCENARIO 5 MOTO 1 - LUNES



ESCENARIO 5 MOTO 1 - MIÉRCOLES



LUNES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	84	510
84	83	557
83	59	561
59	73	587
73	98	590
98	104	596
104	31	602
31	143	1004
143	85	1011
85	55	1022
55	19	1050
19	1	1051

MIÉRCOLES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	10	510
10	13	520
13	65	533
65	6	571
6	146	597
146	133	607
133	154	618
154	124	639
124	112	672
112	76	675
76	97	712
97	152	744
152	3	751
3	159	784
159	91	796
91	120	829
120	8	851
8	77	879
77	100	912
100	125	919
125	46	928
46	21	945
21	89	952
89	74	980
74	69	1006
69	47	1038
47	25	1050
25	1	1051

ESCENARIO 5 MOTO 2 - MARTES



ESCENARIO 5 MOTO 2 - JUEVES



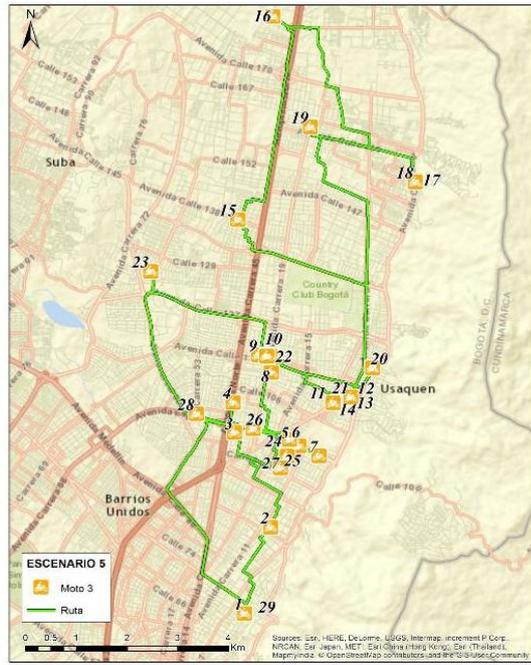
MARTES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta	Hora	
1	4	510	
4	102	518	
102	119	532	
119	160	538	
160	138	549	
138	54	571	
54	149	593	
149	107	605	
107	62	632	
62	114	700	
114	162	738	
162	145	763	
145	156	794	
156	110	842	
110	117	854	
117	80	894	
80	131	895	
131	45	904	
45	99	910	
99	60	925	
60	63	944	
63	18	972	
18	50	1012	
50	136	1030	
136	38	1050	
38	1	1050	

JUEVES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta	Hora	
1	109	510	
109	35	556	
35	41	589	
41	94	616	
94	134	623	
134	36	642	
36	12	693	
12	96	699	
96	79	707	
79	115	720	
115	20	996	
20	61	1029	
61	43	1050	
43	1	1051	

ESCENARIO 5 MOTO 3 - LUNES



ESCENARIO 5 MOTO 3 - JUEVES



LUNES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	113	510
113	122	531
122	51	543
51	22	564
22	90	605
90	138	629
138	142	657
142	11	689
11	116	715
116	121	726
121	161	739
161	141	765
141	88	799
88	158	817
158	126	825
126	103	869
103	127	909
127	100	924
100	32	930
32	71	940
71	72	948
72	29	976
29	52	990
52	147	1033
147	2	1050
2	1	1052

JUEVES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	87	510
87	49	531
49	58	542
58	78	554
78	129	572
129	92	595
92	37	628
37	28	638
28	140	680
140	95	686
95	139	717
139	67	748
67	42	762
42	130	778
130	39	798
39	106	811
106	119	843
119	53	850
53	157	865
157	90	879
90	155	900
155	75	949
75	57	967
57	34	1000
34	123	1030
123	98	1046
98	56	1050
56	1	1056

ESCENARIO 5 MOTO 4 - MARTES



ESCENARIO 5 MOTO 4 - MIÉRCOLES



MARTES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta	Hora	
1	132	510	
132	40	524	
40	82	563	
82	93	571	
93	122	598	
122	108	609	
108	81	653	
81	144	945	
144	101	977	
101	128	1012	
128	68	10	19
68	15	1033	
15	26	1044	
26	23	1050	
23	1	1054	

MIÉRCOLES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta	Hora	
1	30	510	
30	118	516	
118	105	523	
105	134	529	
134	17	973	
17	70	1006	
70	66	1050	
66	1	1051	

ESCENARIO 5 MOTO 4 - VIERNES



VIERNES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	14	510
14	64	535
64	24	550
24	128	590
128	150	597
150	135	612
135	48	614
48	5	628
5	137	640
137	27	684
27	153	702
153	148	842
148	120	864
120	9	889
9	111	897
111	44	917
44	151	944
151	89	984
89	7	1012
7	123	1019
123	16	1035
16	33	1050
33	1	1054

Escenario 6

El sexto escenario fue planteado para aumentar el número de motos a 3 para ver el comportamiento del modelo y verificar si al aumentar los recursos para efectuar la distribución sí era posible una mayor reducción del tiempo de ruta cumpliendo con las ventanas de tiempos y los requerimientos de los clientes.

Para este escenario, el modelo arrojó que no tiene solución posiblemente debido a la restricción de la jornada laboral que no permite que la distribución se efectúe debido a que limita mucho el sistema; por lo que es necesario aumentar la jornada laboral como se mostrará en el escenario 8.

Escenario 7

El séptimo escenario fue planteado para eliminar las ventanas de tiempo estrictas y establecer como único horario de todos los clientes de 8:30 a.m. a 5:30 p.m. con las dos motos actuales aumentando la jornada.

Para este escenario, el modelo arrojó un resultado de la función objetivo de $Z=3.869,19$ minutos como la solución óptima para hacer la ruta. Es decir, 6,44 horas por moto cada día.

ESCENARIO 7 MOTO 1 - LUNES



ESCENARIO 7 MOTO 1 - MARTES



LUNES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	73	510
73	98	513
98	143	517
143	104	524
104	31	530
31	127	609
127	103	624
103	126	664
126	158	708
158	90	717
90	88	737
88	141	754
141	161	766
161	121	805
121	138	815
138	142	843
142	11	874
11	116	900
116	100	917
100	32	923
32	51	930
51	22	951
22	122	990
122	71	1000
71	72	1009
72	29	1036
29	147	1050
147	1	1052

MARTES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	136	510
136	26	532
26	23	538
23	131	545
131	128	553
128	68	560
68	80	573
80	15	575
15	108	586
108	81	630
81	45	889
45	99	895
99	122	909
122	63	920
63	18	948
18	82	987
82	40	994
40	132	1033
132	38	1050
38	1	1051

ESCENARIO 7 MOTO 1 - MIÉRCOLES



ESCENARIO 7 MOTO 1 - JUEVES



MIÉRCOLES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	66		510
66	17		541
17	30		578
30	65		585
65	13		1035
13	70		1050
70	1		1051

JUEVES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	56		510
56	49		522
49	35		533
35	57		566
57	129		598
129	28		623
28	67		667
67	157		682
157	130		697
130	53		711
53	119		720
119	106		726
106	39		759
39	42		783
42	139		796
139	90		832
90	95		853
95	140		883
140	155		889
155	37		937
37	75		947
75	92		964
92	78		995
78	34		1014
34	98		1045
98	12		1050
12	1		1056

ESCENARIO 7 MOTO 2 - LUNES



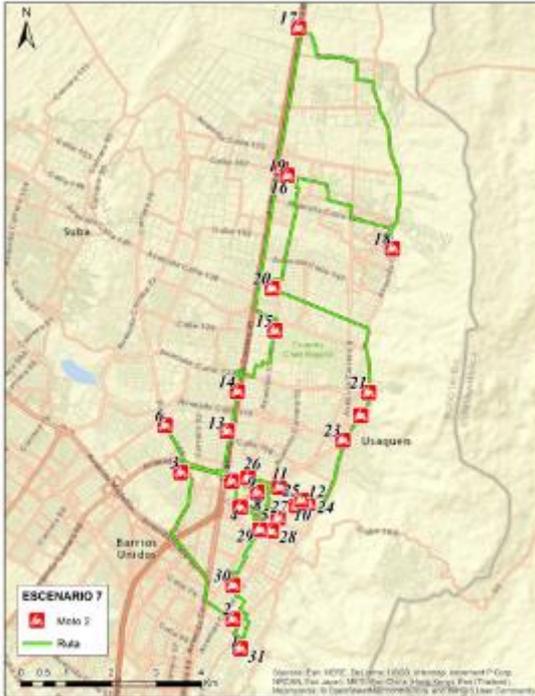
ESCENARIO 7 MOTO 2 - MARTES



LUNES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	84		510
84	2		554
2	83		587
83	59		591
59	113		617
113	85		968
85	55		979
55	52		1005
52	19		1050
19	1		1051

MARTES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	4		510
4	102		518
102	160		532
160	119		536
119	138		549
138	54		571
54	149		592
149	62		605
62	107		673
107	114		700
114	162		738
162	145		842
145	156		873
156	110		884
110	101		896
101	144		929
144	117		961
117	60		1003
60	93		1023
93	50		1050
50	1		1054

ESCENARIO 7 MOTO 2 - MIÉRCOLES



ESCENARIO 7 MOTO 2 - JUEVES



MIÉRCOLES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	25	510
25	118	541
118	105	548
105	146	553
146	69	563
69	47	595
47	133	602
133	154	613
154	112	634
112	89	636
89	21	663
21	125	670
125	100	681
100	97	690
97	3	713
3	91	752
91	159	779
159	152	785
152	120	798
120	121	819
121	8	829
8	77	857
77	46	892
46	76	909
76	124	941
124	74	975
74	134	1001
134	6	1020
6	10	1050
10	1	1053

JUEVES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	61	510
61	87	530
87	109	549
109	115	593
115	123	626
123	58	641
58	41	653
41	94	681
94	134	687
134	36	964
36	96	992
96	79	1001
79	20	1015
20	43	1050
43	1	1051

ESCENARIO 7 MOTO 2 - VIERNES



VIERNES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	14	510
14	24	535
24	44	575
44	150	601
150	27	617
27	153	635
153	120	660
120	148	683
148	9	704
9	137	712
137	111	755
111	5	891
5	48	903
48	135	917
135	128	921
128	151	929
151	89	969
89	64	996
64	7	1012
7	123	1019
123	16	1035
16	33	1050
33	1	1054

Escenario 8

El octavo escenario fue planteado para aumentar la jornada laboral hasta permitir la distribución con 3 motos.

Para este escenario, el modelo arrojó un resultado de la función objetivo de $Z=3.891,62$ minutos como la solución óptima para hacer la ruta. Es decir, 6,48 horas por moto cada día.

ESCENARIO 8 MOTO 1 - MARTES



ESCENARIO 8 MOTO 1 - MIÉRCOLES



MARTES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	18		510
18	26		553
26	15		559
15	117		573
117	156		610
156	145		622
145	162		652
162	114		677
114	107		715
107	62		940
62	68		1011
68	128		1024
128	45		1032
45	82		1042
82	136		1050
136	1		1053

MIÉRCOLES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	146		510
146	69		520
69	47		552
47	74		558
74	154		715
154	133		735
133	13		750
13	70		1006
70	66		1050
66	1		1051

ESCENARIO 8 MOTO 1 - JUEVES



ESCENARIO 8 MOTO 2 - LUNES



JUEVES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	20	20	510
20	87	87	542
87	79	79	562
79	98	98	575
98	34	34	581
34	75	75	613
75	37	37	629
37	28	28	639
28	90	90	682
90	42	42	702
42	130	130	719
130	53	53	733
53	119	119	741
119	106	106	747
106	39	39	797
39	157	157	819
157	67	67	834
67	139	139	848
139	95	95	880
95	140	140	910
140	155	155	916
155	92	92	966
92	57	57	998
57	123	123	1030
123	61	61	1050
61	1	1	1053

LUNES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	147	147	510
147	52	52	527
52	85	85	572
85	55	55	596
55	29	29	609
29	98	98	620
98	143	143	624
143	104	104	631
104	22	22	637
22	103	103	677
103	126	126	717
126	88	88	762
88	116	116	787
116	11	11	797
11	142	142	820
142	138	138	857
138	121	121	890
121	161	161	902
161	141	141	928
141	90	90	940
90	158	158	961
158	127	127	970
127	100	100	985
100	32	32	990
32	51	51	997
51	71	71	1021
71	113	113	1031
113	83	83	1050
83	1	1	1055

ESCENARIO 8 MOTO 2 - MARTES



ESCENARIO 8 MOTO 3 - LUNES



MARTES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	38	510
38	132	533
132	40	548
40	63	588
63	93	614
93	60	639
60	99	659
99	81	674
81	23	709
23	50	716
50	4	734
4	102	742
102	160	756
160	119	846
119	138	859
138	54	881
54	149	902
149	110	916
110	144	928
144	101	960
101	80	995
80	131	995
131	108	1005
108	122	1050
122	1	1057

LUNES		
Desde	Hacia	
Nodo desde	Nodo hasta	Hora
1	84	510
84	2	554
2	59	588
59	31	616
31	122	1003
122	73	1014
73	72	1017
72	19	1050
19	1	1051

ESCENARIO B MOTO 3 - MIÉRCOLES



ESCENARIO B MOTO 3 - JUEVES



MIÉRCOLES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	25	510	
25	30	541	
30	118	547	
118	105	554	
105	134	560	
134	21	581	
21	125	588	
125	97	603	
97	120	620	
120	91	653	
91	159	680	
159	3	686	
3	152	718	
152	121	782	
121	8	792	
8	77	820	
77	100	853	
100	46	860	
46	76	877	
76	89	909	
89	112	936	
112	124	938	
124	6	973	
6	65	1001	
65	10	1039	
10	17	1050	
17	1	1051	

JUEVES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	109	510	
109	115	554	
115	96	585	
96	49	594	
49	35	605	
35	94	637	
94	129	643	
129	78	666	
78	41	939	
41	58	966	
58	56	980	
56	134	992	
134	36	1011	
36	12	1039	
12	43	1050	
43	1	1051	

ESCENARIO 8 MOTO 3 - VIERNES



VIERNES			
Desde	Hacia		
Nodo desde	Nodo hasta		Hora
1	14		510
14	16		533
16	7		546
7	89		554
89	128		582
128	48		591
48	111		605
111	137		623
137	9		667
9	27		674
27	148		693
148	120		834
120	153		859
153	5		880
5	135		892
135	150		896
150	44		909
44	151		936
151	24		976
24	64		1015
64	123		1031
123	33		1050
33	1		1054